



Imię i nazwisko autora rozprawy: Anna Kopańska
Dyscyplina naukowa: Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: ***Wpływ ukształtowania zbrojenia na zarysowanie i nośność żelbetowego węzła tarczowego ze wspornikiem***

Tytuł rozprawy w języku angielskim: ***The influence of reinforcement shape on cracking and load carrying capacity of the reinforced concrete deep beam joint with cantilever***

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Krystyna Nagrodzka-Godycka	
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
dr Marcin Kneć	



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: <imię, nazwisko>

Ja, niżej podpisany(a), oświadczam, iż jestem świadomy(a), że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

<tytuł>

do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2021.478 t.j.), a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem <promotor>, drugim promotorem <drugi promotor>, promotorem pomocniczym <promotor pomocniczy>, kopromotorem <kopromotor>*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami, zgodnie z przepisem art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....

podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/nie wyrażam zgody* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej.

Gdańsk, dnia

.....

podpis doktoranta

**niepotrzebne usunąć*

¹ Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz wielokrotnie w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.

*Składam serdeczne podziękowania
Prof. dr inż. hab. Krystynie Nagrodzkiej-Godyckiej
Promotorowi niniejszej pracy
za okazaną cierpliwość i wszelką pomoc,
a także życzliwość i poświęcony czas,
oraz za otrzymane cenne wskazówki i uwagi
w trakcie realizacji pracy.*

*Dziękuję serdecznie
dr Marcinowi Kneciowi
Promotorowi pomocniczemu,
za otrzymane wszelkie uwagi i rady
dotyczące pomiarów optycznych i nie tylko.*

*Niezmiernie dziękuję
mgr inż. Kamili Zmuda-Baszczyń
za efektywną współpracę podczas
realizacji pierwszej serii badań.*

*Dziękuję serdecznie
mgr inż. Jarosławowi Kondratowi,
a także mgr inż. Maciejowi Solarczykowi
za pomoc w przeprowadzeniu
badań doświadczalnych.*

*Dziękuję gorąco mojemu Mężowi
za nieocenione wsparcie i wyrozumiałość,
a także za wszelką pomoc
w trakcie wykonywania niniejszej pracy.*

Streszczenie

Praca ma charakter eksperymentalno-teoretyczny i dotyczy zagadnień związanych z żelbetowymi tarczami pracującymi w przestrzennym układzie konstrukcji budynków. Celem niniejszej dysertacji jest *określenie wpływu głównych parametrów jakimi są sposób ukształtowania zbrojenia i smukłość ścinania na zarysowanie i nośność żelbetowego przestrzennego węzła tarczowego ze wspornikiem*.

Dokonany w pracy przegląd literatury pozwolił autorce stwierdzić, iż z uwagi na bardzo nieliczne badania tarcz wspornikowych czy też tarcz z przewieszeniami pracujących w przestrzennym układzie, wciąż brakuje pełnego stanu wiedzy w rozpoznaniu zagadnienia zachowania się tych elementów konstrukcyjnych, stanowiących coraz szersze zastosowanie w budownictwie.

Na podstawie aktualnego stanu wiedzy, opracowano program eksperymentalnych badań czterech przestrzennych układów tarcz żelbetowych w skali zbliżonej do naturalnej, co stanowiło w sumie dwanaście zróżnicowanych tarcz płaskich. Kluczowym elementem konstrukcyjnym przestrzennego węzła tarcz, który stanowił podstawę rozważań niniejszej dysertacji była tarcza wspornikowa. Dla tarczy tej przyjęto dotychczas nieanalizowane obciążenie, rozłożone wzdłuż całej wysokości elementu, na krawędzi zewnętrznej. W tym celu zaprojektowano stanowisko badawcze z autorskim rozwiązaniem przekazania obciążenia na przestrzenny węzeł, uwzględniające rozkład sił działających w sposób pośredni i bezpośredni na poszczególne elementy tarczowe.

W badaniach podjęto próbę sprawdzenia efektywności bardziej uproszczonej formy konstruowania zbrojenia we wspornikach tarczowych jaką jest zbrojenie ortogonalne.

Postawiono tezę w niniejszej rozprawie, która stanowiła, że *smukłość ścinania i kształt zbrojenia wpływają na zarysowanie i nośność żelbetowego węzła tarczowego ze wspornikiem*.

Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań pozwoliły na dokonanie analizy w zakresie wpływu rozkładu obciążenia działającego na wysokości tarcz, wywołującego stan naprężeń i zarysowań różny od najczęściej badanych tarcz płaskich. Zrealizowane badania miały charakter naukowy, o dużym znaczeniu poznawczym, jak również praktycznym. Nie miały charakteru statystycznego, lecz jakościowy – dotyczyły zarysowania, odkształceń stali i betonu oraz nośności.

Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań eksperymentalnych, pozwoliły stwierdzić, że każdy z badanych przestrzennych układów tarczowych niezależnie od sposobu ukształtowania zbrojenia czy smukłości tarczy wspornikowej przeniósł obciążenie projektowe. Zatem ortogonalne zbrojenie, łatwiejsze w wykonawstwie, umożliwiło osiągnięcie projektowanej nośności. Najbardziej efektywne pod względem zarysowania w tarczach wspornikowych, jak i poprzecznych było zbrojenie ukośne.

Badania stanów deformacji za pomocą *techniki DIC* dzięki możliwości wykonania bezstykowego ciągłego pomiaru na całym obszarze tarcz wspornikowych, pozwoliły na uzyskanie rzeczywistego obrazu wyężenia betonu w stanie granicznym zarysowania i nośności. Eksperymentalne pomiary odkształceń stali w tarczach wspornikowych obciążonych po wysokości pozwoliły na określenie roli górnego zbrojenia poziomego, jak również poziomych strzemion rozłożonych na wysokości, czego nie obejmowały dotychczasowe zalecenia. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych badań doświadczalnych potwierdziły postawioną w pracy tezę.

W analizie teoretycznej, opierając się na wynikach uzyskanych z własnych badań, zweryfikowano zalecenia literaturowe w odniesieniu do wymiarowania żelbetowych tarcz



wspornikowych obciążonych po wysokości jak i zaleceń normowych dotyczących projektowania wsporników słupa z obciążeniem pośrednim.

W analizie stanu granicznego nośności tarczy wspornikowej zaproponowano własne *modele obliczeniowe ST (Strut-and-Tie)* z uwagi na stal i beton, uwzględniające zredukowaną wytrzymałość ściskanych krzyżulców betonowych w złożonym stanie naprężeń. Redukcję wytrzymałości betonu $f_{c,red}$ w stosunku do jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie f_c , wyznaczono przyjmując współczynnik zmiękczenia β na podstawie własnych pomiarów odkształceń betonu oraz według wybranych pozycji literaturowych i normowych.

Przeprowadzona *analiza Strut-and-Tie* potwierdziła istotny udział w przekazywaniu siły działającej po wysokości zarówno górnego zbrojenia poziomego, jak i poziomych strzemion rozmieszczonych na wysokości wspornika, niezależnie od badanej smukłości czy zastosowanego kształtu zbrojenia. Analiza nośności granicznej wykazała również, że wyczerpanie nośności tarcz wspornikowych może być związane ze stanem granicznym wyężenia betonu, w którym należy uwzględnić zjawisko zmęczenia w zarysowanym polu ściskanym.

Na podstawie przyjętych *schematów ST* podano propozycję wymiarowania tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości z uwzględnieniem warunku ograniczającego minimalne wymiary tarczy wspornikowej z uwagi na zarysowany beton i redukcję wytrzymałości betonu w ściskanym krzyżulcu.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań eksperymentalnych wraz z analizą teoretyczną i propozycją projektowania stanowią ważny element poznawczy zarówno teoretyczny jak i praktyczny.

Summary

This experimental and theoretical dissertation concerns issues related to reinforced concrete deep beams that are part of the spatial arrangement of building structures. The purpose of this thesis is to *determine the influence of the main parameters, such as the way of shaping the reinforcement and shear slenderness on cracking and load carrying capacity of the reinforced concrete spatial deep beam joint with cantilever.*

The review of the technical literature showed that there are very few studies of the cantilever deep beams or the deep beams that are loaded by suspended others, being part of the spatial system. Therefore, there is still a lack of full knowledge to identify the behaviour of these structural elements, which are more used in the construction industry.

Based on the current state of knowledge, a program of experimental studies of four spatial reinforced concrete deep beams joints on a scale close to natural was developed. That means twelve different flat deep beams was tested. The key structural element of the spatial deep beam joint, which was the basis for the considerations of this dissertation, was the cantilever deep beam. For this deep beam, assumed load that was not analysed. This load was distributed along the entire height of the element, on the outer edge. For this purpose, a test setup was designed with an original solution for transferring the load to a spatial deep beam joint, taking into account the distribution of forces acting directly and indirectly on individual deep beam elements.

Research checks the effectiveness of a more simplified form of constructing reinforcement in cantilever deep beam, which is orthogonal reinforcement.

A thesis was formulated that *the shear slenderness and the shape of the reinforcement affect the cracking and load carrying capacity of the reinforced concrete cantilever deep beam.*

The test results allowed to analyse the impact of the load distribution of the deep beams, causing the state of stresses and cracks different from the most frequently tested flat deep beams. The scientific research had great cognitive as well as practical importance. They were not statistical, but qualitative - they concerned scratches, deformations of steel and concrete, and load capacity.

The results obtained from the conducted experimental research allowed to conclude that each of the tested spatial deep beam systems, regardless of the shape of the reinforcement or the slenderness of the cantilever deep beam, transferred the design load. The orthogonal reinforcement, which is easier to perform, allowed to achieve the design load capacity. Diagonal reinforcement was the most effective in terms of cracking in the cantilever deep beams and as well as in the transverse deep beams.

The analyse of deformation using the *DIC technique*, that allow for performing a non-contact continuous measurement over the entire area of the cantilever deep beams, resulted with real concrete effort on cracking and load carrying capacity. Experimental measurements of steel deformations in cantilever deep beams loaded throughout the depth allowed to determine the role of the upper horizontal reinforcement, as well as the horizontal stirrups distributed over the height, which was not included in the previous recommendations. The results obtained from the conducted experimental research confirmed the dissertation thesis.

Theoretical analysis based on the results obtained from own research allowed to verified literature recommendations regarding to the dimensioning of reinforced concrete cantilevers loaded

throughout the depth, as well as standard recommendations for the design of short corbels with indirect loads.

The limit state analysis of the cantilever deep beam proposed own calculation models ST (Strut-and-Tie) for steel and concrete, considering the reduced strength of compression diagonal concrete strut in a complex state of stress. The reduction of concrete strength $f_{c,red}$ in relation to the uniaxial compressive strength f_c was determined by assuming the softening coefficient β based on measurements of concrete deformation and according to some literature and standard proposals.

The Strut-and-Tie analysis ensures that the effective reinforcement are both the upper bars and the horizontal stirrups arranged at the height of the cantilever, from the tested slenderness or shape of the reinforcement. The analysis also means that the limit capacity of the cantilever deep beams may be related to the effect of the limit concrete effort, and therefore the coefficient of softening in the cracked field should be included.

Based on ST model defined proposals for the dimensioning of cantilever deep beams loaded throughout the height, taking into account the condition limiting the minimum dimensions of the cantilever deep beam due to cracked concrete and reduction of concrete strength in the compressed diagonal.

The results of experimental research presented in this phd thesis, together with the theoretical analysis and design proposal, are an important theoretical and practical cognitive element.

Spis treści

Streszczenie.....	7
Summary	9
Spis treści	11
Spis ważniejszych oznaczeń.....	15
1 CEL, ZAKRES I TEZA PRACY	17
2 WPROWADZENIE.....	19
Przykłady zastosowania.....	21
3 STAN WIEDZY	25
3.1 <i>Badania eksperymentalne obce</i>	<i>25</i>
3.1.1 Tarcze wspornikowe	25
3.1.2 Tarcze jednoprzęsłowe i ciągłe.....	42
3.2 <i>Ujęcia normowe</i>	<i>56</i>
3.2.1 PN-B-03264:2002	56
3.2.2 PN-EN 1992-1-1:2008	58
3.2.3 ACI 318-19.....	59
3.2.4 Model Code 2010,	59
3.3 <i>Podsumowanie</i>	<i>60</i>
4 BADANIA EKSPERYMENTALNE WŁASNE.....	61
4.1 <i>Zakres i program badań.....</i>	<i>61</i>
4.1.1 Geometria badanych elementów	62
4.1.2 Zbrojenie	63
4.1.3 Materiały	70
4.1.4 Stanowisko badawcze i przebieg badań.....	72
4.2 <i>Zakres i metodyka pomiarów</i>	<i>75</i>
4.2.1 Odkształcenia stali	75
4.2.2 Odkształcenia betonu	78



4.2.3	Przemieszczenia	80
4.2.4	Morfologia i szerokość rys	81
4.3	<i>Wyniki badań i ich analiza</i>	82
4.3.1	Odkształcenia stali	83
4.3.2	Odkształcenia betonu	93
4.3.3	Przemieszczenia	102
4.3.4	Zarysowanie i nośność	106
5	ANALIZA TEORETYCZNA TARCZY WSPORNIKOWEJ	133
5.1	<i>Weryfikacja dotychczasowych zaleceń</i>	135
5.1.1	Zalecenia Leonhardta	135
5.1.2	Zalecenia Schrödera	136
5.1.3	Zalecenia normowe	136
5.1.4	Podsumowanie	138
5.2	<i>Analiza stanu wyężenia i zarysowania</i>	138
5.2.1	Stan przed zarysowaniem	138
5.2.2	Stan po zarysowaniu	139
5.2.3	Podsumowanie	140
5.3	<i>Analiza nośności granicznej</i>	140
5.3.1	Stan graniczny wyężenia stali	141
5.3.2	Stan graniczny wyężenia betonu	146
5.3.3	Podsumowanie	152
5.4	<i>Propozycja projektowania</i>	154
5.4.1	Wyznaczenie zbrojenia	154
5.4.2	Wyznaczenie przekroju betonowego	157
6	WNIOSKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE	159
6.1	<i>Wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych</i>	159
6.1.1	Wpływ ukształtowania zbrojenia	159
6.1.2	Wpływ smukłości tarczy wspornikowej	161
6.2	<i>Wnioski z analizy teoretycznej tarcz wspornikowych</i>	162
6.3	<i>Kierunki dalszych badań i analiz</i>	163



Spis treści	13
7 Spis rysunków	165
8 Spis tabel.....	171
9 Bibliografia	173

Spis ważniejszych oznaczeń

Duże litery łacińskie

A_c	- powierzchnia betonowego przekroju poprzecznego,
A_s	- powierzchnia przekroju zbrojenia,
A_h	- powierzchnia przekroju górnego zbrojenia poziomego w tarczy wspornikowej,
A_{st}	- powierzchnia przekroju strzemion poziomych w tarczy wspornikowej,
A_v	- powierzchnia przekroju pionowych strzemion podwieszających w tarczy wspornikowej,
A_d	- powierzchnia przekroju prętów ukośnych w tarczy wspornikowej,
E_{cm}	- sieczny moduł sprężystości betonu,
E_{co}	- początkowy moduł sprężystości betonu,
F	- siła pionowa (z prasy wytrzymałościowej) obciążająca cały układ tarczowy,
F_{Ah}	- siła w górnym zbrojeniu poziomym tarczy wspornikowej,
F_{Ast}	- siła w strzemionach poziomych tarczy wspornikowej,
F_{Av}	- siła w pionowych strzemionach podwieszających tarczy wspornikowej,
F_{Ad}	- siła w prętach ukośnych tarczy wspornikowej,
F_{cr}	- siła rysująca przestrzenny układ tarczowy,
F_u	- siła niszcząca przestrzenny układ tarczowy,
F_1	- siła pionowa obciążająca wspornik po wysokości,
$F_{1,cr}$	- siła rysująca wspornik tarczowy,
$F_{1,u}$	- maksymalna siła pionowa obciążająca wspornik w chwili zniszczenia całego układu tarczowego
F_2	- siła pionowa obciążająca tarczę podłużną na krawędzi górnej,
$F_{2,cr}$	- siła rysująca tarczę podłużną,
$F_{2,u}$	- maksymalna siła pionowa obciążająca tarczę podłużną w chwili zniszczenia całego układu tarczowego (F_u),
F_3	- siła pionowa obciążająca tarczę poprzeczną po wysokości w środku przęsła,
$F_{3,cr}$	- siła rysująca tarczę poprzeczną,
$F_{3,u}$	- maksymalna siła pionowa obciążająca tarczę poprzeczną w chwili zniszczenia całego układu tarczowego (F_u),
H	- wysokość przekroju.

Małe litery łacińskie

a	- odległość punktu przyłożenia obciążenia od punktu podparcia,
b	- grubość tarczy,
d	- wysokość użyteczna przekroju,
f_c	- wytrzymałość betonu w stanie jednoosiowego ściskania,
$f_{cm,cube}$	- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie określana na próbkach kostkowych,
$f_{cm,cyl}$	- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie określana na próbkach walcowych,
f_{ctm}	- wytrzymałość betonu na rozciąganie,
f_{yk}	- granica plastyczności stali,
l_1	- wysięg tarczy wspornikowej (mierzony od osi podparcia do osi obciążenia),



- l_2 - rozpiętość tarczy podłużnej,
- l_3 - rozpiętość tarczy poprzecznej,
- u_1 - przemieszczenie tarczy wspornikowej na krawędzi zewnętrznej,
- u_2 - przemieszczenie tarczy podłużnej w środku rozpiętości,
- u_3 - przemieszczenie tarczy poprzecznej w środku rozpiętości.

Małe litery greckie

- α - kąt nachylenia zbrojenia ukośnego do poziomu,
- β, ν - współczynnik zmiękczenia betonu
- ε_1 - główne odkształcenia rozciągające,
- ε_2 - główne odkształcenia ściskające,
- ε_c - odkształcenie jednostkowe betonu ściskanego,
- ε_{c1} - odkształcenie betonu przy ściskaniu wywołane maksymalnym naprężeniem f_c
- ε_{ct} - odkształcenie jednostkowe betonu rozciąganego,
- ε_{cu} - odkształcenie betonu przy zniszczeniu,
- ε_s - odkształcenie jednostkowe stali zbrojeniowej,
- ϕ - średnica pręta zbrojenia,
- θ - kąt nachylenia ściskanych krzyżulców betonowych do poziomu,
- σ_c - naprężenie ściskające w betonie,
- σ_{ct} - naprężenie rozciągające w betonie,
- σ_s - naprężenie w stali zbrojeniowej,

1 CEL, ZAKRES I TEZA PRACY

Praca ma charakter eksperymentalno-teoretyczny i dotyczy zagadnień związanych z żelbetowymi tarczami pracującymi w przestrzennym układzie konstrukcji budynków.

Celem niniejszej dysertacji jest *określenie wpływu głównych parametrów jakimi są sposób ukształtowania zbrojenia i smukłość ścinania na zarysowanie i nośność żelbetowego przestrzennego węzła tarczowego ze wspornikiem*.

Układy przecinających się wzajemnie ze sobą tarcz stanowią jedno z głównych elementów nośnych budynków wysokich o złożonej konstrukcji. W takich elementach istotne jest odpowiednie kształtowanie zbrojenia w celu efektywnego wykorzystania stali zbrojeniowej do przejścia sił rozciągających oraz minimalizacji szerokości zarysowania. Dokonany w pracy przegląd literatury pozwolił autorce stwierdzić, iż wciąż brakuje badań jak i zaleceń projektowych do wymiarowania (a zwłaszcza konstruowania zbrojenia) żelbetowych tarcz wspornikowych czy też tarcz z przewieszzeniami. Dotychczasowe badania eksperymentalne prowadzone były przede wszystkim na tarczach płaskich swobodnie podpartych, jedno lub dwuprzęsłowych z obciążeniem działającym na krawędzi górnej bądź dolnej. Jedyne wytyczne dotyczące projektowania tych elementów konstrukcyjnych pochodzą z lat 60-tych ubiegłego wieku [1], [2] i oparte są na badaniach prowadzonych przez *Leonhardta* w Stuttgarcie [3]

Na podstawie aktualnego stanu wiedzy, opracowano program eksperymentalnych badań czterech przestrzennych układów tarcz żelbetowych w skali zbliżonej do naturalnej (w sumie 12 zróżnicowanych tarcz płaskich). Kluczowym elementem konstrukcyjnym przestrzennego węzła tarcz, który stanowi podstawę rozważań niniejszej dysertacji jest tarcza wspornikowa. Dla tarczy tej przyjęto dotychczas nieanalizowane obciążenie, rozłożone wzdłuż całej wysokości elementu, na krawędzi zewnętrznej. W tym celu zaprojektowano stanowisko badawcze z autorskim rozwiązaniem przekazania obciążenia na przestrzenny węzeł, uwzględniające rozkład sił działający w sposób pośredni i bezpośredni na poszczególne elementy tarczowe.

Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań pozwoliły na dokonanie analizy w zakresie wpływu rozkładu obciążenia działającego na wysokości tarcz, wywołującego stan naprężeń i zarysowań różny od najczęściej badanych tarcz płaskich. Zrealizowane badania mają charakter naukowy, o dużym znaczeniu poznawczym, jak również praktycznym. Nie mają charakteru statystycznego, lecz jakościowy – dotyczą zarysowania, odkształceń stali i betonu oraz nośności.

Głównymi parametrami zmiennymi przyjętymi w programie badawczym była:

- smukłość tarczy wspornikowej l/H wynosząca 0.5 i 0.3, mierzona jako stosunek długości wspornika l (mierzona od siły obciążającej do osi podpory) do jej wysokości H ;
- sposób ukształtowania zbrojenia węzłów tarczowych (zbrojenie ortogonalne lub ortogonalne z prętami ukośnymi).

Zbrojenie ukośne, odgięte zgodnie z przebiegiem trajektorii naprężeń, przede wszystkim skutecznie ogranicza szerokość rys [3], [4]. Jednocześnie jest dość kłopotliwe w wykonawstwie i powoduje trudności z zakotwieniem, tym większe im mniejszy jest wysięg elementu (krótki wspornik tarczy, wspornik belki itp.). Poprawne zakotwienie tych prętów jest podstawą ich skuteczności [5]. Efektywność zbrojenia ortogonalnego, łatwiejszego w montażu, w odniesieniu do wsporników tarczy nie jest rozpoznana. W przypadku bardzo krótkich wsporników słupa obciążonych na górnej krawędzi badania *Robinsona* [1], [2] wykazały znaczący udział zbrojenia poziomego rozłożonego na wysokości wspornika w nośności. Jednakże w przypadku obciążenia rozłożonego na wysokości wspornika *Niedenhoff* [6] zalecał pręty ukośne. W podjętych badaniach celowe zatem było sprawdzenie efektywności bardziej uproszczonej formy konstruowania zbrojenia we wspornikach tarczowych jaką jest siatka ortogonalna.

Postawiona teza niniejszej rozprawy doktorskiej brzmi następująco: *smukłość ścinania i kształt zbrojenia wpływają na zarysowanie i nośność żelbetowego węzła tarczowego ze wspornikiem*.

Rozważane zagadnienia od strony teoretycznej dotyczą morfologii rys, wyteżenia i nośności granicznej tzw. *obszarów typu D*, w zakresie ścinania oraz przecinania. W analizie teoretycznej, opierając się na wynikach uzyskanych z własnych badań, zweryfikowano zalecenia literaturowe w odniesieniu do wymiarowania żelbetowych tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości [1], [2] jak i zaleceń normowych dotyczących projektowania wsporników słupa z obciążeniem pośrednim [N7]. W analizie stanu granicznego nośności tarczy wspornikowej zaproponowano własne *modele obliczeniowe ST (Strut-and-Tie)* uwzględniające górne zbrojenie poziome, jak również strzemiona poziome rozłożone na wysokości, oraz redukcję wytrzymałości betonu z uwagi na zarysowanie.

Zawartość pracy:

Niniejsza praca składa się z sześciu zasadniczych rozdziałów. W *pierwszym* autorka dokonała uzasadnienia podjęcia tematu, sformułowania celu i tezy pracy, a także omówiony został ogólny zakres niniejszej dysertacji. W *rozdziale drugim* omówiono definicję tarczy na podstawie normowych wytycznych, a także odniesiono się do analizy naprężeń w *fazie I* i *fazie II* belek-ścian oraz podano przykładowe zastosowania tarcz, w tym także tarcz wspornikowych. W *trzecim rozdziale* przedstawiono aktualny stan wiedzy w zakresie badań eksperymentalnych wykonanych na tarczach przestrzennych i wspornikowych oraz wybranych tarczach jednoprzęsłowych i ciągłych, jak również omówiono zalecenia normowe dotyczące wymiarowania tarcz, a także wsporników słupa obciążonych pośrednio. W *rozdziale czwartym* autorka przedstawiła wyniki i analizę własnych badań eksperymentalnych dotyczących żelbetowych węzłów tarczowych, w tym tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości i tarcz jednoprzęsłowych z zawieszeniem. *Rozdział piąty* dotyczy analizy nośności granicznej w oparciu o metodę kratownicową dla tarcz wspornikowych z odniesieniem się do wytycznych literaturowych i normowych oraz propozycją własnych modeli obliczeniowych uwzględniających wyteżenie stali i betonu, które mogą stanowić podstawę do sformułowania wytycznych w zakresie projektowania tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości. W ostatnim *szóstym rozdziale* podsumowano wnioski końcowe wyciągnięte z przeprowadzonych badań i analiz oraz przedstawiono kierunki dalszych badań i analiz.

2 WPROWADZENIE

Belki-ściany zwane tarczami żelbetowymi są to elementy cienkościenne, obciążone w ich płaszczyźnie środkowej, charakteryzujące się płaskim stanem naprężenia oraz nieliniowym rozkładem naprężeń. Tarcze, definiowane również jako płaskie dźwigary powierzchniowe, cechują się stosunkowo niewielką grubością w porównaniu do pozostałych wymiarów – wysokości H i rozpiętości l . W związku z tym, elementy te rozważane są w płaskim stanie naprężenia (PSN) przy założeniu, że naprężenia normalne σ_x , σ_y , oraz naprężenia styczne τ_{xy} są stałe na grubości tarczy, natomiast naprężenia prostopadłe do powierzchni tarczy, σ_z oraz τ_{xz} i τ_{yz} przyjmuje się jako wielkości zerowe.

Definicja belki-ściany, zgodnie z normowymi wytycznymi jest różna w zakresie spełnienia wymaganych granicznych warunków. Jednak najczęściej o klasyfikacji belek jako belek-ścian (tarcz) decydują wymiary geometryczne. Polska norma *PN-B-03264 2002* [N4] wyznaczała kryterium belek w zależności od stosunku wysokości H do rozpiętości l , dla którego elementy spełniające warunek $H/l \geq 0.25$ (czyli $l/H \leq 4$) wliczają się do belek-ścian (belek wysokich), a ich wymiarowanie nie odbywa się na podstawie teorii belkowej lecz na podstawie teorii tarcz. Podobny warunek możemy również odnaleźć w aktualnej normie amerykańskiej *ACI 318-19* [N3], która w p. 9.9.1.1 stwierdza, że belki-ściany (ang. *deep beams*) to elementy, których rozpiętość nie przekracza 4-krotnej wysokości ($l/H < 4$) lub jeśli działające na nie obciążenie skupione przyłożone jest w odległości $2H$ od powierzchni podparcia. Natomiast według *PN-EN 1992-1-1:2008* [N5] w p. 5.3.1 (3) widnieje zapis charakteryzujący belki ściany: „Jeżeli rozpiętość elementu jest nie mniejsza niż trzykrotna wysokość przekroju, to element uważa się za belkę. W innych przypadkach element należy uważać za belkę-ścianę” ($l/H \leq 3$). Z kolei Leonhardt w swojej pracy [3] rozróżniał podział belek żelbetowych spełniających kryteria belek-ścian w zależności od schematu statycznego: dla tarcz jednoprzęsłowych $l/H < 2.0$, dla tarcz dwuprzęsłowych lub skrajnych przęseł tarcz ciągłych $l/H < 2.5$, dla środkowych przęseł tarcz ciągłych $l/H < 3.0$, a dla tarcz wspornikowych $l/H \leq 1.0$.

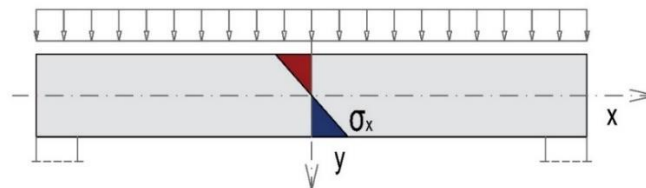
W przeciwieństwie do zwykłych belek, tarcze charakteryzują się nieliniowym rozkładem naprężeń, czyli należą do tzw. *obszarów typu D* (ang. *D-regions*). Są to obszary charakteryzujące się nieciągłością (ang. *discontinuity*) kształtu lub oddziaływania, w których do wyznaczenia wartości naprężeń i odkształceń nie można stosować metod teorii układów prętowych, opierających się na hipotezie płaskich przekrojów *Bernoulliego*. Stan naprężeń jest bardziej zróżnicowany od panującego w belkach zwykłych. Zmianie ulega przebieg naprężeń normalnych σ_x , jak również zdecydowanie większe są naprężenia normalne σ_y oraz styczne τ_{xy} (zwane naprężeniami ścinającymi). Zmiany te wpływają na przebieg trajektorii naprężeń, a w związku z tym, również na ostateczny obraz zarysowania.

Na rys. 2.1 przedstawiono przykładowe porównanie rozkładu naprężeń σ_x dla belki zwykłej (wykres liniowy) i wysokiej belki-ściany (wykres krzywoliniowy) przy założeniu swobodnego podparcia i równomiernie rozłożonego obciążenia na górnej krawędzi.

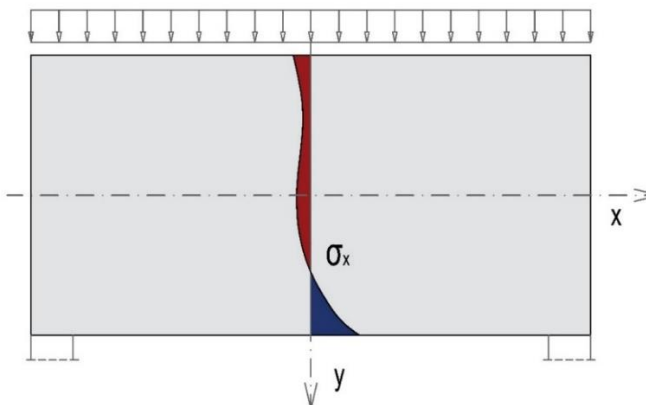
Rozkład naprężeń w tarczach w *fazie I* zależy przede wszystkim od:

- schematu statycznego (tarcze jednoprzęsłowe, ciągłe, wspornikowe) z uwzględnieniem warunków brzegowych (tarcze swobodnie podparte, zamocowane w słupach),
- sposobu obciążenia, tj.:
 - miejsca przyłożenia obciążenia – na krawędzi górnej, dolnej i po wysokości,
 - rodzaju obciążenia – równomiernie rozłożone, skupione,
- stosunku wymiarów tarczy (l/H),
- względnej szerokości podparcia (c/l ; c - szerokość podpory).

a)



b)



Rys. 2.1 Przykładowy rozkład naprężeń σ_x w: a) belce, b) tarczy (belce-ścianie).

W przypadku tarcz wspornikowych, jak wynika z analiz w *fazie sprężystej* [7], znaczący wpływ na rozkład naprężeń σ_x wywiera zmiana proporcji l/H . Natomiast sposób przyłożenia obciążenia najbardziej wpływa na zmianę naprężeń normalnych σ_x w przypadku krótkich tarcz wspornikowych.

Przy projektowaniu belek-ścian, wyznaczając naprężenia i siły wewnętrzne należy uwzględnić nie tylko *fazę I* (przed zarysowaniem) i związane z nią zagadnienia teorii sprężystości, ale również, a nawet przede wszystkim *fazę II*, czyli zachowanie się tarcz po zarysowaniu w stanie granicznym wyężenia i nośności. Dlatego, ważne jest gruntowne rozpoznanie redystrybucji sił wewnętrznych z uwagi na zarysowanie, które szczególnie w tarczach wspornikowych pojawia się stosunkowo wcześnie, jeszcze przed działaniem obciążeń użytkowych. Kluczem poznania charakteru zarysowania się i niszczenia tarcz są badania wykonane na drodze eksperymentalnej. Wyniki badań doświadczalnych mogą istotnie wpływać na zasady konstruowania tarcz.

W zarysowanych tarczach, istotną rolę zaczyna odgrywać również zbrojenie. Znaczenie przybiera nie tylko ilość, ale również sposób ukształtowania i zakotwienia przyjętego zbrojenia, które decydują o przebiegu naprężeń [3], [4]. Projektowane może być zbrojenie trajektoriale, ortogonalne lub mieszane (ortogonalne z dodatkowymi ukośnymi prętami przejmującymi główne naprężenia rozciągające). Jak wiadomo, najbardziej efektywnym ułożeniem zbrojenia w tarczach, pracujących w płaskim stanie naprężenia, jest rozmieszczenie prętów w sposób trajektorialny – zgodnie z kierunkami głównych naprężeń rozciągających. Z uwagi na wiążącą się z tym sporą pracochłonność, w praktyce



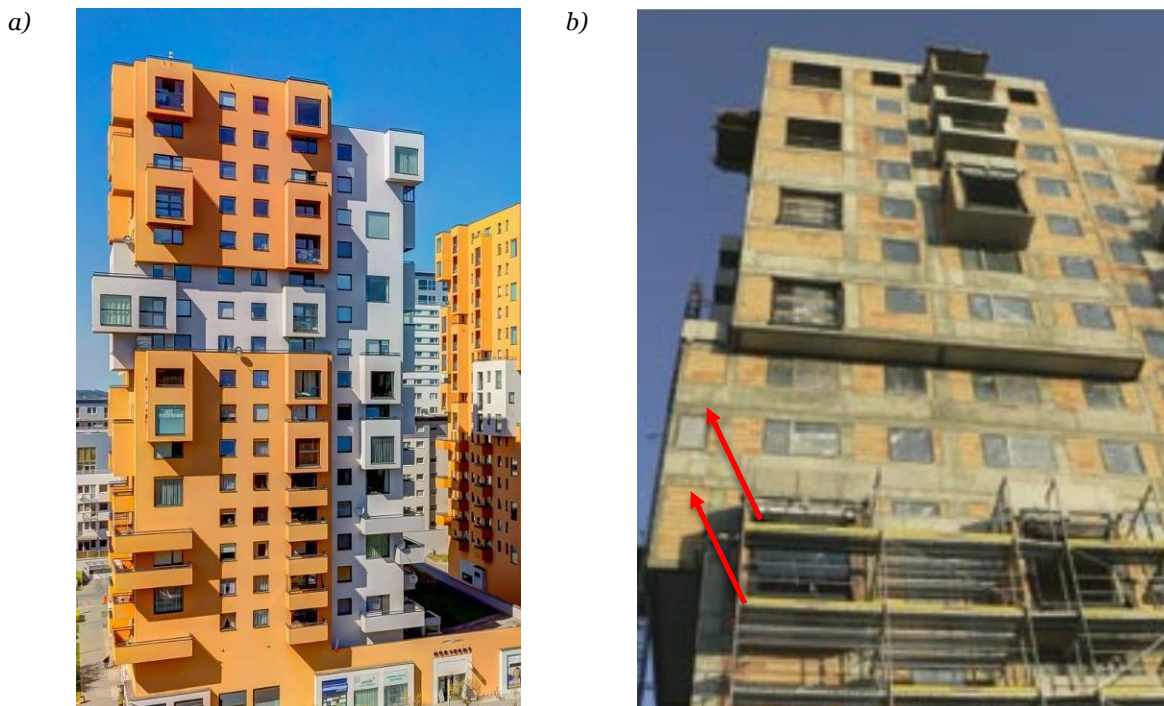
przyjęło się stosować najczęściej zbrojenie ortogonalne, łatwiejsze w wykonawstwie. Uproszczenie to powoduje jednak zmniejszoną skuteczność siatek ortogonalnych odchylonych od trajektorii głównych naprężeń rozciągających, co w ostateczności skutkuje zwiększeniem stopnia zbrojenia na kierunku x i y . Racjonalnym rozwiązaniem w tej sytuacji może okazać się przyjęcia zbrojenia tzw. mieszanego, w którym oprócz zbrojenia ortogonalnego zastosowano również pręty ukośne. Niezależnie od przyjętego sposobu zbrojenia, projektant powinien mieć na uwadze, iż odpowiednie ukształtowanie zbrojenia jest istotne dla prawidłowej pracy konstrukcji, a także jej bezpieczeństwa i trwałości.

Przykłady zastosowania

Elementy tarczowe znajdują zastosowanie przy budowie licznych konstrukcji, takich jak: silosy, zbiorniki, przykrycia i usztywnienia hal przemysłowych, a także występują w budynkach wysokich i coraz szerzej stosowane są w budownictwie mieszkaniowym. W tych ostatnich konstrukcjach pełnią najczęściej rolę tarcz stropowych i stropodachowych lub pracują jako elementy wsporcze w dolnych kondygnacjach w celu przeniesienia znacznych sił pionowych na małe powierzchnie. To pozwala projektantom na uzyskanie sporych wymiarów przestrzeni (kondygnacji przyziemnych), które w dzisiejszych czasach bardzo często pożądane są przez inwestorów.

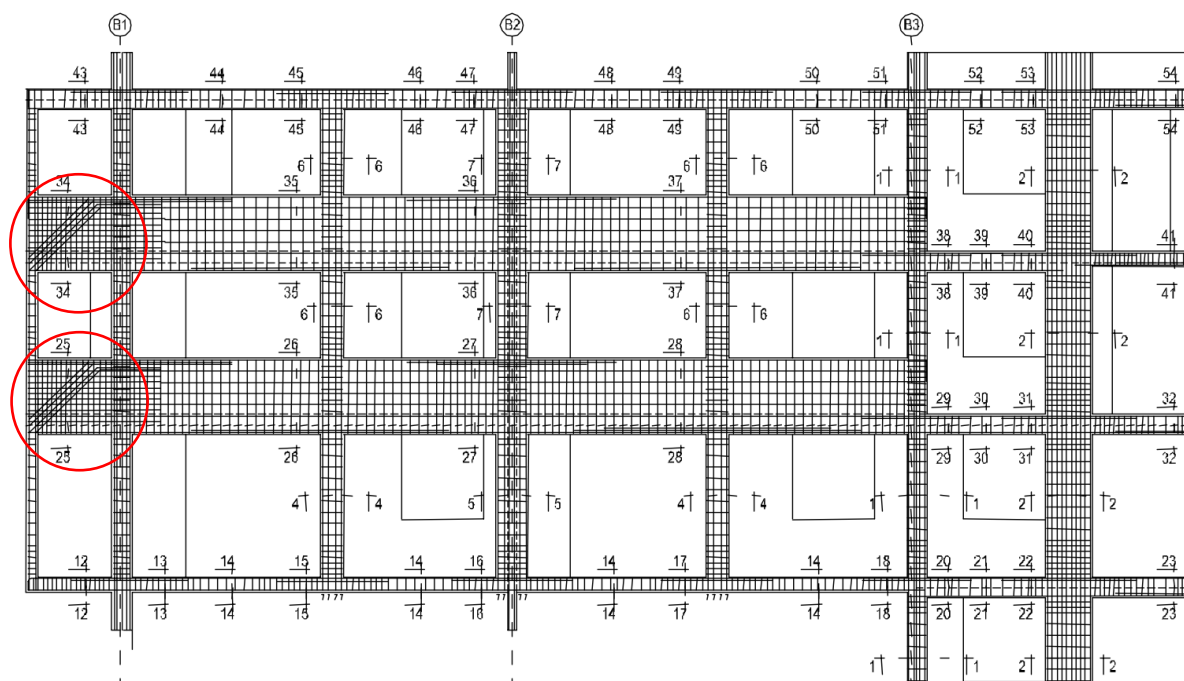
Z uwagi na coraz bardziej urozmaiconą architekturę budynków mieszkalnych czy też użyteczności publicznej, żelbetowe tarcze znalazły również zastosowanie przy tworzeniu oryginalnych, a zarazem skomplikowanych przestrzennych brył budynków ze zróżnicowaną fasadą. W takich przypadkach belki-ściany mogą tworzyć przestrzenne węzły tarczowe wraz z elementami tarcz wspornikowych, do których zawieszone są prostopadle inne elementy konstrukcyjne. Obciążenie działające na poszczególne tarcze, w tym także wspornikowe, wywołuje stan naprężeń i zarysowań różny od najczęściej badanych tarcz płaskich. W tego typu konstrukcjach, ważne jest odpowiednie kształtowanie zbrojenia tarcz w celu optymalnego wykorzystania stali zbrojeniowej do przejścia sił rozciągających oraz minimalizacji szerokości zarysowania.

Przykładem realizacji obiektów, którym towarzyszy przestrzenna i skomplikowana struktura szkieletu żelbetowego są budynki mieszkalne *Horyzont*, mieszczące się na Przymorzu w Gdańsku (rys. 2.2). Ciekawą formę architektoniczną brył budynków stanowią zarówno pojedyncze, jak i nawet kilkukondygnacyjne wykusze wsparte na wspornikach tarczowych, stwarzające tym samym spore wyzwanie zarówno pod względem konstrukcyjnym jak i technologicznym. Głównym elementem nośnym tej konstrukcji są układy żelbetowych ram, które tworzą słupy i tarcze z przewieszonymi tarczami wspornikowymi, wymagające odpowiednio ukształtowanego zbrojenia na przecinanie [8].



Rys. 2.2 Budynki mieszkalne „Horyzont” w Gdańsku [8]: a) widok ogólny na elewację, b) widok wykuszy kilkukondygnacyjnych wspartych na żelbetowych ramach z tarczowymi wspornikami (oznaczenie czerwonymi strzałkami).

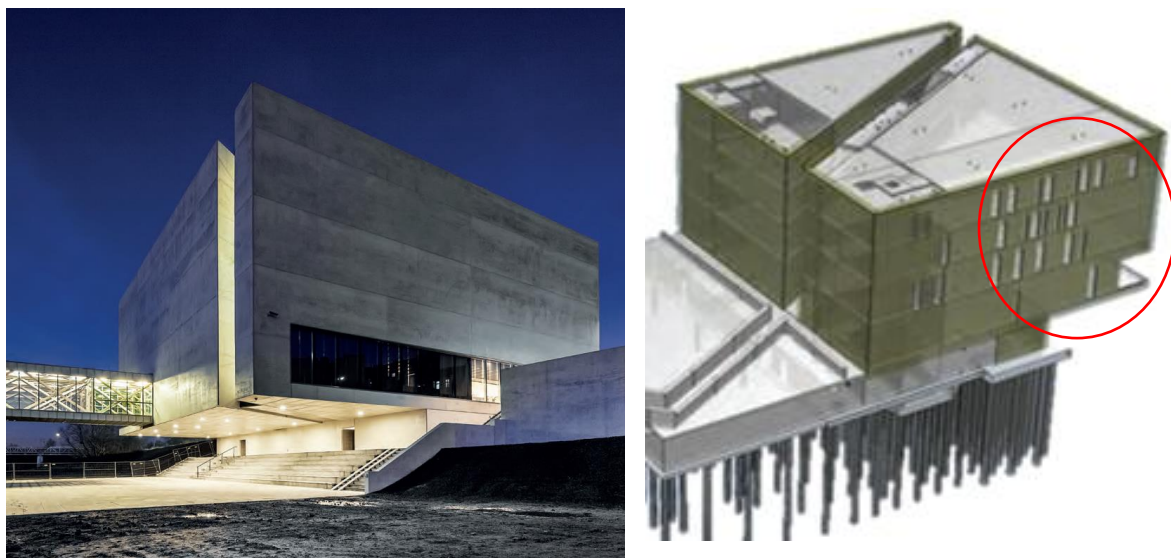
W celu odpowiedniego przeniesienia sił poprzecznych, jak i zredukowania nadmiernego wyężenia betonu, mogącego spowodować lokalne niszczenie struktury betonu, w tarczach wspornikowych żelbetowych ram zastosowano dodatkowe pręty ukośne $\varnothing 12$ w postaci pętli (rys. 2.3)



Rys. 2.3 Zbrojenie żelbetowej ramy z tarczami wspornikowymi, do której został podwieszony 3-kondygnacyjny wykusz budynku Horyzont w Gdańsku [8].

Innym ciekawym przykładem z realizacji budynku z zastosowaniem żelbetowych tarcz przy wyszukanej formie architektonicznej i konstrukcyjnej jest Budynek Interaktywnego Centrum Historii Ostrowa Tumskiego ICHOT „Brama Poznania” [9], [10]. Główny układ konstrukcyjny stanowi pięć

żelbetowych tarcz ze wspornikami wraz z szóstą poprzeczną tarczą pełniącą jednocześnie rolę elewacji od strony rzeki. Żelbetowe belki-ściany wraz ze stropami tworzą sztywny przestrzenny układ konstrukcyjny. Na rysunku poniżej (rys. 2.4) przedstawiono widok istniejącej awangardowej bryły budynku oraz model obliczeniowy żelbetowej konstrukcji.



Rys. 2.4 Budynek Interaktywnego Centrum Historii Ostrowa Tumskiego ICHOT „Brama Poznania” [9]:
a) widok na elewację, b) model obliczeniowy.

Jednym z elementów, które stanowiło spore wyzwanie dla projektanta była wspornikowa tarcza z wysięgiem o długości 12.5 m. W miejscu podparcia części wspornikowej, w najbardziej wyężonych tarczach, z uwagi na występowania dużych sił ściskających konieczne było zastosowanie dodatkowego zbrojenia ściskanego.

3 STAN WIEDZY

3.1 Badania eksperymentalne obce

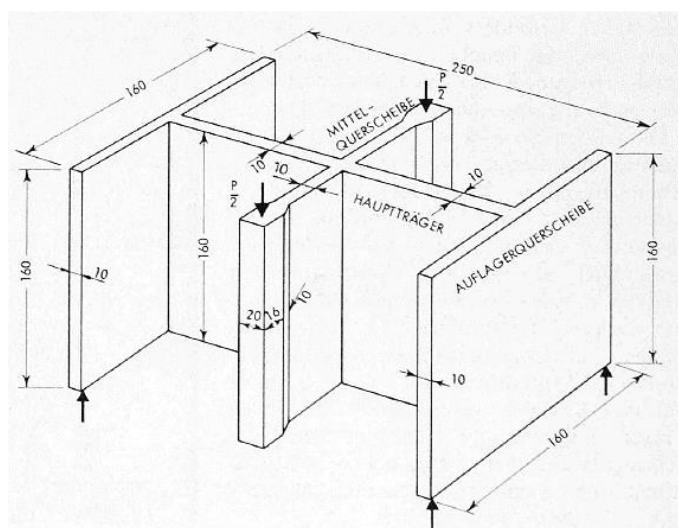
Rozdział ten poświęcony jest badaniom eksperymentalnym obcym żelbetowych belek-ścian wykonanym na przestrzeni lat. Pierwsze zostały omówione badania tarcz wspornikowych, jako najbardziej interesujące z uwagi na podjętą tematykę dysertacji. W kolejnym podrozdziale ujęto badania tarcz swobodnie podpartych oraz ciągłych, które w zdecydowanej większości uwzględniają i analizują wpływ smukłości ścinania, jak i ukształtowanie zbrojenia na zarysowanie i nośność żelbetowych tarcz. To podstawowe parametry zmienne przyjęte również we własnym programie badawczym. Wszystkie prace zostały uszeregowane w kolejności chronologicznej.

Autorka zdaje sobie sprawę, iż wybrane pozycje literaturowe, w przytoczonym niżej podziale, nie wyczerpują ściśle całej wiedzy w zakresie zachowania się żelbetowych belek-ścian, jednakże przedstawiają zarys badanych problemów od lat 60-tych XX w. do początkowych lat XXI w. Jakkolwiek z zakresu tarcz wspornikowych, innych badań eksperymentalnych od zaprezentowanych w tej pracy, nie znaleziono.

3.1.1 Tarcze wspornikowe

Badania *Leonhardta i Walther'a*

Pionierskimi badaniami przestrzennego układu tarczowego były badania *Leonhardt'a* i *Walther'a* [3] przeprowadzone w *Stuttgarcie*. Geometrię badanych tarcz wraz ze schematem podparcia i obciążenia przedstawiono na rys. 3.1.

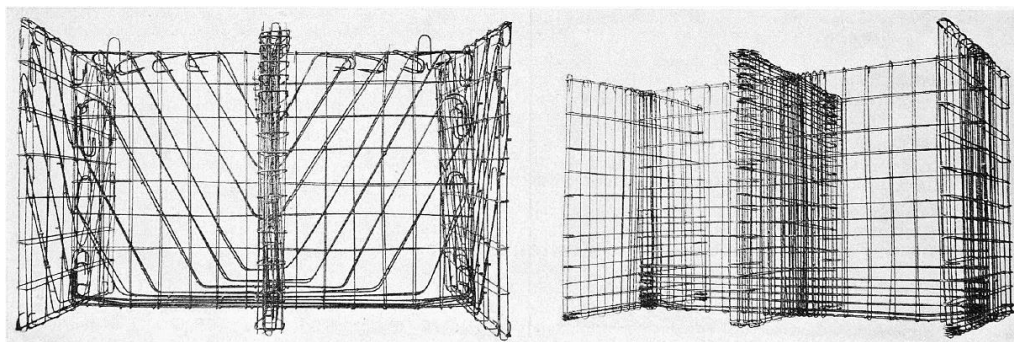


Rys. 3.1 Geometria oraz schemat podparcia i obciążenia przestrzennego układu tarcz (IWT 1 i IWT 2) [3].

Główny element badawczy stanowiła tarcza jednoprzęsłowa podparta i obciążona w sposób pośredni. Pośrednie podparcie zostało zaprojektowane w formie jednoprzęsłowych tarcz poprzecznych

swobodnie podpartych. Z kolei pośrednie obciążenie stanowiła tarcza poprzeczna umiejscowiona w środkowej części rozpiętości tarczy głównej. Poprzeczna tarcza obciążająca została zaprojektowana w formie obustronnych tarcz wspornikowych, na które zadawane było obciążenie w postaci sił skupionych działających na górną krawędź tarcz. Grubość wszystkich tarcz wynosiła 10 cm, natomiast tarczę wspornikową pogrubiono do 20 cm przy krawędzi zewnętrznej.

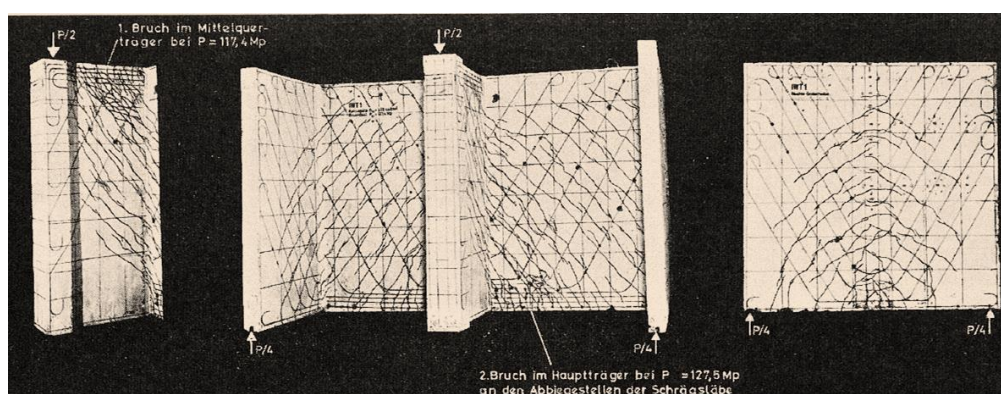
Parametrem zmiennym był sposób ukształtowania zbrojenia. Dla tarczy IWT 1 założono 50% odgiętego zbrojenia głównego pod kątem 60° , a dodatkowe ukośne pręty zostały umieszczone na górze w celu pośredniego wprowadzenia obciążenia. Dla tarczy IWT 2 zbrojenie przyjęto w formie siatki ortogonalnej (rys. 3.2).



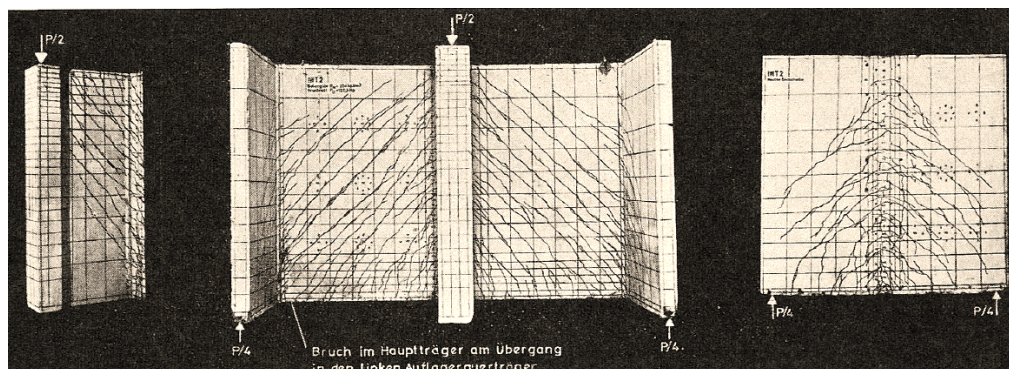
Rys. 3.2 Schemat zbrojenia tarczy IWT 1 i IWT 2 [3].

Rozmieszczenie tarcz, jak i sposób przyłożenia obciążenia pozwoliły na analizę zarysowania i nośności trzech typów tarcz: swobodnie podpartych pod obciążeniem pośrednim, podpartych i obciążonych w sposób pośredni, jak i zachowanie się tarcz wspornikowych pod obciążeniem skupionym. Porównanie morfologii rys dla poszczególnych tarcz z różnym rodzajem zbrojenia pod obciążeniem niszczącym przedstawia rys. 3.3 i 3.4.

Wyczerpanie nośności obu badanych układów (IWT 1 i IWT 2) nastąpiło z uwagi na zmiążdżenie betonowych krzyżulców. Odnotowano również, że sposób ukształtowania zbrojenia nie miał istotnego wpływu na ugięcie się badanych tarcz.



Rys. 3.3 Morfologia rys tarczy IWT 1 [3].



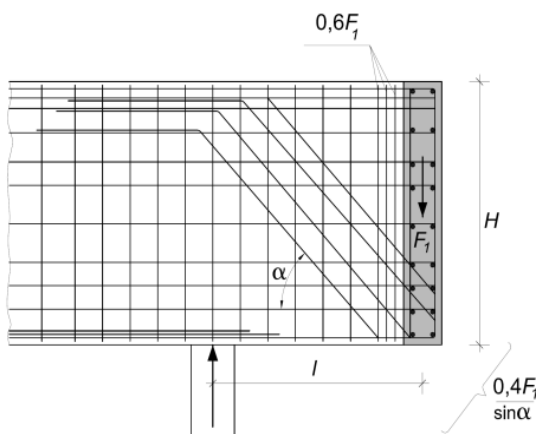
Rys. 3.4 Morfologia rys tarczy IWT 2 [3].

Szerokość zarysowania w tarczy głównej z dodatkowymi prętami ukośnymi (IWT 1) była zdecydowanie niższa od tarczy zbrojonej w sposób ortogonalny (IWT 2). Tę samą zależność odnotowano dla tarczy poprzecznej stanowiącej podparcie (nośnej). Natomiast sytuację odwrotną odnotowano dla tarczy wspornikowej (obciążającej), gdzie szerokość rys była mniejsza w przypadku zbrojenia ortogonalnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, iż pomimo nieco wyższych wartości obciążenia rysującego dla tarczy IWT 1 (z prętami ukośnymi), nośność obu tarcz w przybliżeniu była taka sama. Na tej podstawie *Leonhardt i Walther* [3] doszli do wniosku, iż zbrojenie ortogonalne, prostsze i tańsze w wykonawstwie, jest dobrą alternatywą dla zbrojenia ukośnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań, *Leonhardt i Mönnig* [1] sformułowali zalecenia projektowe dotyczące projektowania żelbetowych tarcz swobodnie podpartych i wspornikowych obciążonych w sposób pośredni – po wysokości.

Zalecenia w odniesieniu do wsporników tarczowych obciążonych równomiernie wzdłuż wysokości opierają się na założeniu, że pręty pionowe w postaci strzemion skoncentrowane przy krawędzi wspornika należy wymiarować na siłę $0.6F_1$, natomiast pręty ukośne powinny być zwymiarowane na siłę $0.4F_1 / \sin \alpha$, jak przedstawiono na rysunku 3.5 oraz we wzorach .



Rys. 3.5 Układ zbrojenia w tarczy wspornikowej obciążonej po wysokości zgodnie z zaleceniami Leonhardta [1].

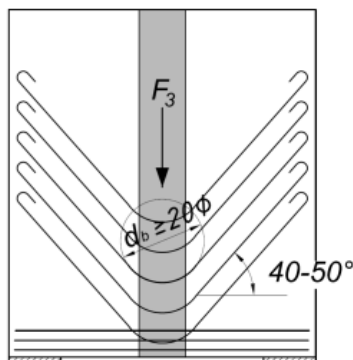
pręty pionowe:

$$A_{sw1} = 0.6 \cdot \frac{F_1}{f_{ywd}} \quad (3.1)$$

pręty ukośne:

$$A_{sw2} = 0.4 \cdot \frac{F_1}{\sin \alpha \cdot f_{ywd}} \quad (3.2)$$

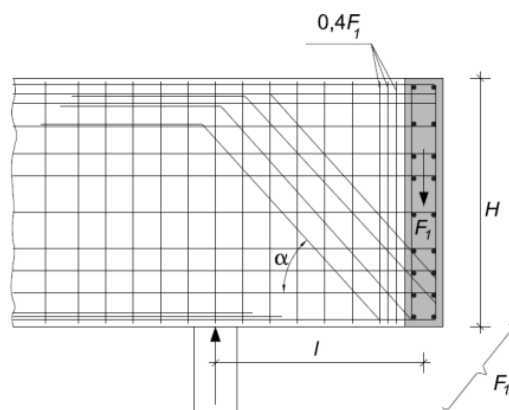
W przypadku zbrojenia tarczy swobodnie podpartej, na której zawieszona jest wzdłuż całej wysokości inna tarcza, *Leonhardt* [1] zaleca umieszczenie dodatkowego zbrojenia w postaci strzemion lub też zbrojenia w postaci strzemion pionowych i prętów odgiętych o średnicy gięcia równej 20ϕ (rys. 3.6).



Rys. 3.6 Układ zbrojenia w tarczy poprzecznej w odniesieniu do prętów odgiętych [1].

Opierając się na przeprowadzonych przez *Leonhardt'a* badaniach doświadczalnych i podanych przez niego wytycznych projektowych, *Schröder* [2] kilkanaście lat później, sformułował własne zalecenia w odniesieniu do tarcz wspornikowych i tarcz z przewieszzeniami.

W przypadku tarczy wspornikowej o smukłości ścinania równej 1.0 *Schröder* zaproponował, aby pręty odgięte pod kątem 45° zwymiarowane były na całkowitą siłę działającą na wspornik F_1 , a dodatkowo oprócz nich umieszczone zostały strzemiona pionowe zwymiarowane na siłę $0.4F_1$. Pręty pionowe ukształtowane jako strzemiona zamknięte na całej wysokości tarczy, należy rozmieszczać przy tarczy poprzecznej na odcinku $2t$ od jej krawędzi, gdzie t jest grubością tarczy, jak pokazano na rys. 3.7. Zalecenia te nie określają zależności kąta nachylenia prętów ukośnych w odniesieniu do ich wymiarowania.



Rys. 3.7 Układ zbrojenia w tarczy wspornikowej obciążonej po wysokości zgodnie z zaleceniami *Schrödera* [2].

pręty pionowe:

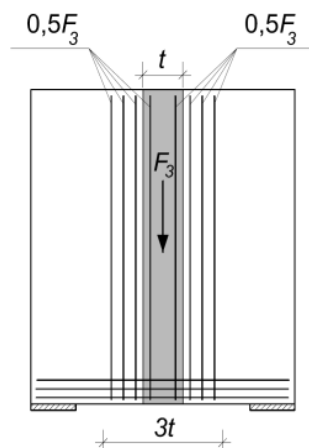
$$A_{sw1} = 0.4 \cdot \frac{F_1}{f_{ywd}} \quad (3.3)$$

pręty ukośne:

$$A_{sw2} = \frac{F_1}{f_{ywd}} \quad (3.4)$$

W tarczy swobodnie podpartej z obciążeniem pośrednim, *Schröder* sugeruje, że wystarczające jest zastosowanie minimalnego zbrojenia ortogonalnego, w przypadku zastosowania dodatkowego

zbrojenia podwieszającego w postaci pionowych strzemion zamkniętych przy połączeniu tarcz. Pręty te przenoszące całą siłę F powinny być usytuowane na szerokości $3t$ (t – grubość tarczy prostopadłej, przekazującej obciążenie) w pobliżu połączenia (rys. 3.8). Odległość między strzemioma podwieszającymi, jak również prętów tworzących ortogonalną siatkę nie powinien przekraczać 150 mm.

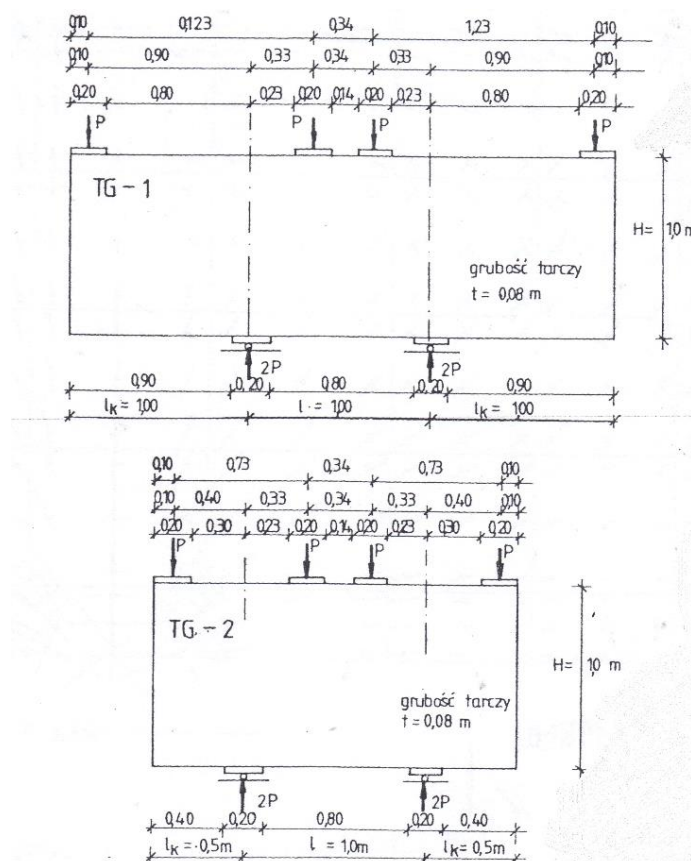


Rys. 3.8 Układ zbrojenia w tarczy poprzecznej w odniesieniu do strzemion pionowych [2].

Badania Ułańskiej

Badania eksperymentalne przeprowadzone na Politechnice Łódzkiej [11], [12], [13] obejmowały łącznie czternaście tarcz jednoprzęsłowych z dwustronnymi wspornikami, w tym osiem tarcz płaskich i sześć tarcz ze słupami na krawędzi zewnętrznej przebiegających na całej wysokości wspornika.

Badania tarcz płaskich ze wspornikami [11], [12]



Rys. 3.9 Geometria i schemat statyczny badanych tarcz TG-1 i TG-2 [11].



Parametrem zmiennym był sposób ukształtowania zbrojenia oraz smukłość tarczy wspornikowej l_k/H , gdzie l_k – wysięg wspornika, H – wysokość tarczy. Tarcze miały wysokość 100 cm i grubość 8 cm. W pierwszej serii (TG-1) zbadano cztery tarcze ze wspornikami kwadratowymi ($l_k/H=1.0$), natomiast w drugiej serii (TG-2) cztery tarcze ze wspornikami o stosunku $l_k/H=0.5$.

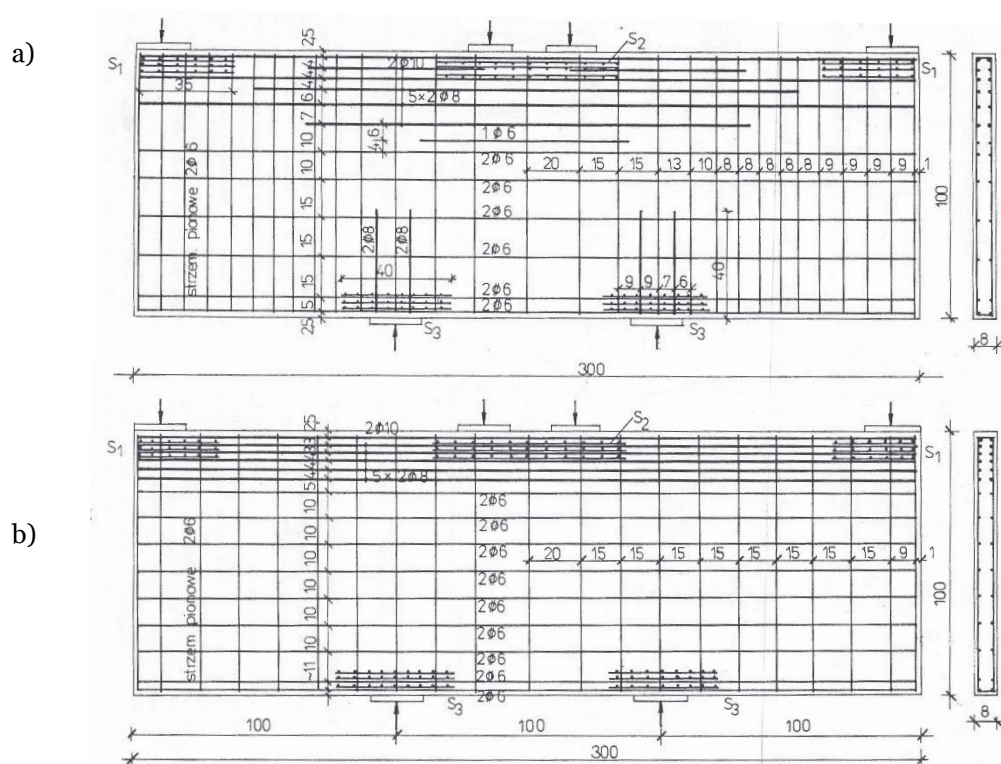
Elementy badawcze obciążane były czterema siłami skupionymi na krawędzi górnej – dwie siły w środku przęsła oraz dwie na krawędziach tarcz wspornikowych. Geometrię i schemat obciążenia badanych tarcz przedstawiono na rys. 3.9.

Dla każdej serii badawczej zaprojektowano zbrojenie ortogonalne i trajektorialne w dwóch wersjach: zgodnie z naprężeniami według teorii sprężystości oraz zgodnie ze stanem naprężenia po zarysowaniu. Przyjęte oznaczenie badanych tarcz przedstawiono w tabeli 3.1.

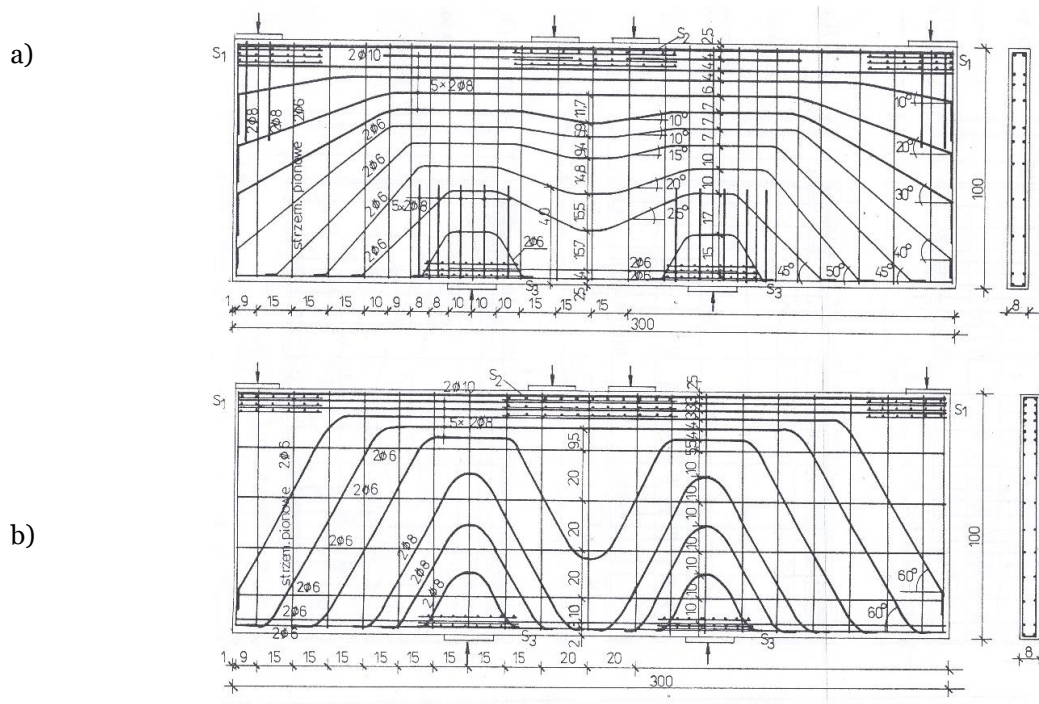
Tabela 3.1 Oznaczenie badanych tarcz [11].

Tarcze płaskie jednoprzęsłowe ze wspornikami		Seria 1	Seria 2
Wsporniki o stosunku l_k/H		1.0	0.5
Zbrojenie ortogonalne	zgodne ze stanem naprężeń wg teorii sprężystości	TG-1/Os	TG-2/Os
	zgodne ze stanem naprężeń po zarysowaniu	TG-1/Of	TG-2/Of
Zbrojenie trajektorialne	zgodne ze stanem naprężeń wg teorii sprężystości	TG-1/ts	TG-2/ts
	zgodne ze stanem naprężeń po zarysowaniu	TG-1/tf	TG-2/tf

Zbrojenie ortogonalne przyjęto w taki sposób aby pręty poziome przejmowały naprężenia rozciągające σ_x , a pręty pionowe naprężenia tnące τ_{xy} .

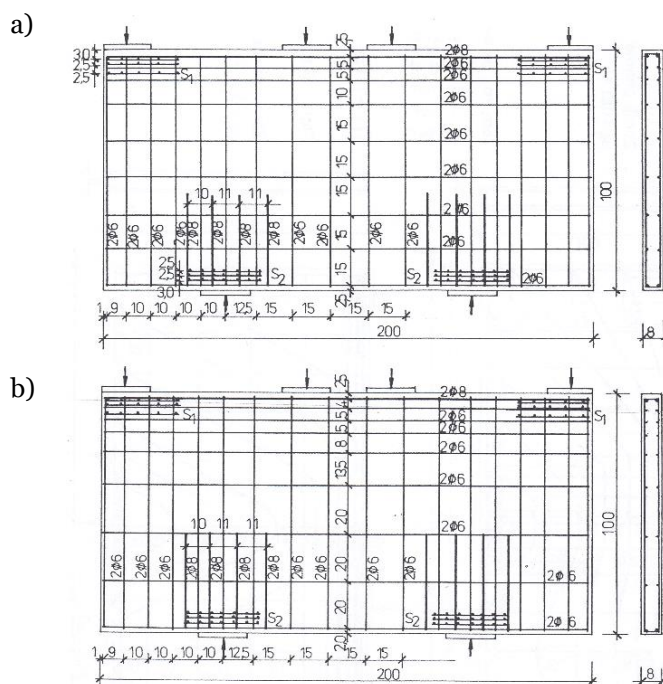


Rys. 3.10 Zbrojenie ortogonalne tarcz TG-1 o smukłości ścinania $l_k/H=1.0$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-1/Os, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-1/Of [11].

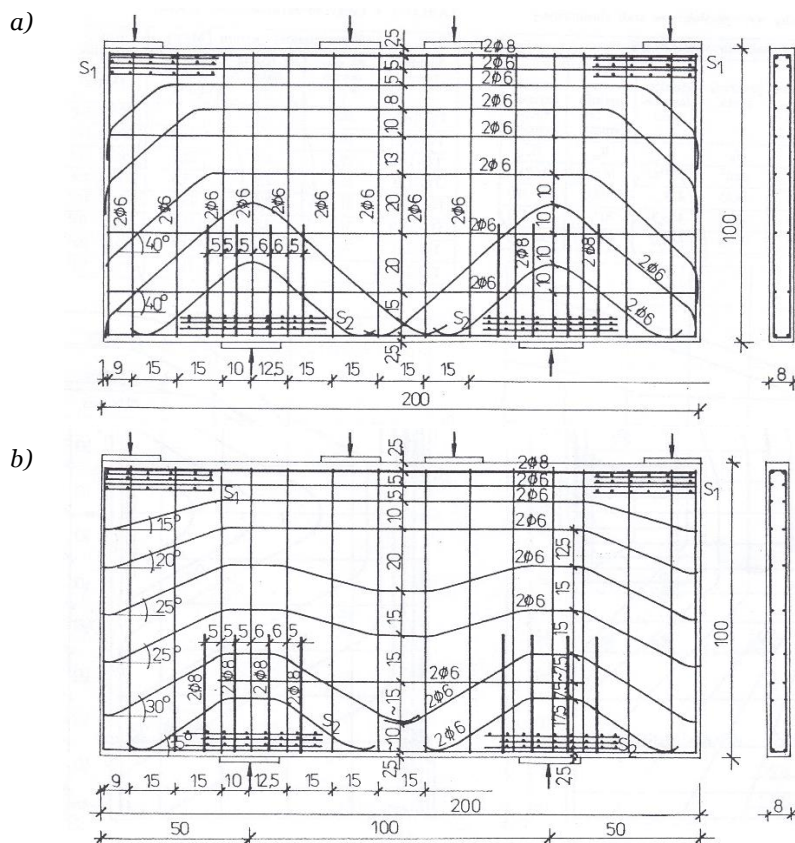


Rys. 3.11 Zbrojenie trajektorialne tarcz TG-1 o smukłości ścinania $l_k/H=1.0$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-1/ts, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-1/tf [11].

Zbrojenie trajektorialne dostosowano do przebiegu sił rozciągających zgodnie z kierunkiem trajektorii naprężeń głównych. Tarcze, których zbrojenie miało pracować optymalnie w *fazie II* po zarysowaniu, zaprojektowano odnosząc się przede wszystkim do wytycznych Leonhardta [1]. Oprócz zbrojenia podstawowego zastosowano dodatkowe zbrojenie na docisk w obszarach działania sił skupionych. Schemat ukształtowania zbrojenia dla poszczególnych rodzajów badanych tarcz przedstawiono na rysunkach 3.10-3.13. Wytrzymałość betonu na ściskanie, badana na kostkach sześciennych o boku 15 cm, była zróżnicowana i wynosiła od 26.1 do 35.9 MPa.



Rys. 3.12 Zbrojenie ortogonalne tarcz TG-2 o smukłości ścinania $l_k/H=0.5$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-2/Os, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-2/Of [11].

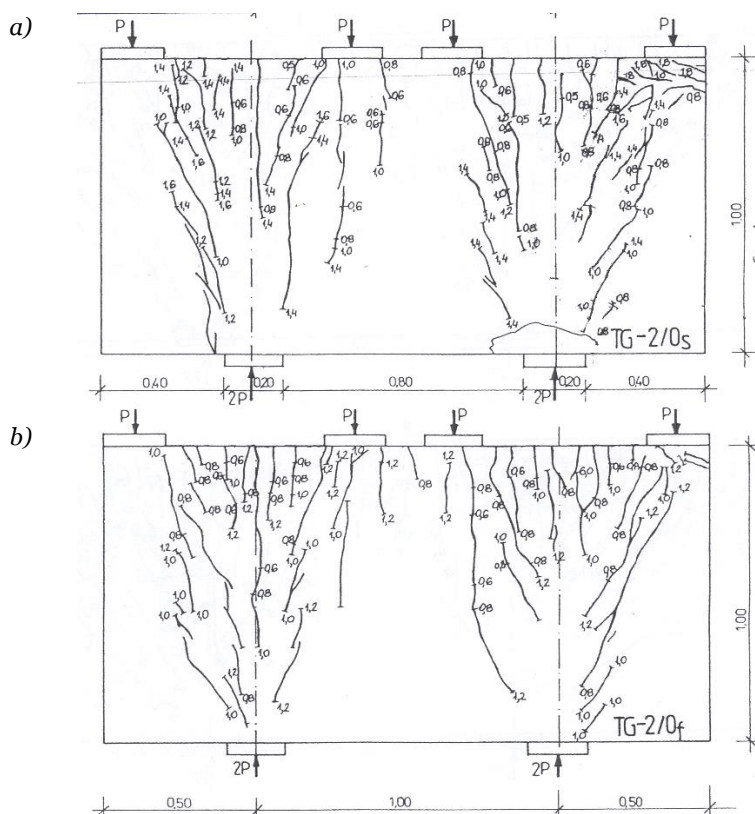


Rys. 3.13 Zbrojenie trajektorialne tarcz TG-2 o smukłości ścinania $l_k/H=0.5$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-2/ts, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-2/tf [11].

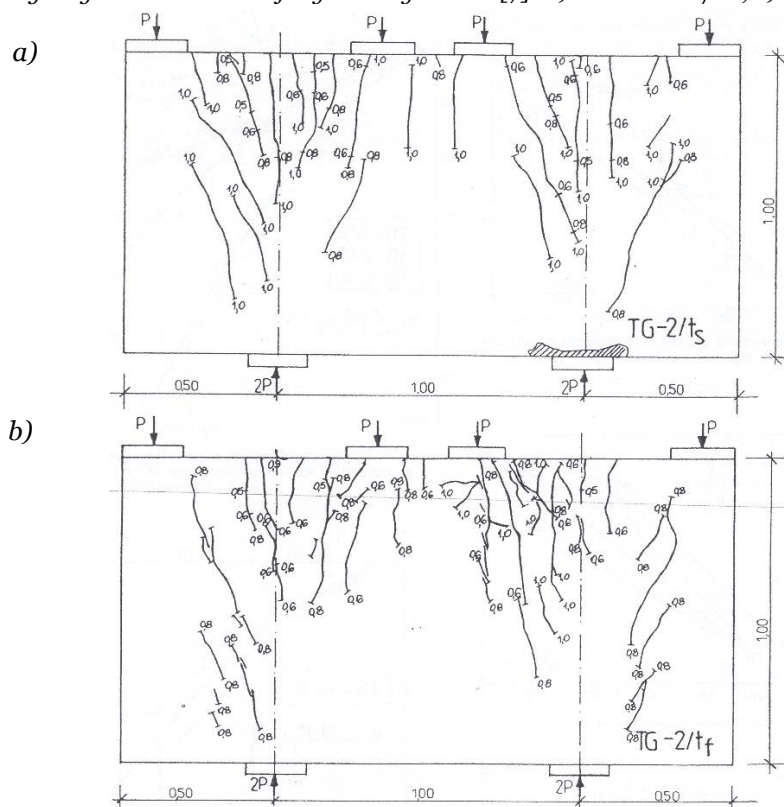
Pierwsze rysy badanych elementów ze wspornikami kwadratowymi (TG-1) zaobserwowano przy obciążeniu równym ok. 25% obciążenia niszczonego, natomiast tarcze z krótszym wspornikiem (TG-2) zarysowały się przy obciążeniu równym 27-50% siły niszczonej. Z uwagi na odmienny sposób zbrojenia tarcz nie odnotowano istotnej zmiany wielkości obciążenia rysującego. Natomiast dostosowanie zbrojenia do pracy przekroju w fazie II przyczyniło się do nieco późniejszego zarysowania zarówno w przypadku tarcz zbrojonych ortogonalnie jak i trajektorialnie.

Obrazy zarysowania powierzchni badanych tarcz jakie zarejestrowano przed zniszczeniem zostały pokazane na rys. 3.14 - 3.17. Na ich podstawie można zauważyć, iż morfologia rys tarcz wspornikowych zależy zarówno od przyjętego ukształtowania zbrojenia jak również, a właściwie przede wszystkim, od długości wysięgu tarczy wspornikowej i stosunku l_k/H . Zarysowanie tarcz TG-2 charakteryzowało się wieloma krótkimi rysami na całej wysokości przekroju, co świadczy o poślizgowo-rozdzielczym niszczeniu struktury betonu.

Rys. 3.15 Morfologia rys tarcz TG-1 zbrojonych trajektorialnie [7]: a) tarcza TG-1/ts, b) tarcza TG-1/tf [11].



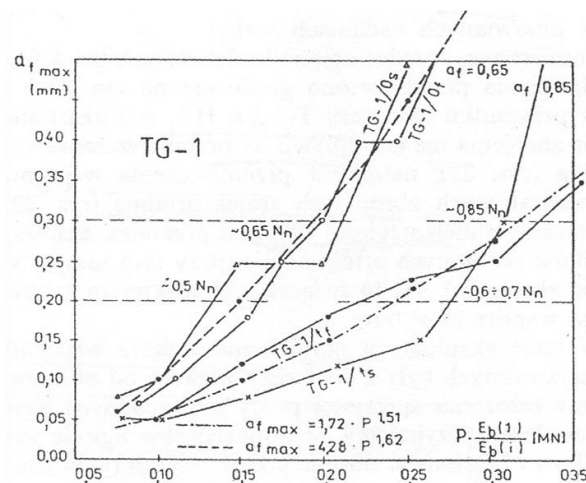
Rys. 3.16 Morfologia rys tarcz TG-2 zbrojonych ortogonalnie [7]: a) tarcza TG-2/0s, b) tarcza TG-2/0f [11].



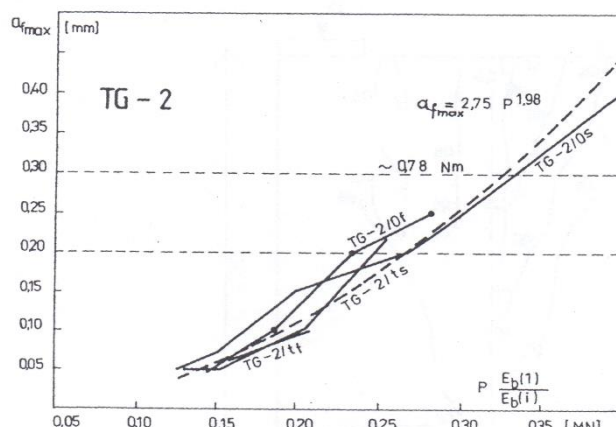
Rys. 3.17 Morfologia rys tarcz TG-2 zbrojonych trajektorialnie [7]: a) tarcza TG-2/ts, b) tarcza TG-2/tf [11].

Zastosowanie zbrojenia trajektorialnego w tarczach TG-1 ze wspornikami o smukłości $l_k/H=1.0$ korzystnie wpłynęło na szerokość rys oraz ugięcie wspornika w porównaniu z tarczami ze zbrojeniem ortogonalnym, podczas całego cyklu obciążania tarcz aż do wyczerpania nośności (patrz. rys.

3.18). Tego efektu nie zaobserwowano natomiast we wspornikach krótszych TG-2 ($l_k/H=0.5$) jak pokazano na rys. 13.19. Jednakże w tym przypadku zastosowanie zbrojenia trajektorialnego, dostosowanego do przebiegu głównych naprężeń rozciągających, miało odzwierciedlenie w zdecydowanie mniejszej liczbie rys.



Rys. 3.18 Zależność maksymalnej szerokości rys od siły obciążającej dla tarczy wspornikowej o smukłości ścinania $l_k/H=1.0$ TG-1 [11].



Rys. 3.19 Zależność maksymalnej szerokości rys od siły obciążającej dla tarczy wspornikowej o smukłości ścinania $l_k/H=0.5$ TG-2 [11].

Autorka badań [11] wskazuje również wpływ rozmieszczenia zbrojenia na nośność i rozkład naprężeń w zbrojeniu. W pierwszej serii badań ($l_k/H = 1.0$) uwidocznił się przede wszystkim wpływ rozmieszczenia zbrojenia poziomego na wytrzymałość stali zbrojeniowej. W przypadku tarcz z koncentracją zbrojenia głównego blisko krawędzi rozciąganej, pozostałe zbrojenie poziome nie włącza się efektywnie do współpracy w przenoszeniu obciążenia, sugerując tym samym iż przekrój tego zbrojenia mógłby być zredukowany. Natomiast przy bardziej równomiernym rozłożeniu zbrojenia poziomego w przekroju, pręty wyężone są na całej wysokości wspornika.

W drugiej serii badań ($l_k/H = 0.5$) z krótszą tarczą wspornikową stwierdzono również zależność pomiędzy sumarycznym stopniem rozproszenia zbrojenia poziomego, pionowego i odgiętego (nie wliczając zbrojenia głównego przy górnej krawędzi) a nośnością. Wykazano dodatkowo dla tarcz TG-2, że prawie wszystkie pręty poziome (oprócz pręta leżącego najbliżej dolnej krawędzi) są rozciągane wzdłuż całej wysokości wspornika, co jest odzwierciedleniem istotnego udziału sił tnących i stanu naprężeń bliskiego przecinaniu, który powoduje przemieszczenia w rysach poślizgowo-rozdzielczych wywołując tym samym naprężenia rozciągające w zbrojeniu przecinającym te rysy.

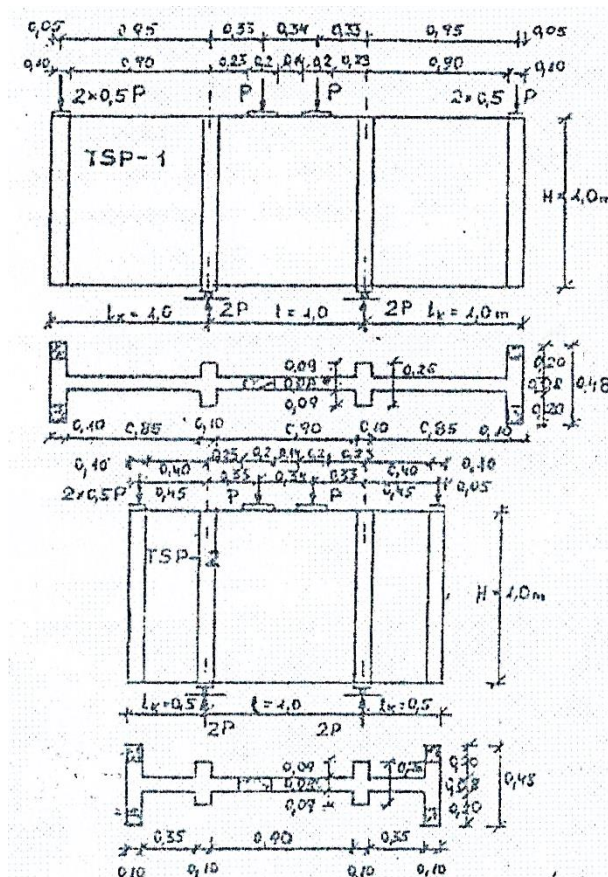
Tarcze serii TG-1 uległy zniszczeniu z uwagi na zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej przekroju, dla których odnotowano również uplastycznienie się stali zbrojenia przy krawędzi rozciąganej. Natomiast nośność tarcz serii TG-2 zależała w głównej mierze od naprężeń tnących τ_{xy} , a także od stopnia rozproszenia zbrojenia na całej wysokości tarczy wspornikowej. Wsporniki tych tarcz niszczyły się gdy ukośna bądź pionowa rysa dochodziła do dolnej krawędzi ściskanej, co powodowało zniszczenie betonu poprzez ścięcie.

Badania tarcz ze słupami podporowymi i wspornikami [13]

Badaniami objęto dwie serie (TSP-1 i TSP-2) tarcz jednoprzęsłowych ze wspornikami i słupami podporowymi przebiegającymi na całej wysokości przekroju, wykonanych w skali zbliżonej do naturalnej (wysokość $H=100$ cm). Badane serie różniły się między sobą długością wysięgu wspornika l_k , która była równa 100 cm dla TSP-1 i 50 cm dla TSP-2. Tarcze żelbetowe miały odmienny sposób zbrojenia, zaprojektowany zgodnie z metodą przyjętą w poprzednich badaniach [11], z tym że seria TSP-1 obejmowała zbrojenie jedynie ortogonalne. Nazewnictwo tarcz, uwzględniające odmienny kształt przyjętego zbrojenia, ustalono również jak w przypadku opisanych wcześniej płaskich tarcz.

Obciążenie tarcz, zadawane było na krawędzi górnej tarczy przęsłowej w postaci dwóch sił skupionych oraz na krańcach wsporników. Obciążenie pośrednie wsporników realizowane było poprzez przyłożenie dwóch sił skupionych ($2 \times 0.5P$) do górnej krawędzi tarcz poprzecznych usytuowanych na zewnętrznych krawędziach wsporników, jak przedstawiono na rys. 3.20.

Wytrzymałość kostkowa betonu na ściskanie mieściła się w zakresie od 27.6 do 35.3 MPa.

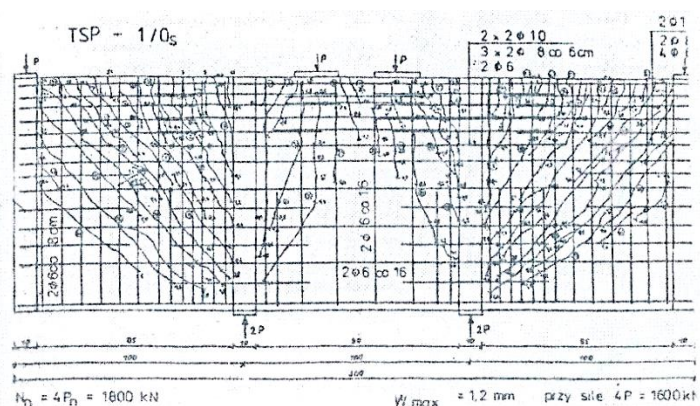


Rys. 3.20 Geometria i schemat statyczny badanych tarcz TSP-1 i TSP-2 [13].

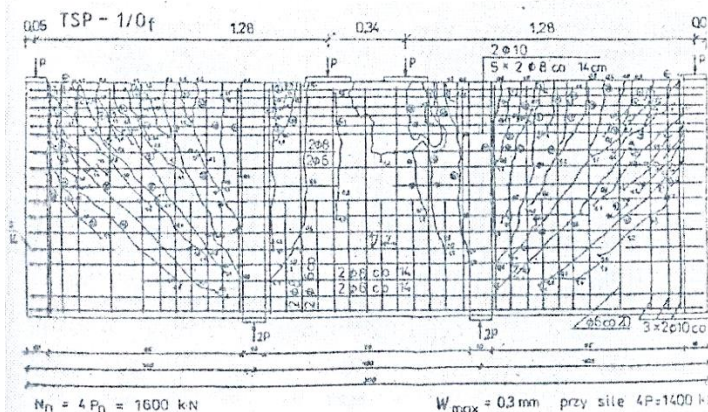
Na rys. 3.21-3.24 przedstawiono łącznie schemat zbrojenia z morfologią rys badanych tarcz TSP. W przypadku tarcz wspornikowych TSP-1 odnotowano zdecydowanie większą ilość zarysowanego obszaru w porównaniu z tarczami płaskimi TG-1 o tym samym stosunku $l_k/H=1.0$ i podobnym zbrojeniu. Gęsty układ rys pojawił się wzdłuż krawędzi przy połączeniu z tarczą poprzeczną sięgające połowy wysokości przekroju.

Dla tarczy TSP-1/Of zbrojonej ortogonalnie z dostosowanym zbrojeniem do pracy po zarysowaniu, zgodnie z zaleceniami Leonhardta [1], zastosowano dodatkowe zbrojenie podwieszające, które spowodowało pojawienie się znacznie większej ilości krótkich rys przy połączeniu z tarczą poprzeczną w porównaniu do tarczy TSP-1/Os z przyjętym zbrojeniem dla stanu sprężystego. Nośność tarczy TSP-1/Os była większa o ok. 13% od nośności tarczy TSP-1/Of. Zbyt wczesne wyczerpanie nośności tarczy zbrojonej zgodnie z fazą II z powodu miażdżenia betonu pod siłą obciążającą w przęśle związane było z niższą wytrzymałością na ściskanie (27.6 MPa).

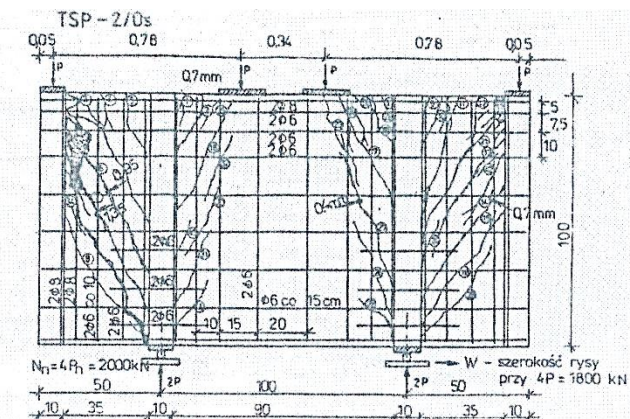
a)



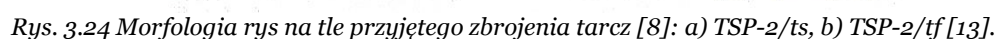
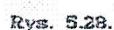
b)



Rys. 3.21 Morfologia rys na tle przyjętego zbrojenia tarcz [8]: TSP-1/Os, b) TSP-1/Of [13].



Rys. 3.22 Morfologia rys na tle przyjętego zbrojenia tarcz TSP-2/Os [13].



Z porównania obrazów zarysowania tarcz TSP-2, można wnioskować iż zbrojenie trajektorialne korzystnie wpłynęło na stan zarysowania, podobnie jak miało to miejsce w przypadku tarcz

wspornikowych płaskich [11]. O nośności tarcz TSP-2 z krótszym wyścięgiem wspornika ($l_k/H=0.5$) decydował stan naprężeń związany z nożycowym działaniem sił tnących, podobnie jak w przypadku wspornikowych tarcz płaskich TG-2. Do niszczenia dochodziła w obszarach przy krawędzi ze słupami podporowymi oraz przy poprzecznej tarczy obciążającej. Najbardziej skuteczne z uwagi na nośność okazało się zbrojenie trajektorialne przyjęte dla stanu po zarysowaniu (TSP-2/ t_f).

W pracy [14], autorka podjęła również próbę weryfikacji metod obliczania nośności na przecinanie dla modeli tarcz z serii TSP-2 oraz podała propozycję wyznaczania zbrojenia z uwagi na przecinanie dla przewieszonych belek-ścian.

Badania Devine'a i innych (2018)

Badania z zakresu tarcz wspornikowych, zamocowanych w nieodkształcalnej konstrukcji wsporczej, prowadził Devine wraz z zespołem [15]. Badaniami eksperymentalnymi objęto cztery tarcze wspornikowe (DB1, DB2, DB3 i DB4) ze stosunkiem smukłości ścinania $a/d=0.5$, reprezentujące fragment długiej krępej ściany zamocowanej w fundamencie. W programie badawczym przyjęto parametr zmienny w postaci różnej wytrzymałości betonu na ściskanie oraz stali zbrojeniowej na rozciąganie, w celu zbadania wpływu materiałów o wysokiej wytrzymałości, zarówno przy jednoczesnym ich zastosowaniu, jak również indywidualnie.

Obciążenie zadawane było w sposób monotoniczny w formie siły skupionej mającej odzwierciedlać obciążenie boczne działające na krępą ścianę. Elementy badawcze miały grubość 20.3 cm i wysokość równą 91.4 cm. Długość tarczy wynosiła 1.22 m, natomiast siła skupiona działa w odległości 45.7 cm od krawędzi utwierdzenia aby uzyskać współczynnik smukłości ścinania $a/d=0.5$. Stanowisko badawcze wraz ze schematem statycznym i geometrią elementu przedstawiono na rys. 3.25.

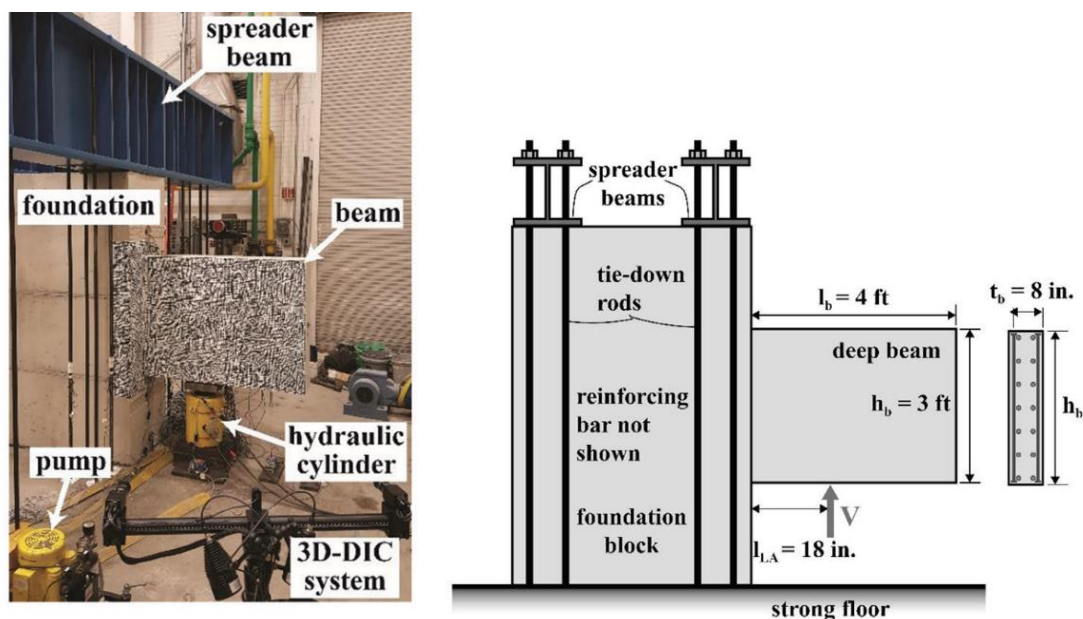
Podział elementów badawczych z odpowiednim typem zbrojenia był następujący:

Tarcza DB1 – beton i stal zwykłej wytrzymałości

Tarcza DB2 – beton zwykłej wytrzymałości i stal wysokiej wytrzymałości

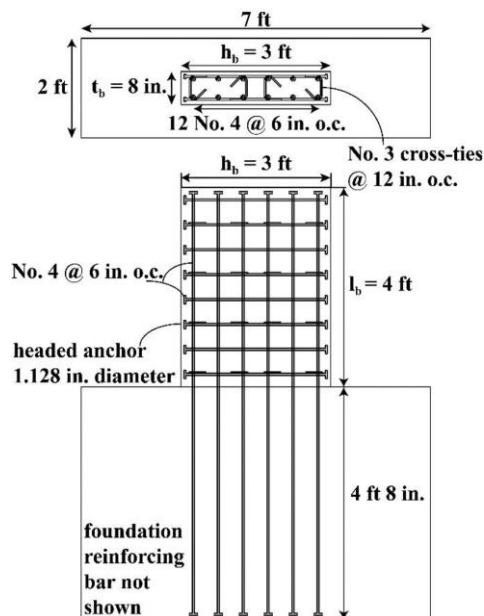
Tarcza DB3 – beton wysokiej wytrzymałości i stal zwykłej wytrzymałości

Tarcza DB4 – beton i stal wysokiej wytrzymałości



Rys. 3.25 Stanowisko badawcze [10], (1 in = 2.54 cm, 1 ft = 0.305 m) [15].

Przyjęte zbrojenie zarówno pod względem rozstawu jak i ilości zbrojenia było we wszystkich tarczach identyczne, patrz rys. 3.26. Zastosowano pręty z umieszczoną na ich końcach płytką kotwiącą. Zakres wytrzymałości na ściskanie wynosił od 34.5 MPa do 55.2 MPa dla betonu zwykłego oraz ponad 82.7 MPa dla betonu o wysokiej wytrzymałości. Granica plastyczności zwykłej stali zbrojeniowej wynosiła $f_y=483$ MPa, natomiast dla stali wysokiej wytrzymałości $f_y=917.7$ MPa.



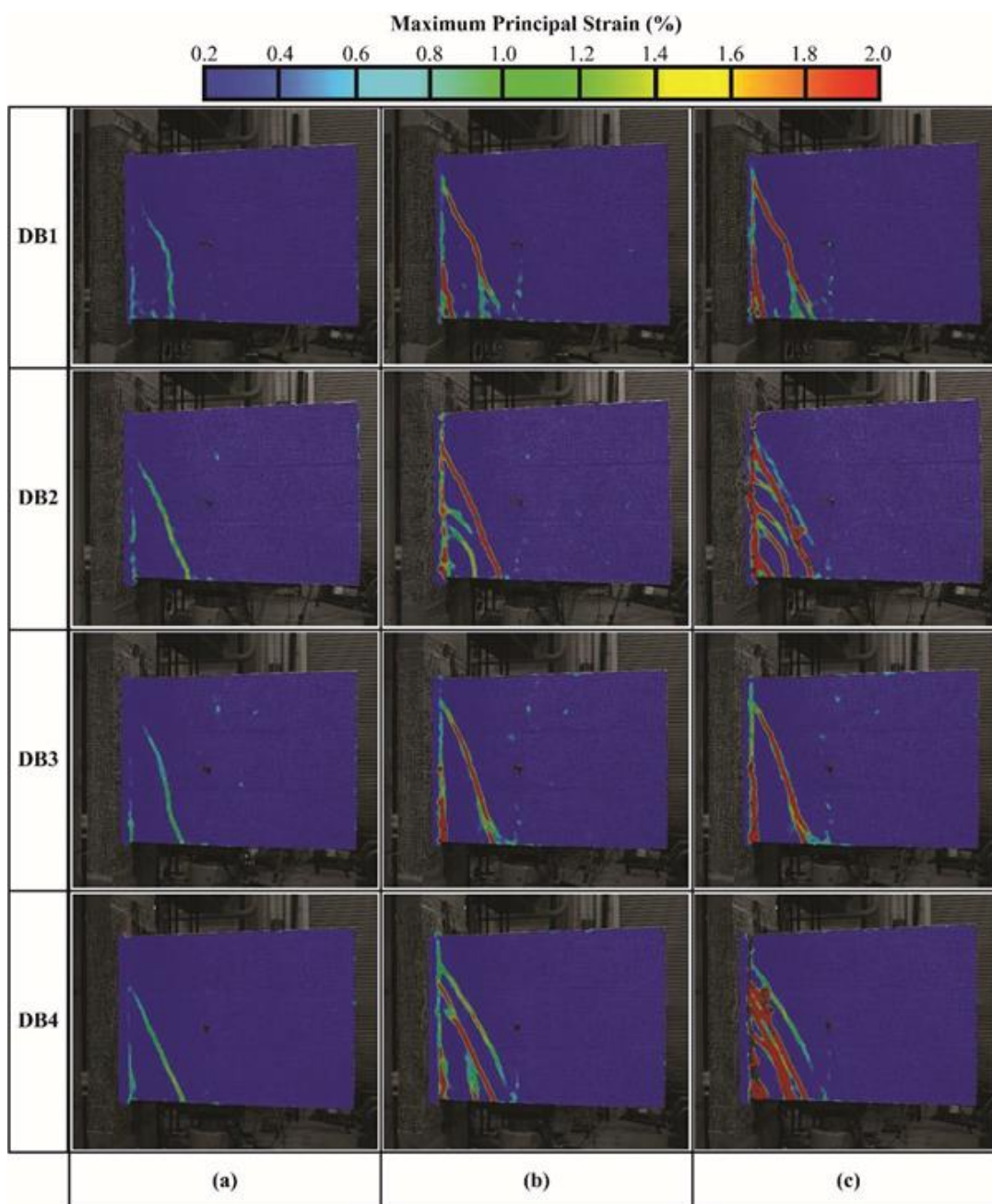
Rys. 3.26 Schemat zbrojenia tarczy wspornikowej [10], (1 in = 2.54 cm, 1 ft = 0.305 m) [15].

Pomiary odkształceń powierzchni betonowej wykonano bezkontaktowym optycznym systemem pomiarowym przy użyciu trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu (3D-DIC). Na rys. 3.27 widoczne są pomierzone maksymalne odkształcenia główne. Obrazy odkształceń przedstawiono z podziałem na trzy poziomy obciążenia: natychmiast po pojawieniu się zarysowania ukośnego (rys. 3.27a), przy obciążeniu stanowiącym 90% obciążenia niszczonego (rys. 3.27b) - dla tego poziomu we wszystkich tarczach odnotowano osiągnięcie granicy plastyczności podłużnych prętów zbrojeniowych, a także pojawienie się kolejnych rys ukośnych. Na rysunku 3.27c przedstawiono obrazy zarysowania przy zniszczeniu.

Pierwsze zarysowanie ukośne pojawiało się w środkowym obszarze lub na krawędzi tarczy, a przy dalszych poziomach obciążenia rozciągało się do krawędzi łączącej z fundamentem, tworząc mechanizm zniszczenia poślizgowego.

W przypadku tarcz DB2 i DB4 ze zbrojeniem o wysokiej wytrzymałości, lepsza ciągliwość stali i wynikająca z niej redystrybucja naprężeń przyczyniły się do zwiększenia nośności na ścinanie, co zaobserwowano również w pojawiających się dodatkowych zarysowaniach ukośnych (rys. 3.26c).

Wnioski, które wyciągnięto z badań to m.in. fakt, iż zwiększenie wytrzymałości stali zbrojeniowej miało większy wpływ na przyrost nośności w porównaniu do zwiększenia wytrzymałości betonu. Dla tarczy DB2 przyrost nośności w porównaniu z tarczą DB1 wynosił 26%, natomiast dla tarczy DB3 nośność wzrosła jedynie o 9%. Największy przyrost nośności odnotowano dla tarczy DB4, aż 48% i był on większy niż sumaryczny przyrost dla tarczy DB2 i DB3 (35%), dla których stosowano oddzielnie zwiększenie wytrzymałości betonu bądź stali.



Rys. 3.27 Maksymalne odkształcenia główne w betonie tarczy [10]: a) tuż po pojawieniu się ukośnego zarysowania, b) przy 90% obciążenia niszczącego, c) przy zniszczeniu [15].

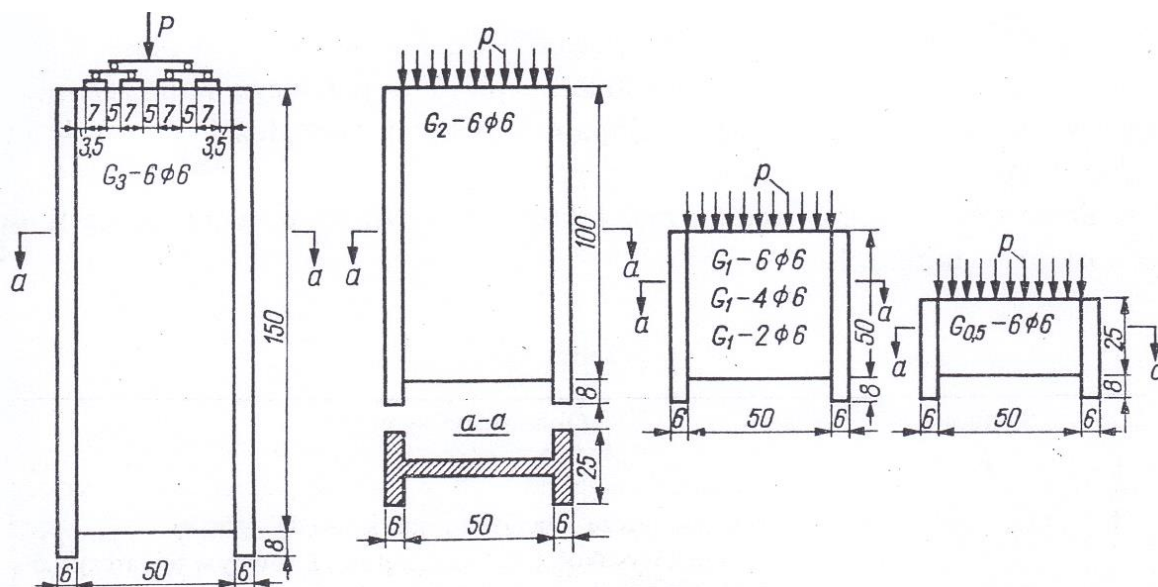
W przypadku tarcz ze stałą o wysokiej wytrzymałości (DB2 i DB4), mniejsza ilość zbrojenia uplastyczniła się powodując tym samym większą sztywność elementu po zarysowaniu. Dla tych tarcz wyraźne było również większe wyężenie stali zbrojeniowej po zarysowaniu, co obserwowano zarówno w większych odkształceniach poprzecznego zbrojenia, jak i w dodatkowym zarysowaniu ukośnym.

Ponadto wykazano, iż ówczesne zalecenia podane w normie *ACI 318-14 rozdział 6* [N2], odnoszące się do sztywności poprzecznej krępych ścian prowadzą do wyraźnych przeszacowań zarówno dla przekroju niezarysowanego jak i po zarysowaniu, bez względu na zastosowany materiał (zwykły lub wysokiej wytrzymałości). Autorzy wskazują potrzebę ponownej oceny obecnych przepisów projektowych dla krępych ścian.

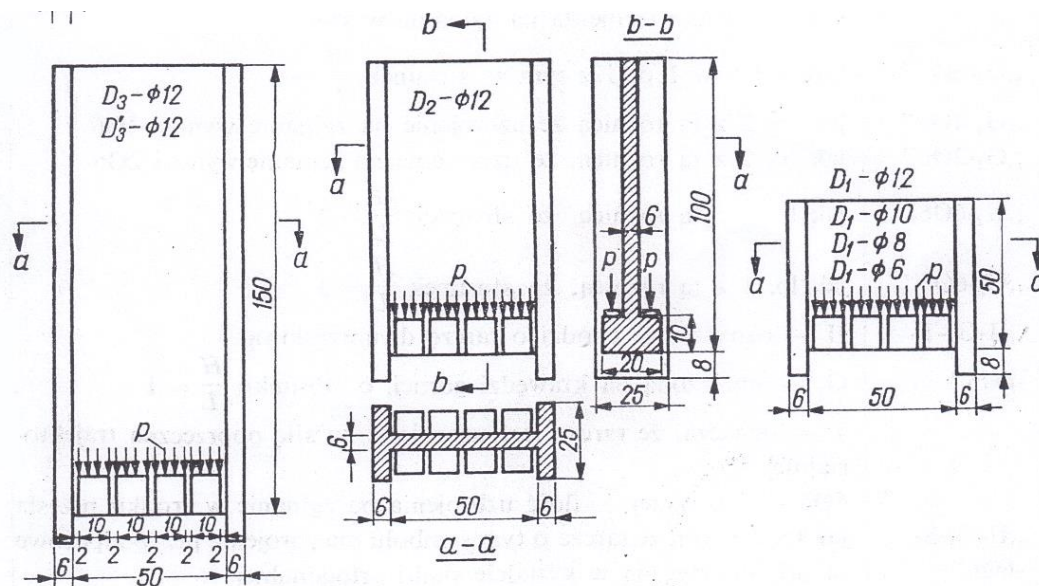
3.1.2 Tarcze jednoprzęsłowe i ciągłe

Godycki-Ćwirko

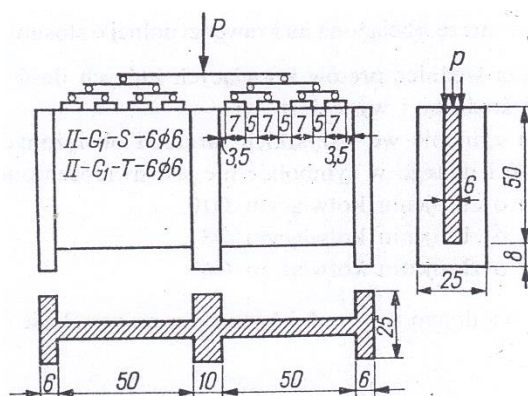
Pionierem wśród polskich badaczy podejmujących tematykę zachowania się żelbetowych belek-ścian był Godycki-Ćwirko [4], [16]. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w *laboratorium Politechniki Gdańskiej* i obejmowały łącznie 13 tarcz jednoprzęsłowych oraz 4 tarcze dwuprzęsłowe. Zróżnicowanie badanych tarcz obejmowało zmienny stosunek H/L, a także sposób przykładanego obciążenia oraz ukształtowanie zbrojenia. W badaniach założono, że wszystkie tarcze zamocowane są wzdłuż całej wysokości na słupach, których powierzchnia równa była powierzchni przekroju poziomego tarczy pomiędzy słupami. Zestawienie badanych modeli tarcz wraz ze schematem obciążenia i przyjętymi odpowiednio symbolami przedstawiono na rys. 3.28-30.



Rys. 3.28 Geometria i schemat statyczny tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej [4].



Rys. 3.29 Geometria i schemat statyczny tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi dolnej [4].



Rys. 3.30 Geometria i schemat statyczny tarcz dwuprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej [4].

Oznaczenie tarcz przyjęto w zależności od sposobu obciążenia, stosunku H/L , oraz przyjętego rodzaju zbrojenia:

- dla tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej (rys. 3.28) – różnicowanie zbrojenia na zginanie pod względem przyjętej ilości prętów: 2 $\phi 6$, 4 $\phi 6$, 6 $\phi 6$.
- dla tarcz obciążonych na krawędzi dolnej (rys. 3.29) – różnicowanie zbrojenia kotwiącego pod względem przyjętej średnicy (ilość sztuk stała – 16 prętów): $\phi 6$, $\phi 8$, $\phi 10$, $\phi 12$,
- dla tarcz dwuprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej (rys. 3.30) – różnicowanie zbrojenia na ścinanie pod względem ukształtowania: ortogonalne „S” i trajektorialne „T”.

Analiza morfologii rys tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej (rys. 3.31) wykazała, iż zarysowanie tarcz niskich ($H/L=0.5$) było zbliżone do zarysowania się belki zwykłej (rys. 3.31a), której zniszczenie spowodowane było osiągnięciem granicy plastyczności w zbrojeniu na zginanie. Pozostałe tarcze niszczyły się z uwagi na przecinanie w miejscu połączenia tarczy ze słupem.

W przypadku tarcz o stosunku $H/L=1.0$, charakteryzujących się niszczeniem przy krawędzi słupów na skutek przecinania (rys. 3.31b), odnotowano wzrost siły niszczącej w przypadku zwiększenia ilości głównego zbrojenia poziomego, natomiast nie zaobserwowano różnic w wielkości siły rysującej, niezależnie od procentu zbrojenia poziomego wprowadzonego do słupa (6 $\phi 6$, 4 $\phi 6$, 2 $\phi 6$). Na tej podstawie autor badań wskazuje, iż zwiększenie ilości zbrojenia poziomego podwyższa wytrzymałość tarcz na przecinanie, ale nie ma wpływu na opóźnienie powstawania zarysowania.

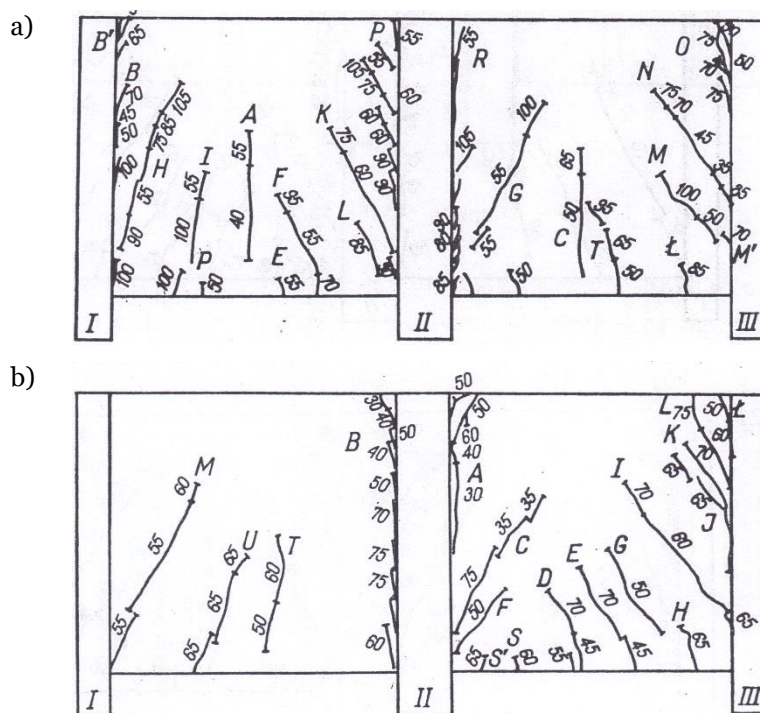
Przy wzroście stosunku H/L do 2.0 (rys. 3.31c) zaobserwowano opóźnienie zarysowania, jak również zwiększenie siły niszczącej w porównaniu do tarcz o $H/L=1.0$. Rysy od przecinania, które doprowadziły w ostateczności do wyczerpania nośności, miały większe nachylenie od poprzednich tarcz niższych, natomiast rysy przy dolnej krawędzi pojawiły się stosunkowo późno.

Najwyższe tarcze o stosunku $H/L=3.0$ charakteryzowały się gałęziste rozchodzącymi się rysami, wychodzącymi od krawędzi słupa (rys. 3.31d). Dla tych tarcz odnotowano również największą wartość siły rysującej i niszczącej. Zatem zwiększenie wysokości tarczy podwyższa jej nośność oraz opóźnia proces zarysowania, jednak na co zwraca uwagę autor, zwiększenie obciążenia rysującego jest znacznie bardziej wyraźne niż zwiększenie nośności.



a) $G_{0,5-6\phi 6}$, b) $G_1-6\phi 6$, c) $G_2-6\phi 6$, d) $G_3-6\phi 6$ [4].

Tarcze *II-G1-T-6φ6* (rys. 3.32a) zbrojone trajektorialnie miały charakter zarysowania i sposób niszczenia zbliżony do obserwowanego w tarczach jednoprzęsłowych. Natomiast w tarczach *II-G1-S-6φ6* zbrojonych ortogonalnie (rys. 3.32b) siła niszcząca była niższa o ok. 40%. Zatem porównując obie tarcze dwuprzęsłowe, większą skutecznością w przenoszeniu obciążenia wykazała się tarcza ze zbrojeniem trajektorialnym. Ten spadek nośności, autor tłumaczy brakiem udziału prętów pionowych siatki ortogonalnej w pobliżu słupów w przenoszeniu ukośnych naprężeń rozciągających – na każdym poziomie obciążenia pręty te wykazywały naprężenia ściskające. W celu zwiększenia skuteczności zbrojenia ortogonalnego proponowane jest zwiększenie ilości prętów poziomych.



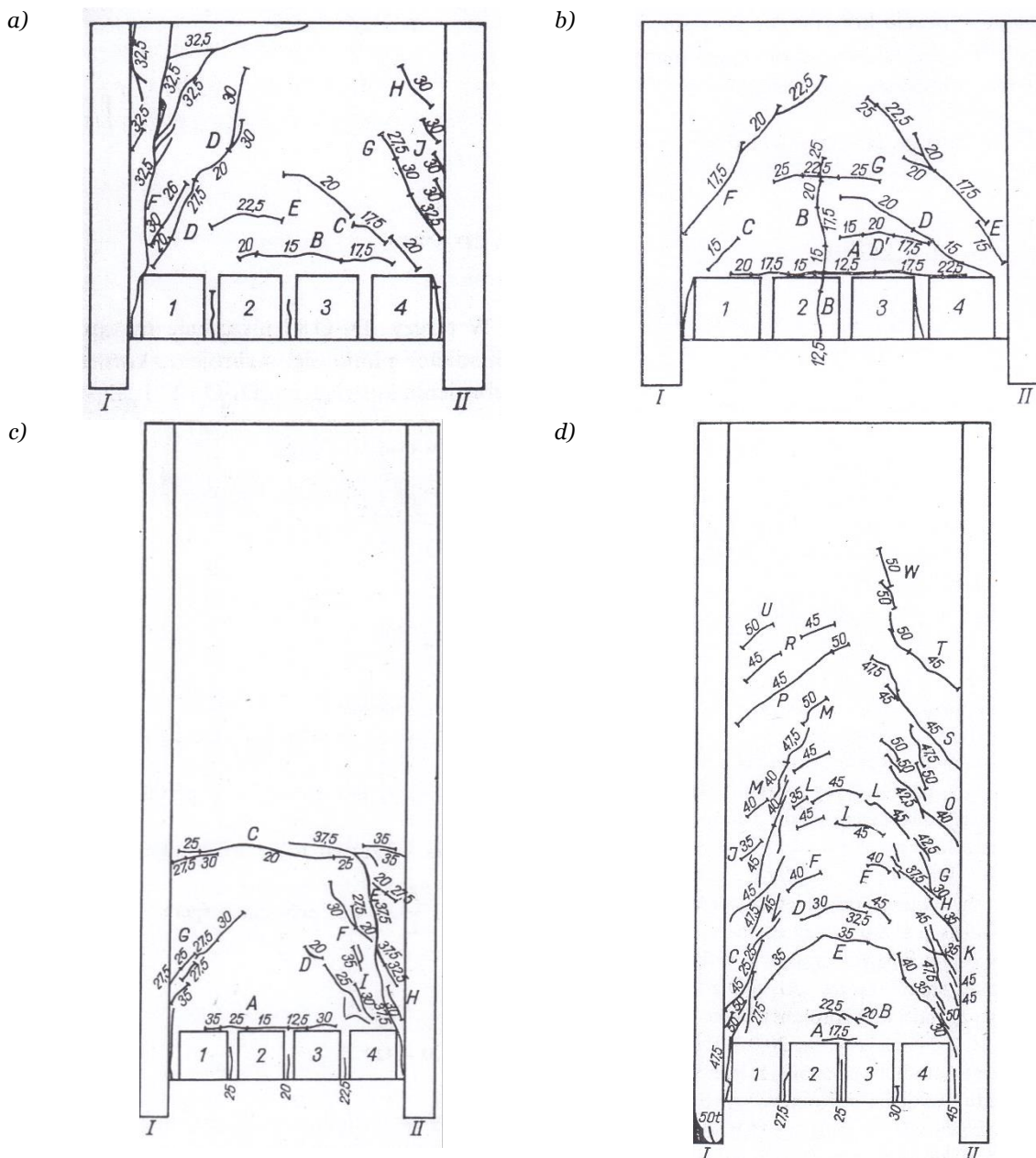
Rys. 3.32 Morfologia rys tarcz dwuprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej:
a) II-G1-T-6φ6, b) II-G1-S-6φ6 [4].

Obraz zarysowania tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi dolnej (rys. 3.33) zdecydowanie odbiegał od zarysowania tarcz obciążonych na krawędzi górnej (rys. 3.31). Dla tak zadanego obciążenia, można było zaobserwować, iż powstające rysy od naprężeń rozciąganych, zmieniają pracę tarczy w łuk ze ściąganiem, gdzie rolę łuku pełni beton, a rolę ściągu przejęło zbrojenie poziome umiejscowione przy dolnej krawędzi – pomierzone naprężenia dla tego zbrojenia były stałe wzdłuż całej rozpiętości przęsła.

W tarczach obciążonych na krawędzi dolnej niszczenie następowało w skutek wyczerpania nośności na przecinanie (rys. 3.33a) podobnie jak w tarczach obciążonych na krawędzi górnej (rys. 3.31a, b, c) lub z uwagi na osiągnięcie granicy plastyczności w zbrojeniu kotwiącym (rys. 3.33b).

W przypadku obciążenia działającego na dolnej krawędzi tarczy, zwrócono również uwagę na istotną rolę zbrojenia pionowego i długości jego zakotwienia, która może mieć znaczący wpływ na nośność tarczy. W tarczy $D_3-\phi 12$ (rys. 3.33c) pionowe pręty kotwiące zostały doprowadzone na wysokość równą L ($6 \phi 12$), natomiast w bliźniaczej tarczy $D'_3-\phi 12$ (rys. 3.33d) zbrojenie pionowe zakotwiono aż do górnej krawędzi, t.j. na wysokość równą $3L$. Przy długości zakotwienia jedynie na wysokość równą rozpiętości tarczy zaobserwowano poziomą rysę, która ograniczała pracę tarczy, obniżając nośność i zmieniając charakter zarysowania.

W pracy [11, 12] Godycki zaproponował również procedurę wymiarowania tarcz żelbetowych na zginanie w fazie II z podziałem na tarcze jedno-, dwu- i wieloprzęsłowe obciążone na krawędzi górnej, tarcze obciążone na krawędzi dolnej oraz zalecenia wymiarowania tarcz na siły poprzeczne z uwzględnieniem wytrzymałości na przecinanie.

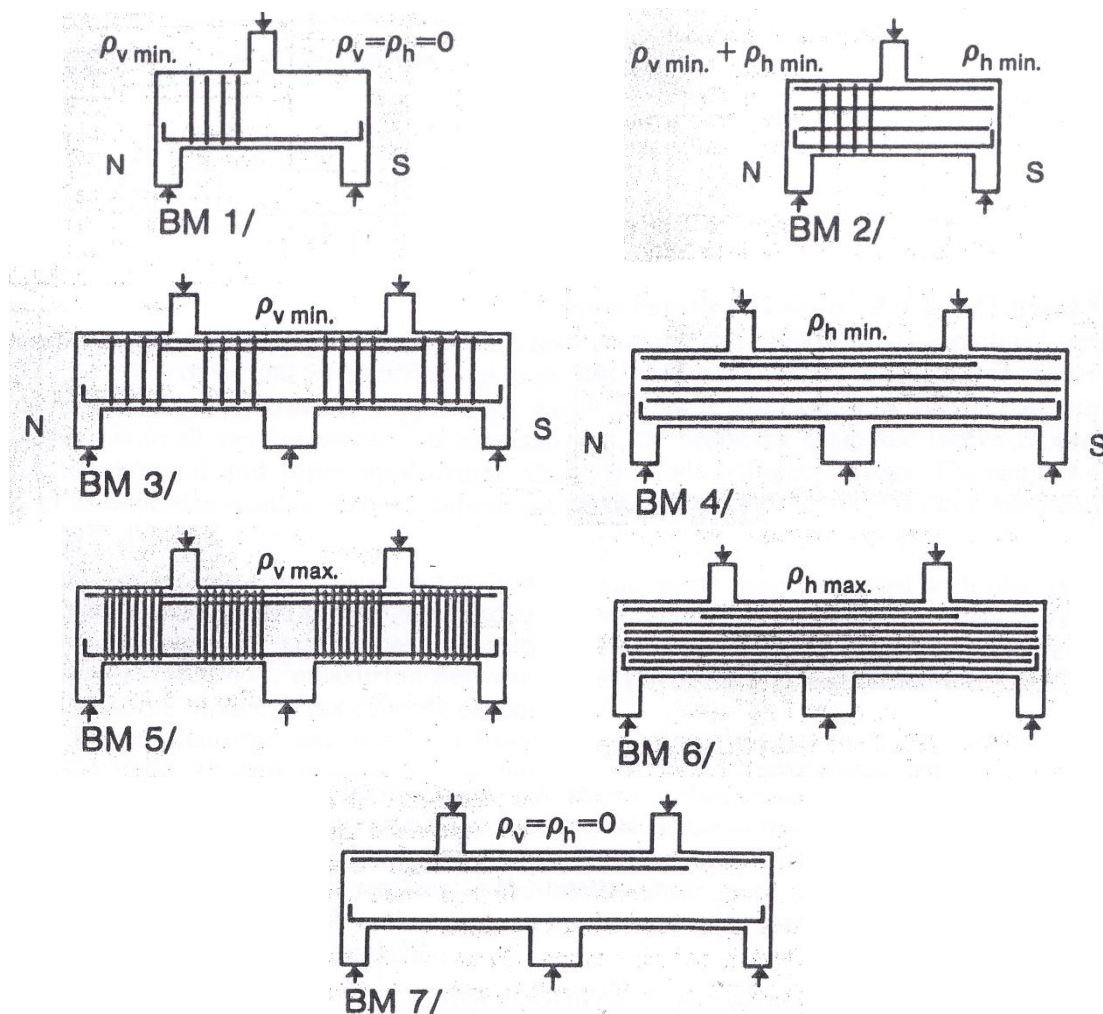


Rys. 3.33 Morfologia rys tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi dolnej:

a) $D_1\text{-}\phi 12$, b) $D_1\text{-}\phi 8$, c) $D_3\text{-}\phi 12$, d) $D_3\text{-}\phi 12$ [4].

Rogowsky, MacGregor i inni, 1986

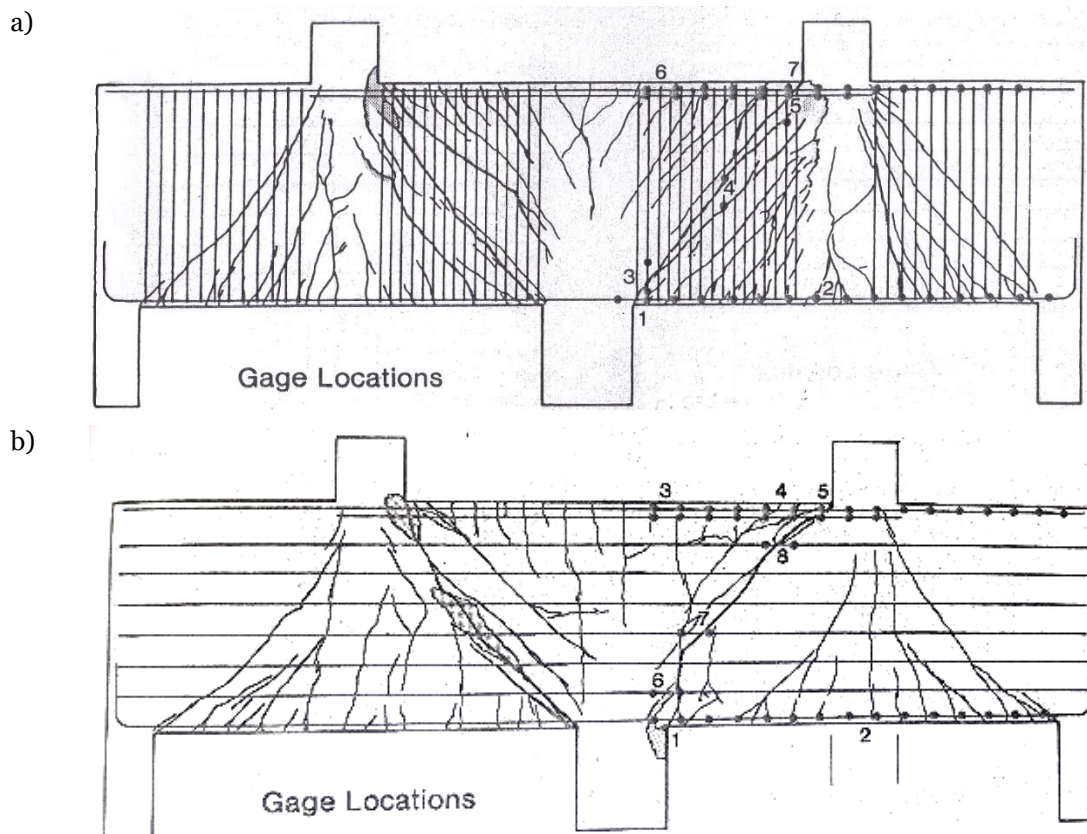
Rogowsky i MacGregor [17] przeprowadzili szeroki program badań eksperymentalnych, który miał ocenić zachowanie się tarcz ciągłych pod obciążeniem skupionym. Zbadano 17 ciągłych tarcz dwuprzęsłowych oraz dla porównania 7 tarcz swobodnie podpartych przy różnym wskaźniku ścinania ($a/d = 1.0, 1.5, 2.0$) oraz przy zmiennym sposobie zbrojenia pionowego i poziomego średnika. Sposób ukształtowania zbrojenia tarcz wraz z przypisanym oznaczeniem oraz schematem statycznym przedstawiono na rys. 3.34. Zbrojenie główne dobrano z uwagi na działający moment zginający, natomiast zbrojenie pionowe i poziome średnika przyjęto (poza jednym przypadkiem) dla każdej tarczy oddzielnie celem lepszego oszacowania wpływu danego typu zbrojenia. Stopień zbrojenia pionowego i poziomego mieścił się w zakresie od 0 do 0.6%.



Rys. 3.34 Typy zbrojenia i schemat statyczny tarcz swobodnie podpartych i ciągłych [17].

Wszystkie tarcze były obciążane i podparte w ten sam sposób. Tarcze badano dwukrotnie. Po zniszczeniu z uwagi na ścinanie jednego przęsła, wzmacniano je dodatkowym zbrojeniem w postaci strzemion zewnętrznych i następnie ponownie badano aż do zniszczenia drugiego przęsła. (Sposób ten nie do końca wydają się odpowiedni, gdyż po zniszczeniu pierwszego przęsła zmienia się sztywność układu, a to może z kolei wpływać na stan naprężenia w drugim przęsle).

Zaobserwowano dwa rodzaje zachowania się belek ciągłych. Tarcze bez strzemion lub z minimalną ilością strzemion pionowych niszczyły się w sposób nagły i kruchy niezależnie od ilości zbrojenia poziomego. Dla tych tarcz nie odnotowano również uplastycznienia się górnego zbrojenia głównego przed zniszczeniem. Z kolei tarcze z dużą ilością strzemion pionowych niszczyły się w sposób plastyczny, gdzie zarówno podłużne zbrojenie dolne, jak i górne osiągnęło granicę plastyczności przed zniszczeniem. Obrazy zarysowania dla przykładowych tarcz ciągłych z maksymalną ilością strzemion pionowych, $\rho_{v,max}$ (BM 5) oraz strzemion poziomych, $\rho_{h,max}$ (BM 6) przedstawiono na rys. 3.35.



Rys. 3.35 Morfologia rys przy zniszczeniu: a) tarcza BM 5 ($\rho_{v,max}$), b) tarcza BM 6 ($\rho_{h,max}$) [17].

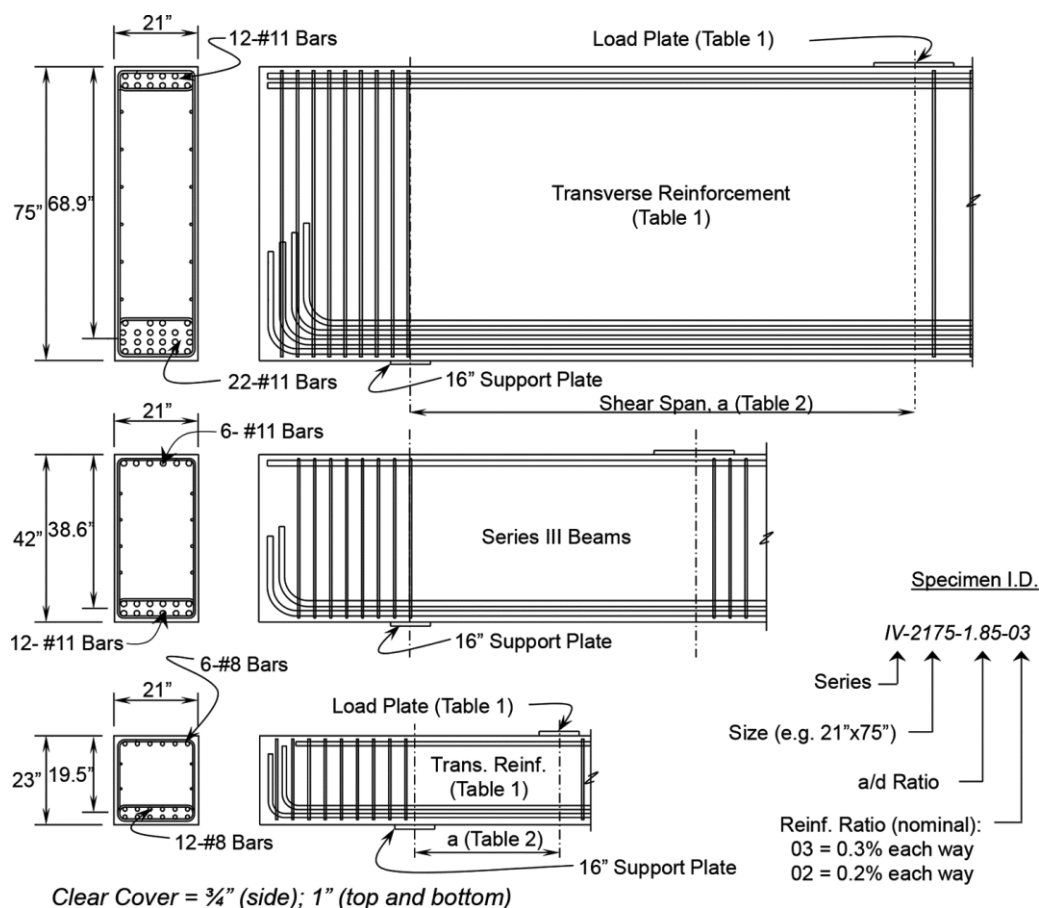
Stwierdzono również, że przy porównaniu tarcz ciągłych o tej samej smukłości, ale z różną ilością strzemion poziomych i pionowych, zbrojenie poziome ma niewielki wpływ na nośność. Natomiast zastosowanie zbrojenia pionowego istotnie wpływa na zwiększenie nośności.

Z przeprowadzonych badań wywnioskowano również, że wytrzymałości na ścinanie zmniejsza się wraz ze wzrostem stosunku a/d zarówno w przypadku tarcz swobodnie podpartych jak i ciągłych. Jedynie tarcze z maksymalną ilością zbrojenia pionowego wykazywały niewielki, wręcz pomijalny wpływ wielkości a/d w odniesieniu do wytrzymałości na ścinanie. Autorzy badań, zakwestionowali w ten sposób podane procedury zawarte w normie *ACI 318-83* [N1], która sugeruje, że w belkach-ścianach zbrojenie poziome jest zawsze bardziej skuteczne niż zbrojenie pionowe.

Birrcher, Tuchscherer i inni, 2013-2014

Autorzy przeprowadzili badania eksperymentalne (*Uniwersytet w Austin*) w celu weryfikacji aktualnych wymagań normowych dotyczących minimalnego zbrojenia strzemionami pionowymi i poziomymi belek-ścian [18] oraz w celu określenia wpływu wysokości przekroju na stan graniczny nośności i użytkowości żelbetowych belek-ścian [19].

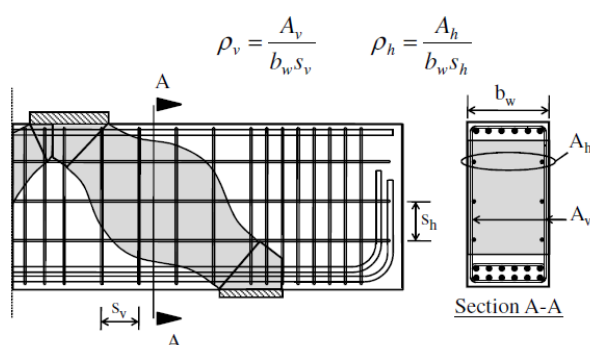
Badania zostały wykonane na 12 tarczach płaskich swobodnie podpartych, różniących się wysokością przekroju oraz tzw. wskaźnikiem smukłości ścinania (a/d), który dla poszczególnych tarcz wynosił: 1.2, 1.85 i 2.5. Przekroje belek-ścian miały następujące wymiary 21 x 23 cali (533 x 584 mm), 21 x 42 cali (533 x 1067 mm) i 21 x 75 cali (533 x 1905 mm). Geometrię i schemat zbrojenia wraz z objaśnieniem oznaczenia poszczególnych tarcz przedstawiono na rys. 3.36.



Rys. 3.36 Geometria i zbrojenie belek-ścian [18], [19], (1 in = 2.54 cm).

Stopień zbrojenia przekroju poprzecznego dla strzemion pionowych ρ_v i prętów poziomych ρ_h mieścił się w zakresie 0%-0.3%. Stopień rozciąganego zbrojenia podłużnego badanych elementów wynosił 2.3%, a ściskanego zbrojenia podłużnego 1.1%. Belki były obciążane monotonicznie z przyrostem równym ok. 10% spodziewanej maksymalnej nośności. Długości płyt obciążających i podpierających zostały dobrane w odpowiedni sposób, mając na uwadze, że ich wymiary mogą wpływać na ścinanie w belkach-ścianach.

Autorzy badań, na podstawie przeprowadzonej analizy [18] wskazali potrzebę stosowania większej ilości zbrojenia średnika, aby odpowiednio ograniczyć szerokość rysy ukośnej. W oparciu o wyniki wytrzymałości i użytkowości autorzy zalecają przyjmować minimalny stopień zbrojenia równy 0.3% zarówno dla strzemion pionowych jak i prętów poziomych (rys. 3.37).

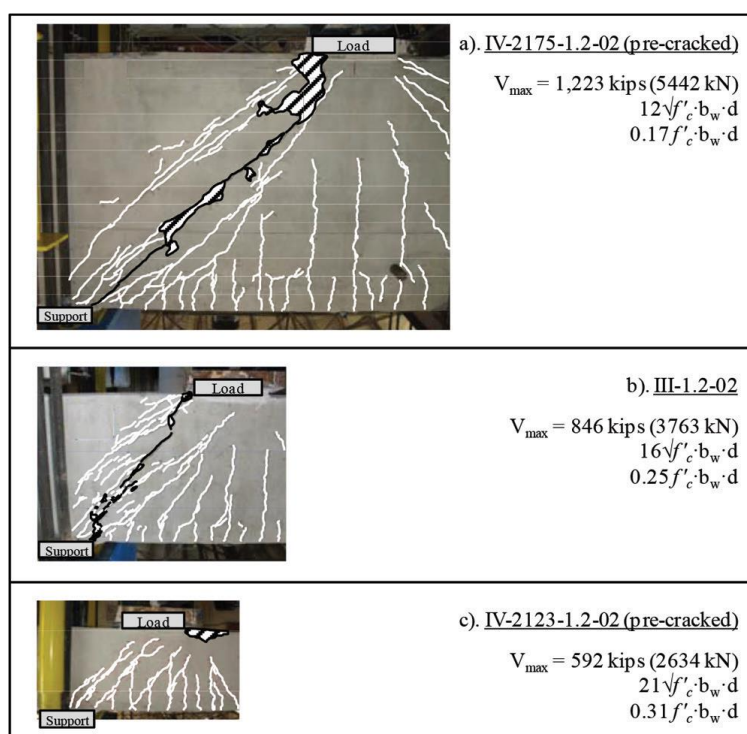


Rys. 3.37 Definicja stopnia zbrojenia strzemion pionowych i poziomych belek-ścian z zaznaczoną powierzchnią efektywną krzyżulca ściskanego [18].

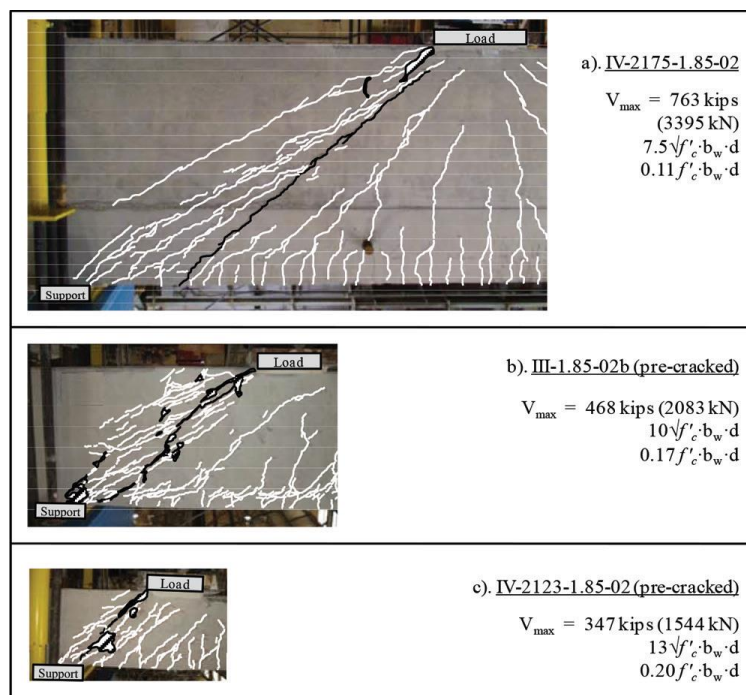
W celu oceny wpływu zastosowanego stopnia zbrojenia prętów pionowych i poziomych podczas wykonywanych badań rejestrowano obciążenie powodujące pojawienie się pierwszej rysy ukośnej oraz mierzono jej maksymalną szerokość. Jak się okazało, nie zaobserwowano zależności pomiędzy zastosowaną ilością zbrojenia, a wielkością obciążenia rysującego. Zachowanie to było w pewnym stopniu do przewidzenia, ponieważ przed zarysowaniem się belki-ściany, zbrojenie środnika nie włącza się efektywnie w przenoszeniu obciążenia.

Bazując na wynikach wytrzymałości i użyteczności omówionych w artykule [20], autorzy zwracają uwagę iż belki-ściany ze stopniem zbrojenia środnika wynoszącym 0.2% zapewniało zadowalającą nośność, ale nie ograniczało odpowiednio szerokości zarysowania ukośnego. Zaobserwowano, że dla elementów badawczych ze stopniem zbrojenia $\rho_v = \rho_h = 0.2\%$ szerokość zarysowania przy pojawieniu się pierwszej rysy ukośnej przekroczyła wartość 0.4 mm. W związku z tym, autorzy zalecają stosowanie minimalnego zbrojenia środnika belki-ściany równego 0.3% w każdym kierunku. Ta ilość zbrojenia zapewnia również zadowalającą nośność. Aby ograniczyć maksymalną szerokość rysy ukośnej do 0.4 mm lub mniejszych wartości przy pierwszym zarysowaniu i przy szacowanych obciążeniach eksploatacyjnych (ok. 0.33 obciążeń niszczących), należy zastosować stopień zbrojenia środnika belki-ściany równy 0.3% w każdym kierunku. Proponuje się, aby ilość tego zbrojenia dobrana była nie dla całkowitego przekroju, ale dla tzw. powierzchni efektywnej krzyżulca ściskanego.

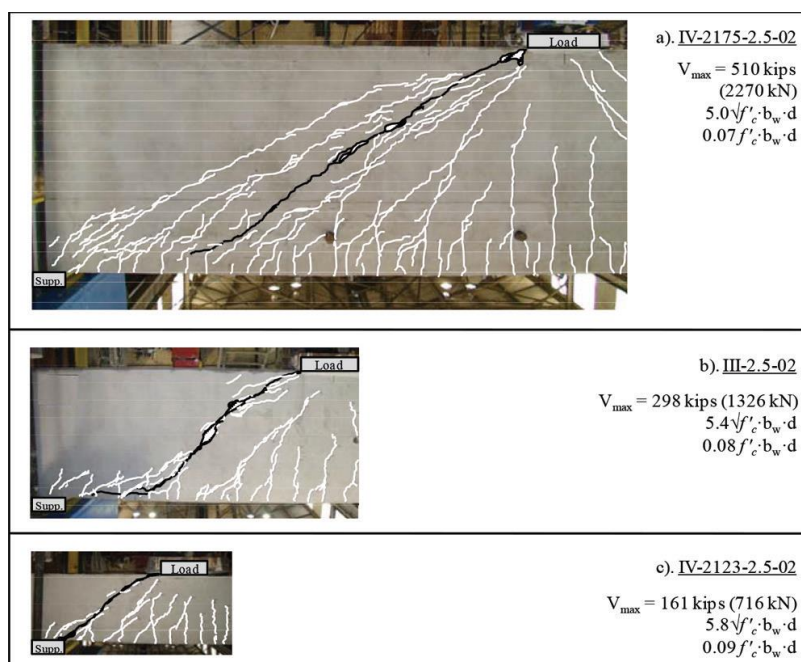
W artykule [18] autorzy skupili się na ocenie wpływu stosunku a/d na zachowanie się i nośność żelbetowych belek-ścian. W przypadku belek-ścian, dla których stosunek a/d był równy 1.2 i 1.85, obciążenie rysujące które spowodowało pojawienie się pierwszej rysy ukośnej stanowiło 20-25% obciążenia niszczącego. Zachowanie się wszystkich belek-ścian pod wzrastającym obciążeniem było do siebie podobne i charakteryzowało się powstawaniem nowych ukośnych rys równoległych w stosunku do powstałej pierwotnie, a następnie propagacją ich szerokości i długości wzdłuż linii pomiędzy obszarem przyłożenia obciążenia a podparciem (rys. 3.38 i 3.39).



Rys. 3.38 Przykładowe obszary zarysowania i zniszczenie dla wybranych belek ścian $a/d=1.2$ [19].



Rys. 3.39 Przykładowe obszary zarysowania i zniszczenie dla wybranych belek ścian $a/d=1.85$ [19].

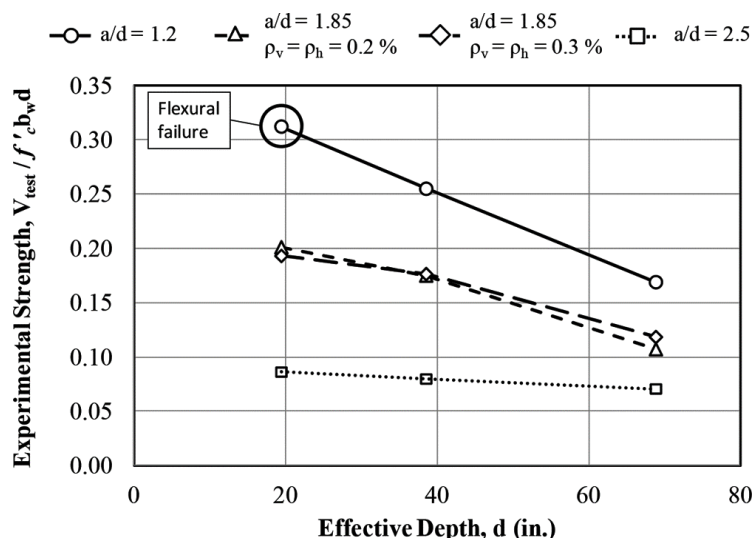


Rys. 3.40 Przykładowe obszary zarysowania i zniszczenie dla wybranych belek ścian $a/d=2.5$ [19].

Dla belek-ścian o stosunku $a/d=2.5$ pojawienie się pierwszego ukośnego zarysowania zaobserwowano przy obciążeniu równym ok. 30-35% obciążenia niszczonego. W przypadku belek-ścian o wysokości przekroju równym 58.4cm i 106.7cm obraz zarysowania charakteryzował się nielicznym formowaniem się równoległych do siebie rys ukośnych, a był wręcz zdominowany przez jedną główną rysę ukośną, czyli typowym zniszczeniem dla zwykłych belek (rys. 3.40). Natomiast w przypadku belki-ściany o wysokości przekroju $h=190.5\text{cm}$ charakter zarysowania nieco odbiegał od poprzednich belek-ścian z mniejszą wysokością przekroju, gdyż obecne były również równoległe rysy ukośne. Zachowanie się tych belek wskazuje iż przejście między belką-ścianą a belką zwykłą istotnie zależy w stosunku do a/d .

Na rysunku 3.41 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości na ścinanie (znormalizowana przez wytrzymałość betonu na ściskanie) od wysokości użytecznej. Jak możemy zaobserwować,

znormalizowania wytrzymałość na ścinanie zmniejszała się wraz ze wzrostem wysokości użytecznej badanych belek-ścian. Co oznacza, że wytrzymałość na ścinanie nie wzrasta proporcjonalnie ze zwiększającą się wysokością użyteczną, zwłaszcza w przypadku belek-ścian o smukłości $a/d < 2.0$. Wyniki te są zgodne z wcześniejszymi badaniami przeprowadzonymi przez Walraven'a i Lehwalter'a 1994 [20] oraz Tan i Lu 1999 [21]. Dla belek smukłych ($a/d > 2.0$) wpływ wysokości na zmniejszanie się wytrzymałości jest już wyraźnie mniejszy.



Rys. 3.41 Zależność eksperymentalnej wytrzymałości na ścinanie od wysokości użytecznej badanych belek-ścian [19], (1 in = 2.54 cm).

Na podstawie uzyskanych wyników, autorzy wyciągnęli wnioski, że o wytrzymałości na ścinanie belek-ścian nie decyduje wysokość użyteczna przekroju. Nośność na ścinanie determinowana jest przez wytrzymałość na ściskanie obszarów węzłowych, wytrzymałość ściskanego krzyżulca i od siły w rozciągającym pasie (*tension tie*). Zatem projektowana wytrzymałość na ścinanie belek-ścian powinna uwzględniać wyżej wymienione parametry zmienne, dlatego też autorzy proponują stosowanie np. metody S-T do analizy belek-ścian.

Na podstawie wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań, autorzy odnotowali następujące obserwacje i zależności:

1. Wytrzymałość na ścinanie belek-ścian ($a/d < 2.0$) nie rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem wysokości przekroju. Odkrycie to dowodzi, że podejścia projektowe oparte na przekrojach jak dla typowych belek zwykłych są nieodpowiednie dla belek-ścian.
2. Porównanie nośności eksperymentalnej belek-ścian ($a/d < 2.0$) z ich obliczoną nośnością na podstawie modelu S-T nie ujawniło negatywnego efektu wraz z rosnącą wysokością przekroju. Autor uważa zatem, iż belki-ściany powinny być projektowane za pomocą modeli S-T uwzględniających warunki naprężeń w obszarach węzłowych.
3. Nie odnotowano niekorzystnego wpływu wysokości belek-ścian na wielkość obciążenia rysującego dla rysy ukośnej. Dla serii badań przeprowadzonych przy $a/d = 2.5$ odnotowano zmniejszenia obciążenia powodującego zarysowanie ukośne przy wzroście wysokości belek od 1067 do 1905 mm (od 42" do 75").
4. Wpływ wysokości przekroju w odniesieniu do szerokości rysy ukośnej został zmniejszony, gdy wysokość przekroju osiągnęła 1067 mm (42"). Maksymalna szerokość rysy ukośnej przy zadanym poziomie obciążenia miała tendencję do zwiększania się wraz ze wzrostem wysokości belki-ściany z



584 do 1067 mm (z 23" do 42"), ale nie była już obserwowana przy wzroście wysokości przekroju z 1067 do 1905 mm (z 42" do 75").

Proestos, Bentz i Collins, 2018

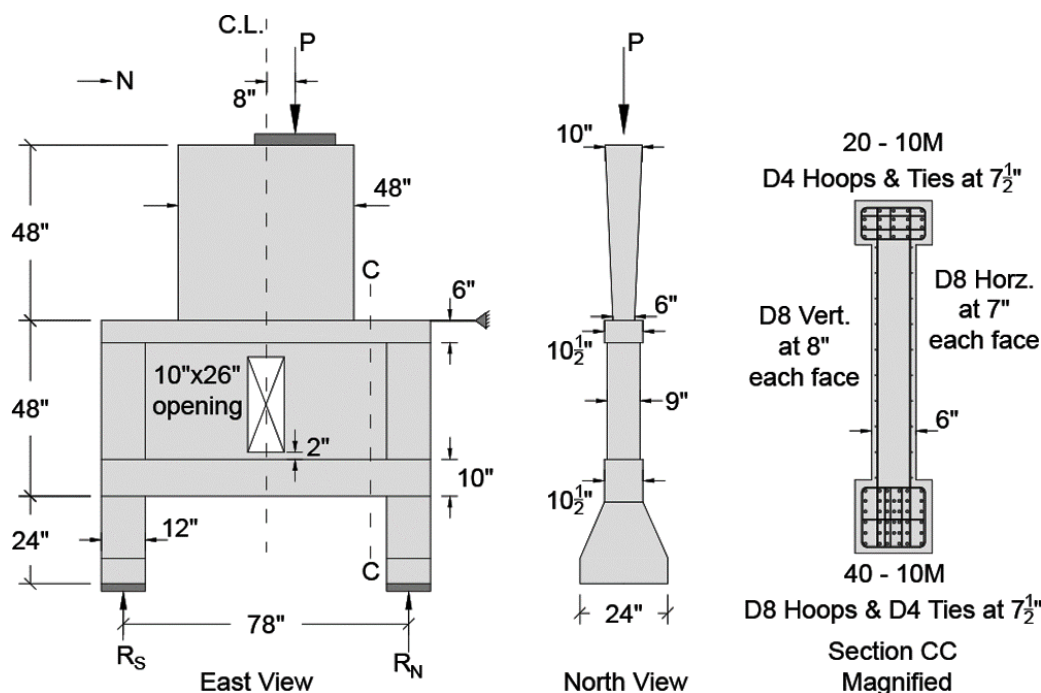
Badania przeprowadzone przez *Proestos, Bentz i Collins* na Uniwersytecie w Toronto [22] miały ocenić w jaki sposób wytrzymałość betonu, ilość zbrojenia na ścinanie oraz stosunek smukłości ścinania a/d wpływają na maksymalne naprężenia ścinające. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych czterech belek-ścian, w tym jednego modelu dźwigara wykonanego w skali 1:5 (rys. 3.42) i porównano ich maksymalną nośność na ścinanie z granicznymi wielkościami proponowanymi przez normę ACI [N2], AASHTO-LRFD [N4] i CSA [N5]. Oprócz czterech nowych eksperymentów omówiono wyniki 127 badań dostępnych w literaturze, które charakteryzowały się wysokimi wartościami naprężeń ścinających przy zniszczeniu.



Rys. 3.42 Model dźwigara na stanowisku badawczym, wykonany w skali 1:5.

Badany dźwigar (*transfer girder*) jednoprzęsłowy ze stosunkiem $a/d = 0.721$, badany był w połączeniu z podpierającymi słupami, dolną i górną belką, a także ścianą górnej kondygnacji, jak pokazano na rys. 3.47. W środku przęsła dźwigara tarczowego wykonano dodatkowo otwór drzwiowy. Ten skomplikowany element powierzchniowy miał odzwierciedlać pracę dźwigarów dolnych kondygnacji budynków wielokondygnacyjnych, na które oddziałują duże siły tnące ze stosunkowo małą smukłością ścinania.

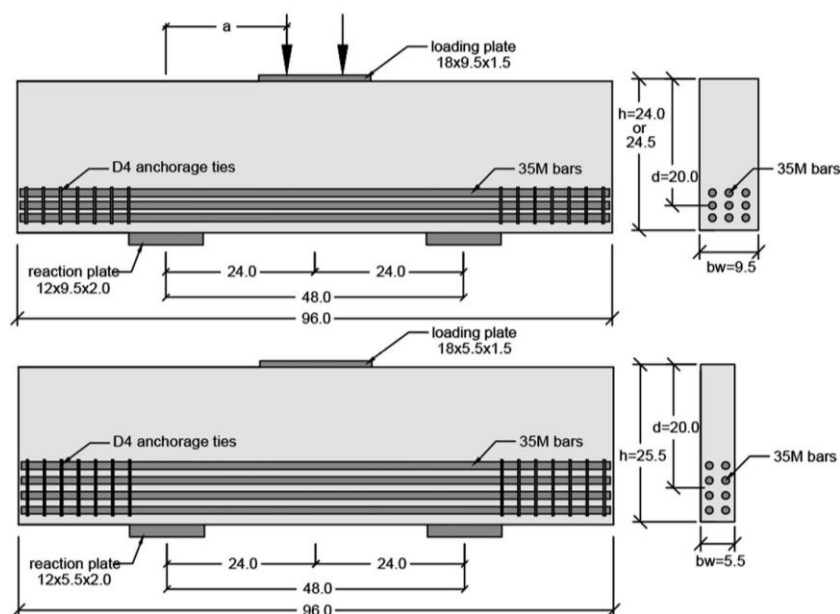
W celu odzwierciedlenia jednoczesnego działania sił pionowych od obciążeń grawitacyjnych oraz sił poziomych powodujących największe siły ścinające, dźwigar obciążono pionową siłą P przesuniętą względem linii środkowej otworu drzwiowego o ok. 20 cm. Pionowa siła ścinająca w przekroju C-C (rys. 3.43) wynosiła $0.58P$. Stopień zbrojenia belki dolnej wynosił 5.90%, natomiast belki górnej 4.92%. Z kolei stopień zbrojenia środknika dźwigara wynosił 0.38% w kierunku poziomym i 0.33% w kierunku pionowym. Wytrzymałość betonu na ściskanie zmierzona na próbkach cylindrycznych (150x300 mm) dla dźwigara wynosiła 38.4 MPa.



Rys. 3.43 Szczegóły modelu dźwigara żelbetowego [19] (1 in = 2.54 cm).

Maksymalna nośność utrzymana podczas badań była o ponad dwa razy wyższa od granicznej wielkości uzyskanej zgodnie z ACI [N2] i 1.23 większa od maksymalnej wartości obliczonej zgodnie z AASHTO [N4]. Autorzy zwrócili uwagę, iż w niektórych przypadkach górna granica ACI [N2] jest zbyt konserwatywna nie tylko dla elementów betonowych o wysokiej wytrzymałości, ale także dla betonów o zwykłej wytrzymałości.

Oprócz badania wielkowymiarowego dźwigara, wykonano dodatkowe trzy belki-ściany o smukłości ścinania równej 0.975, wykonane z betonu o wytrzymałości na ściskanie mieszczącej się w przedziale od 38.4 MPa do 91.3 MPa. Sposób zbrojenia belek-ścian został przedstawiony na rys. 3.44.

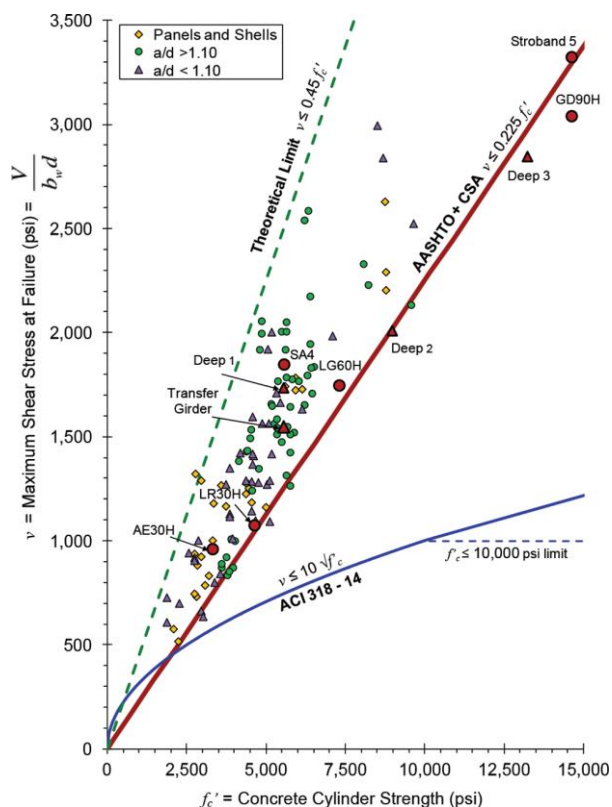


Rys. 3.44 Zbrojenie dodatkowych belek-ścian [19]: a) belki-ściany 1 i 2 (Deep Beam 1,2), b) belka-ściana 3 (Deep Beam 3) (1 in = 2.54 cm).

Na rys. 3.45 przedstawiono maksymalne naprężenia tnące uzyskane podczas badań eksperymentalnych, oznaczonych na wykresie: Transfer Girder, Deep 1, Deep 2, Deep 3 oraz wartości

uzyskane z pozostałych badań obcych zaczerpniętych z literatury dla paneli i powłok, belek mocno zbrojonych o stosunku $a/d > 1.10$ oraz dla belek-ścian przy $a/d < 1.10$ m.in. badania *Leonhardta* i *Walthera* 1962 [3], *Smith* i *Vantsiotis* 1982 [23], *Tan* i *Lu* 1999 [21], *Yang* i inni 2003 [24]. Na wykresie oznaczono również graniczne nośności ścinania przyjęte według *ACI* [N2] oraz *AASHTO* [N4] i *CSA* [N5]. Graniczne naprężenie tnące, zgodnie z *ACI* [N2] jest funkcją pierwiastka kwadratowego wytrzymałości charakterystycznej (cylindrycznej) betonu i wynosi $10\sqrt{f'_c}$ z górną granicą 1000 psi (6,90 MPa) dla elementów bez zbrojenia poprzecznego. Natomiast graniczna wartość naprężeń tnących według *AASHTO* [N4] i *CSA* [N5] jest liniową funkcją wytrzymałości betonu i wynosi $0,225 f'_c$.

Z wykresu można wnioskować, że prosta liniowa zależność $v \leq 0,225 f'_c$ między maksymalną wytrzymałością na ścinanie a wytrzymałością betonu na ściskanie sugerowana przez normy *AASHTO* [N4] i *CSA* [N5] zapewnia dobre oszacowanie. Dla 131 wyników eksperymentalnych średni stosunek wytrzymałości do wielkości proponowanych wg *AASHTO* [N4] i *CSA* [N5] wynosił 1,31 przy współczynniku zmienności równym 17,6%, natomiast przy porównaniu do wartości uzyskanych zgodnie z *ACI* [N2] wynosił 2,06 przy współczynniku zmienności 22,2%.



Rys. 3.45 Maksymalne naprężenia tnące w zależności od wytrzymałości betonu na ściskanie [19].

Norma *ACI* [N2] dobrze przewiduje maksymalne naprężenia dla elementów o wytrzymałości f'_c równej ok. 20 MPa, jednak wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie zgodność wyników z propozycją *ACI* jest coraz gorsza i dla elementów o wytrzymałości f'_c większej niż 45,2 MPa średni stosunek naprężeń ścinających z badań do wartości normowych wynosi aż 2,55. Autorzy zwracają uwagę, iż górna granica nośności ścinania *ACI* [N2] nie zmieniła się przez 55 lat, a wytrzymałość betonu konstrukcyjnego w ostatnich latach znacznie wzrosła i obecnie stosuje się beton o wytrzymałości przekraczającej niekiedy 100 MPa.

Autorzy zasugerowali, aby równania ACI 318-14 [N2] (9.9.2.1) i (22.5.1.2), które ograniczają wytrzymałość na ścinanie, zastąpić poniższym równaniem (5), które jest liniową funkcją wytrzymałości betonu na ściskanie, a nie pierwiastka kwadratowego wytrzymałości betonu.

$$V_u \leq 0.225 f'_c b_w d \quad (3.5)$$

gdzie:

- V_u – maksymalna siła w przekroju
- f'_c – charakterystyczna wytrzymałość betonu [psi],
- b_w – szerokość środka [in],
- d – wysokość użyteczna przekroju [in].

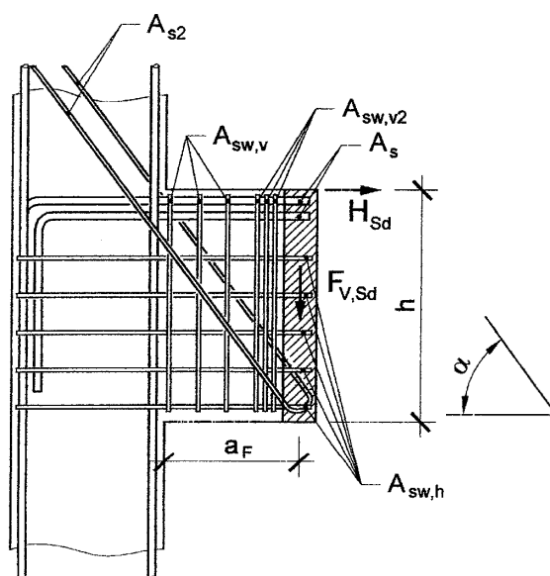
Dodatkowo sugerują nie wprowadzać górnej granicy f'_c oraz tę samą zależność stosować zarówno do elementów ze zbrojeniem na ścinanie jak i bez. Proponowane zmiany są zgodne z obecnymi zaleceniami według normy AASHTO-LRFD [N4] i CSA [N5].

Autorzy, na podstawie przeprowadzonych badań oraz wyników 127 innych badań dostępnych w literaturze wykazali, że górna granica naprężeń tnących wynosząca $0,225 f'_c$ zapewnia dobre oszacowanie maksymalnej nośności na ścinanie, takich elementów jak np. dźwigary tarczowe, elementy o małej smukłości ścinania lub wykonane z betonu o wysokiej wytrzymałości. Z kolei norma ACI [N2], w przypadku wyżej wymienionych elementów konstrukcyjnych, nie doszacowuje ich wytrzymałości na ścinanie, co może prowadzić do projektowania mało wydajnych konstrukcji w obszarach, które zwykle stanowią wyzwanie dla projektantów.

3.2 Ujęcia normowe

3.2.1 PN-B-03264:2002

Wytyczne projektowe zamieszczone w normie *PN-B-03264:2002* [N7], nie dotyczą bezpośrednio tarcz wspornikowych, lecz odnoszą się do wymiarowania wsporników słupa z obciążeniem działającym w sposób pośredni - wzdłuż całej wysokości (rys.3.46).



Rys. 3.46 Zbrojenie wspornika słupa obciążonego na wysokości [N7].

Przedstawiony na rysunku 3.46 schemat zbrojenia wspornika [N7], uwzględniał przyjęcie zbrojenia ukośnego (A_{s2}) i zbrojenia pionowego podwieszającego ($A_{sw,v2}$), jak również udział prętów poziomych w przenoszeniu obciążenia $F_{V,sd}$ – zarówno prętów górnych (A_s) jak i rozłożonych równomiernie po wysokości wspornika strzemion poziomych ($A_{sw,h}$).

W normie [N7], zgodnie z punktem 9.4.1.2 *Projektowanie zbrojenia – wsporniki obciążone po wysokości*, przyjęto, że zbrojenie poziome przy górnej krawędzi wspornika A_s powinno być zwymiarowane na działanie momentu zginającego od zadanego obciążenia na wysokości $F_{V,sd}$, z uwzględnieniem działania poziomej siły H_{sd} :

$$A_s \geq \frac{1}{f_{yd}} \left(F_{V,sd} \frac{a}{z} + H_{sd} \right) \quad (3.6)$$

gdzie:

$$a = a_F + 0.5a_1$$

$$a_1 = \frac{F_{V,sd}}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd} \cdot b}$$

$$\alpha_{cc} = 0.85$$

$$a_2 = d - \sqrt{d^2 - 2a_1a}$$

$$z = d - 0.5a_2$$

Z kolei ukośne zbrojenie podwieszające A_{s2} powinno spełniać warunek:

$$A_{s2} \geq \frac{1}{f_{yd}} \left(\frac{0.5F_{V,sd}}{\sin \alpha} \right) \quad (3.7)$$

gdzie,

α – kąt nachylenia zbrojenia ukośnego do poziomu; $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$.

Strzemiona poziome $A_{sw,h}$ rozłożone równomiernie po wysokości wspornika powinny być zwymiarowane na siłę równą $0.5F_{V,sd}$:

$$A_{sw,h} \geq \frac{0.5F_{V,sd}}{f_{ywd}} \quad (3.8)$$

Natomiast, przy krawędzi obciążającej wspornik, należy umieścić pionowe strzemiona podwieszające $A_{sw,v2}$ przejmujące siłę nie mniejszą niż $0.5F_{V,sd}$:

$$A_{sw,v2} \geq \frac{0.5F_{V,sd}}{f_{ywd}} \quad (3.9)$$

W przypadku wspornika słupa o $a_F/h > 0.6$ należy dodatkowo umieścić zbrojenie pionowe $A_{sw,v}$ równomiernie rozłożone na całym odcinku od krawędzi słupa do wewnętrznej krawędzi belki zawieszanej:

$$A_{sw,v} \geq \frac{0.3F_{V,sd}}{f_{ywd}} \quad (3.10)$$



3.2.2 PN-EN 1992-1-1:2008

Norma PN-EN 1992-1-1:2008 [N8] (PN-EN:2008, Eurokod 2) podaje jedynie ogólne zasady obliczania nośności belek-ścian. Tarcze żelbetowe, należące do obszarów w których rozkład naprężeń jest nieliniowy, tzw. *obszary typu D* charakteryzują się nieciągłością kształtu lub nieciągłością oddziaływania. Zazwyczaj przyjmuje się, że obszar niejednorodny rozpościera się na odległość równą wysokości przekroju elementu od nieciągłości która go wywołała (patrz. p. 5.6.4 [N8]). W elementach tarczowych dotyczą one najczęściej całego lub prawie całego modelu obliczeniowego. Zgodnie z p. 9.9 PN-EN:2008 obszary typu D należy obliczać na podstawie modeli ST wg p. 6.5 [N8].

Metoda analizy *Strut and Tie (ST)* należy do analizy plastycznej konstrukcji i opiera na twierdzeniu o dolnej granicy nośności (metoda statyczna), w którym rozpatruje się pola naprężeń spełniające warunki równowagi i kontroluje czy należą one do bezpiecznych pól naprężeń w całej konstrukcji. Analiza konstrukcji modelami ST opiera się na wyodrębnieniu ściskanych prętów *S* (betonowe krzyżulce), rozciąganych prętów *T* (zbrojenie) i łączących je różnego typu węzłów z odpowiednio zakotwionym zbrojeniem. Projektowanie za pomocą modeli ST wiąże się z wyznaczeniem sił w wyodrębnionych elementach modelu ST i tym samym sprowadza się do rozwiązania warunków równowagi sił i obciążeń w stanie granicznym nośności. PN-EN:2008 podaje również, że wszystkie modele ST można optymalizować, jednak w praktyce jest to zadanie dosyć trudne i czasochłonne [25]. W normie tej nie znajdziemy natomiast żadnych przykładowych modeli ST w odniesieniu do belek-ścian, w tym również tarcz wspornikowych, tak jak zostało to przedstawione np. dla wsporników belkowych (patrz p. 10.9.4.6 *Złącza elementów podciętych*, rys. 10.4 [N8]) czy wsporników słupa (*Załącznik J*, rys. J.5 [N8]).

Drugą metodę wymiarowania żelbetowych tarcz, działających w płaskim stanie naprężeń podaje *Załącznik F* PN-EN:2008 [N8]. Polega ona na wyznaczeniu w każdym punkcie tarczy głównych naprężeń rozciągających f_{tdx} i f_{tdy} , odpowiednio wzdłuż osi x i y , które powinny zostać przeniesione przez zbrojenie oraz na sprawdzeniu naprężeń w betonie σ_{cd} , które nie powinny przekraczać wartości $v f_{cd}$ (za wielkość v można przyjmować według [N8] wartość równą $0.6(1-f_{ck}/250)$).

W warunkach konstrukcyjnych dla żelbetowych belek-ścian, które zostały podane w p. 9.7 PN-EN:2008 [N8] z uwzględnieniem późniejszej poprawki PN-EN:2008/AC:2011 [N9] odnajdziemy jedynie zalecenie odnośnie zbrojenia tarczy w postaci ortogonalnej siatki prętów, dla której minimalne pole przekroju $A_{s,dbmin}$, powinno spełniać warunek:

$$A_{s,dbmin} = 0,001A_c, \text{ ale nie mniej niż } 150 \text{ mm}^2/\text{m}, \quad (3.11)$$

gdzie: A_c – pole przekroju betonu.

Natomiast odległość między prętami siatki nie powinna przekraczać 300 mm i podwójnej grubości tarczy. Dodatkowo norma wspomina o konieczności odpowiedniego zakotwienia zbrojenia rozciąganego w węzłach modeli ST, a w przypadku gdy odległość od węzła do krawędzi elementu nie jest wystarczająca do zapewnienia długości l_{bd} , sugeruje stosować „*zaginanie prętów, haki w kształcie litery U lub urządzenia kotwiące*”. PN-EN [N8] nie podaje żadnych szczegółowych warunków konstrukcyjnych dotyczących tarcz wspornikowych.



3.2.3 ACI 318-19

Amerykańska norma *ACI 318-19* [N4], podobnie jak *Eurokod 2* [N8], nie zawiera obecnie szczegółowych wymagań dotyczących projektowania belek-ścian, a podstawowe wytyczne zawarto w rozdziale 9.9 *Deep beams* [N4]. Zwraca jedynie uwagę, iż przy projektowaniu tarcz należy uwzględnić nieliniowy rozkład odkształceń, dla którego analiza ST (*Strut-and-tie models*) opisana w rozdziale 23 [N4], jest jak najbardziej odpowiednia. W rozdziale *Strut-And-Tie Models* normy *ACI 318-19* [N4] nie znajdziemy jednak przykładowych modeli dotyczących belek-ścian.

W celu ograniczenia szerokości zarysowania przy obciążeniu użytkowym, jak również uniknięcia zmiażdżenia ściskanych krzyżulców betonowych w normie [N4] podano warunek, jaki powinny spełniać wymiary projektowanej belki-ściany:

$$V_u \leq \phi 10 \sqrt{f_c'} b_w d \quad (3.12)$$

gdzie:

- ϕ – współczynnik redukcji wytrzymałości,
- f_c' – wytrzymałość betonu w stanie jednoosiowego ściskania [psi],
- b_w – szerokość przekroju [in],
- d – wysokość użyteczna przekroju [in].

Norma amerykańska [N4] odnosząc się do warunków konstrukcyjnych dla belek-ścian podaje również wymagania odnośnie minimalnej powierzchni zbrojenia rozmieszczonego na powierzchni tarczy w kierunku pionowym A_v i poziomym A_{vh} , które należy stosować niezależnie od przyjętej metody wymiarowania:

$$A_v \geq 0.0025 b_w s \quad (3.13)$$

$$A_{vh} \geq 0.0025 b_w s_2 \quad (3.14)$$

gdzie:

- s – rozstaw zbrojenia w kierunku poprzecznym,
- s_2 – rozstaw zbrojenia w kierunku podłużnym.

Wymagana ilość zbrojenia poziomego i pionowego jest taka sama z uwagi na ograniczenia szerokości i propagacji zarysowania ukośnego. Do zrównaniu poziomów stopni zbrojenia (w tym na korzyść zbrojenia pionowego) przyczyniły się badania *Rogowsky'ego* i *MacGregor'a* z 1986r. [17], które wykazały że zbrojenie pionowe jest bardziej efektywne w przypadku wytrzymałości na ścinanie niż zbrojenie poziome. We wcześniejszym wydaniu amerykańskiej normy z 1983r. (*ACI 318-83* [N2]), sugerowano że w belkach-ścianach zbrojenie poziome jest zawsze bardziej skuteczne.

Rozstaw zbrojenia w obu kierunkach nie powinien być większy od wielkości $d/5$ (d – wysokość użyteczna przekroju) i 12 in (ok. 300 mm).

3.2.4 Model Code 2010,

Model Code 2010 [N6] (MC2010) również nie odnosi się bezpośrednio do wymiarowania i konstruowania belek-ścian. Nie znajdziemy w niej żadnych procedur obliczeniowych dotyczących nośności, a jedyny zapis możemy odnaleźć w p. 7.2.1 [N6], gdzie belki-ściany zaklasyfikowane są jako typowe obszary typu D, co należy uwzględnić przy projektowaniu.



3.3 Podsumowanie

Zagadnienia zachowania się żelbetowych tarcz w stanie granicznym nośności możliwe jest do rozpoznania w wyniku prowadzonych badań eksperymentalnych, stanowiących podstawę poznania charakteru pracy tarczy w fazie II, na tle analizy morfologii rys i nośności granicznej. Stan graniczny wyężenia i nośności tarcz uzależniony jest w dużej mierze od siły ścinającej, a jak wiemy ze studiów literatury omawiających przypadek „zwykłych” belek, ścinanie jest jednym z najbardziej skomplikowanych zagadnień teorii żelbetu [20, 21]. W związku z tym, obserwować możemy coraz to nowe badania doświadczalne, uwzględniające wpływ różnorodnych czynników zmiennych i umożliwiające tym samym dokładniejszą i prawidłową ocenę zarysowania oraz nośności żelbetowych tarcz, niezbędną do racjonalnego wymiarowania. Parametry zmienne w badaniach tarcz są zróżnicowane i dotyczą m.in. rodzaju i kształtu zbrojenia, zróżnicowanej geometrii tarcz, schematów statycznych i obciążeń oraz wytrzymałości betonu i stali.

Przeprowadzone studium literatury w zakresie badań eksperymentalnych dotyczących żelbetowych tarcz, wykazały iż jednym z głównych parametrów wpływających na zarysowanie i nośność jest smukłość ścinania (a/d) oraz sposób ukształtowania zbrojenia. W niniejszej dysertacji (p. 3.1) skupiono się na przedstawieniu prac omawiających wyniki badań eksperymentalnych żelbetowych tarczowych układów przestrzennych oraz tarcz wspornikowych, a także zaprezentowano wybrane wyniki badań tarcz jednoprzęsłowych i ciągłych, które dotyczyły oceny wpływu wskaźnika ścinania i ukształtowania zbrojenia na charakter zniszczenia i nośność badanych belek-ścian.

Jak wykazano, zalecenia projektowe sformułowane przez *Leonhardta* [1] dotyczące m.in. projektowania żelbetowych tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości stosowane są do dnia dzisiejszego i służą za podstawę do projektowaniu tego typu elementów w przypadku stosowania zbrojenia ortogonalnego z prętami ukośnymi.

Należy również podkreślić, iż omówione w p. 3.2 niniejszej dysertacji wytyczne aktualnych norm amerykańskich [N4] jak i europejskich [N8] nie podają szczegółowych wytycznych do projektowania i konstruowania żelbetowych tarcz m.in. tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości. W normie polskiej PN-B-03264:2002 [N7], która precyzyjnie omawiała wymiarowanie wsporników słupa czy wsporników belkowych, przedstawiając jednoznaczne modele kratownicowe uwzględniające wskaźnik ścinania a/d i sposób przykładanego obciążenia, również brakuje odniesienia się do wymiarowania żelbetowych tarcz. Jedyny najbliższe zagadnienie poruszane w normie [N7] odnosi się do propozycji przyjmowania zbrojenia we wspornikach słupa obciążonych po wysokości. Wobec tak przyjętego schematu obciążenia oraz mając na uwadze, iż krótkie wsporniki analizowane są najczęściej w płaskim stanie naprężenia, możliwa jest weryfikacji przytoczonych wyżej zaleceń [N7] z wynikami wsporników tarczowych obciążonych po wysokości.

W porównaniu do znacznej ilości prac eksperymentalnych wykonanych na belkach-ścianach jedno lub dwuprzęsłowych, badań doświadczalnych żelbetowych układów tarczowych, jak również tarcz wspornikowych jest stosunkowo niewiele. Dlatego też, autorka pracy podjęła tematykę rozpoznania zachowania się przestrzennych węzłów tarczowych wraz z tarczą wspornikową obciążoną po wysokości, z myślą, iż przeprowadzone badania eksperymentalne pozwolą na lepsze rozpoznanie zachowania się tych elementów oraz zweryfikują dotychczasowe zalecenia literaturowe dotyczące wymiarowania [1], [2].

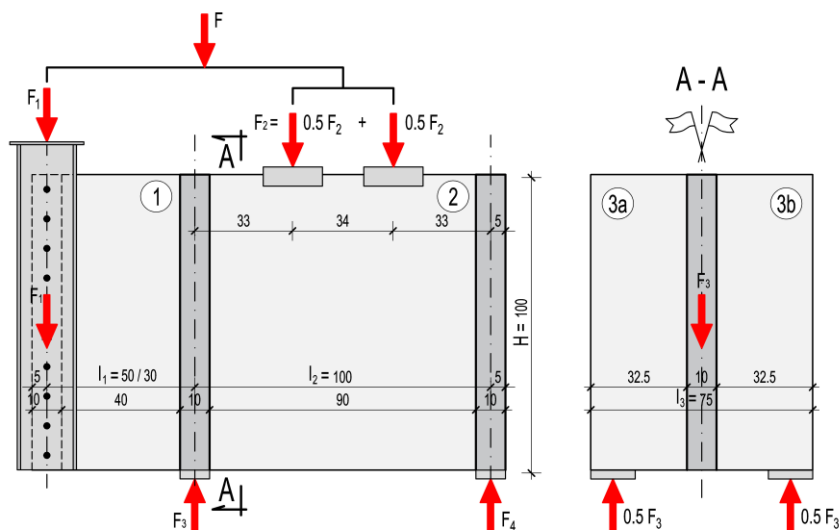
4 BADANIA EKSPERYMENTALNE WŁASNE

W celu eksperymentalnego określenia efektywności zbrojenia odgiętego w tarczach wspornikowych o smukłości mniejszej niż 1.0 (przyjętego według zaleceń Leonhardta [1]), jak również sprawdzenia możliwości zastosowania jedynie zbrojenia ortogonalnego w układach tarczowych ze wspornikiem obciążonym po wysokości, przeprowadzono własne badania przestrzennych układów tarczowych.

4.1 Zakres i program badań

Badania eksperymentalne obejmowały cztery przestrzenne układy tarczowe wykonane w skali zbliżonej do naturalnej. Każdy z badanych układów (*rys. 4.1*) składał się ze swobodnie podpartej tarczy poprzecznej i zawieszanej na niej tarczy podłużnej wraz z tarczą wspornikową, co stanowiło w sumie 12 zróżnicowanych pojedynczych tarcz płaskich. Jak już wspomniano w *Rozdziale 1* niniejszej rozprawy, głównymi parametrami zmiennymi przyjętymi w programie badawczym były: smukłość tarczy wspornikowej oraz zróżnicowane ukształtowanie zbrojenia tarczy wspornikowej i poprzecznej. Dla każdego badanego układu przyjęto następującą numerację poszczególnych tarcz:

- (1) – tarcza wspornikowa,
- (2) – tarcza podłużna,
- (3) – tarcza poprzeczna, lewa część – (3a) i prawa część – (3b), patrząc od strony tarczy przęsłowej.



Rys. 4.1 Schemat statyczny badanych układów tarczowych wraz z numeracją tarcz płaskich (wymiały w [cm]).

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w *Laboratorium Katedry Konstrukcji Inżynierskich na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej*. Badania wykonano w dwóch seriach badawczych.

I etap badań obejmował dwa układy tarczowe ze smukłością tarczy wspornikowej $l_1/H = 0.5$, zbrojone ortogonalnie (DB I-0.5) lub ortogonalnie z prętami ukośnymi (DB II-0.5). W II etapie, badaniom poddano kolejne dwa układy tarczowe z przyjętą smukłością tarczy wspornikowej równą 0.3

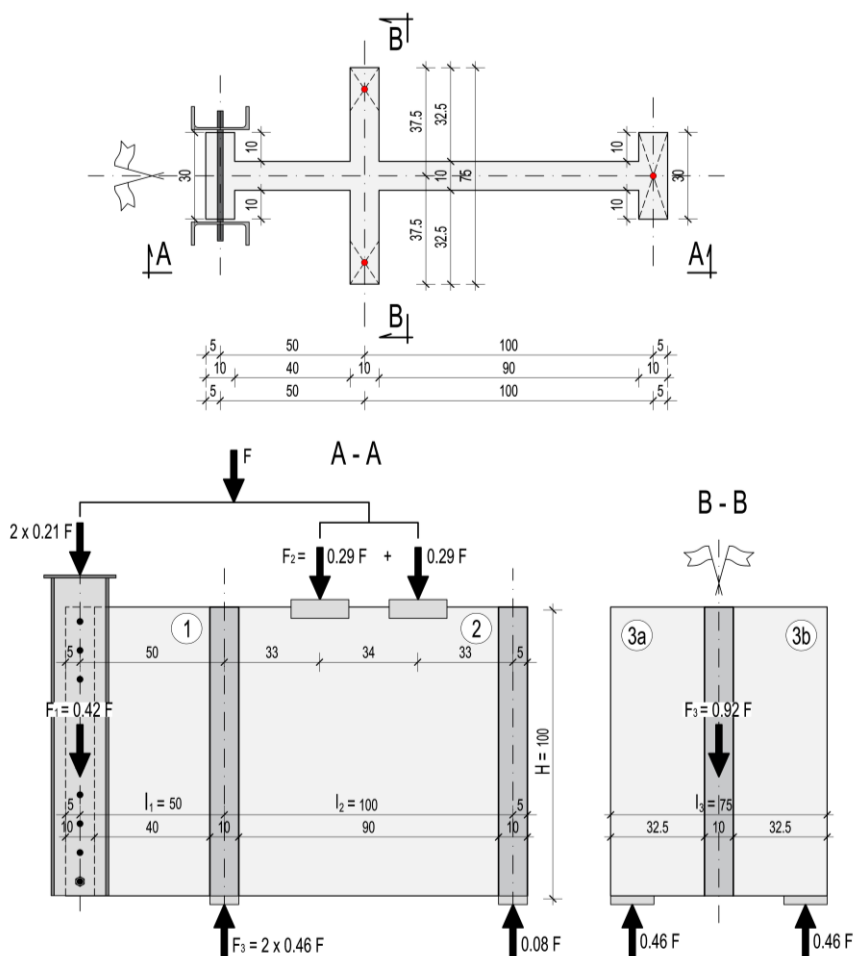
oraz zróżnicowanym kształtem zbrojenia: siatka ortogonalna (DB I-0.3) i zbrojenie mieszane – ortogonalne z prętami ukośnymi (DB II-0.3).

Zestawienie przyjętych oznaczeń dla badanych układów tarczowych oraz poszczególnych tarcz przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Zestawienie oznaczeń badanych tarcz.

Seria badawcza	Układ tarczowy	Parametry zmienne		Rodzaj tarczy		
		Smukłość tarczy wspornikowej l_1/H	Typ zbrojenia	Tarcza wspornikowa (1)	Tarcza podłużna (2)	Tarcza poprzeczna (3)
seria I	DB-0.5	DB I-0.5	ortogonalne	DB I-0.5 (1)	DB I-0.5 (2)	DB I-0.5 (3)
		DB II-0.5	mieszane	DB II-0.5 (1)	DB II-0.5 (2)	DB II-0.5 (3)
seria II	DB-0.3	DB I-0.3	ortogonalne	DB I-0.3 (1)	DB I-0.3 (2)	DB I-0.3 (3)
		DB II-0.3	mieszane	DB II-0.3 (1)	DB II-0.3 (2)	DB II-0.3 (3)

4.1.1 Geometria badanych elementów

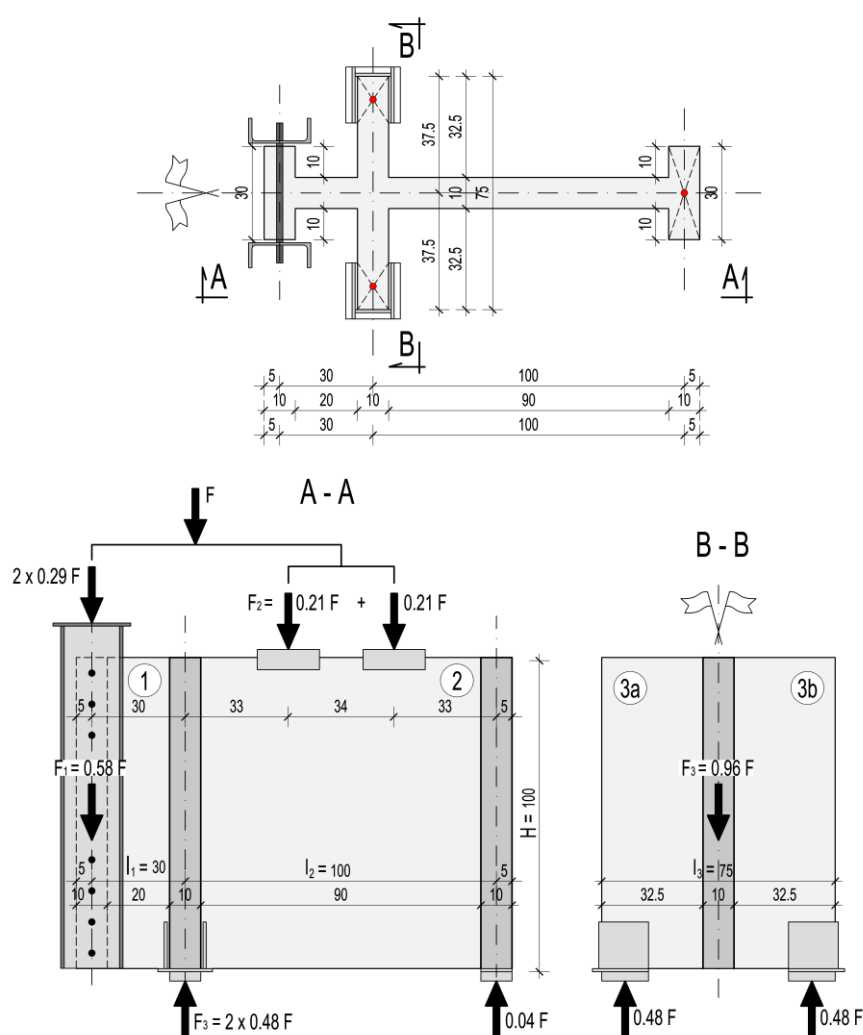


Rys. 4.2 Geometria badanych układów tarczowych DB-0.5 (seria I) z tarczą wspornikową o smukłości $l_1/H = 0.5$ (wymiarów w [cm]).

Przyjęte wymiary tarcz, uwarunkowane możliwościami technicznymi prasy wytrzymałościowej Walter+Bai A.G. wynosiły: wysokość $H = 100$ cm, grubość $b = 10$ cm, rozpiętość tarczy podłużnej $l_2 = 100$ cm oraz tarczy poprzecznej $l_3 = 75$ cm. Wysięg wspornika tarczy, jako jeden z głównych parametrów zmiennych wynosił $l_1 = 50$ lub 30 cm (mierzony od osi przyłożenia obciążenia do osi podparcia).

Kształt i wymiary modeli badawczych wraz ze schematem podparcia i obciążenia podano na rysunkach 4.2 (seria I) i 4.3 (seria II). W obu seriach badawczych, miejsca przyłożenia sił oraz podparcia założono w tych samych punktach.

Ponieważ w I serii badawczej wyczerpanie nośności nastąpiło poprzez nagłe zniszczenie strefy podporowej tarczy poprzecznej, pomimo spełnionych warunków normowych [N4], [N7], [N8] w II serii badań zdecydowano się na dodatkowe wzmocnienie podparcia ze spawanych profili stalowych grubości 10 mm.



Rys. 4.3 Geometria badanych układów tarczowych DB-0.3 (seria II) z tarczą wspornikową o smukłości $l_1/H = 0.3$ (wymiar w [cm]).

4.1.2 Zbrojenie

Do wymiarowania tarcz przyjęto stan naprężenia uzyskany od założonego obciążenia całkowitego $F = 1200$ kN, wykorzystując obliczenia statyczne przeprowadzone metodą elementów skończonych (MES) w stanie sprężystym, spełniając kryterium minimalnej powierzchni zbrojenia

zgodnie z PN-EN:2008 [N5]. Zbrojenie tarcz wspornikowych i poprzecznych układów DB II-0.5 i DB II-0.3 z prętami ukośnymi przyjęto według zaleceń projektowych Leonhardta [1].

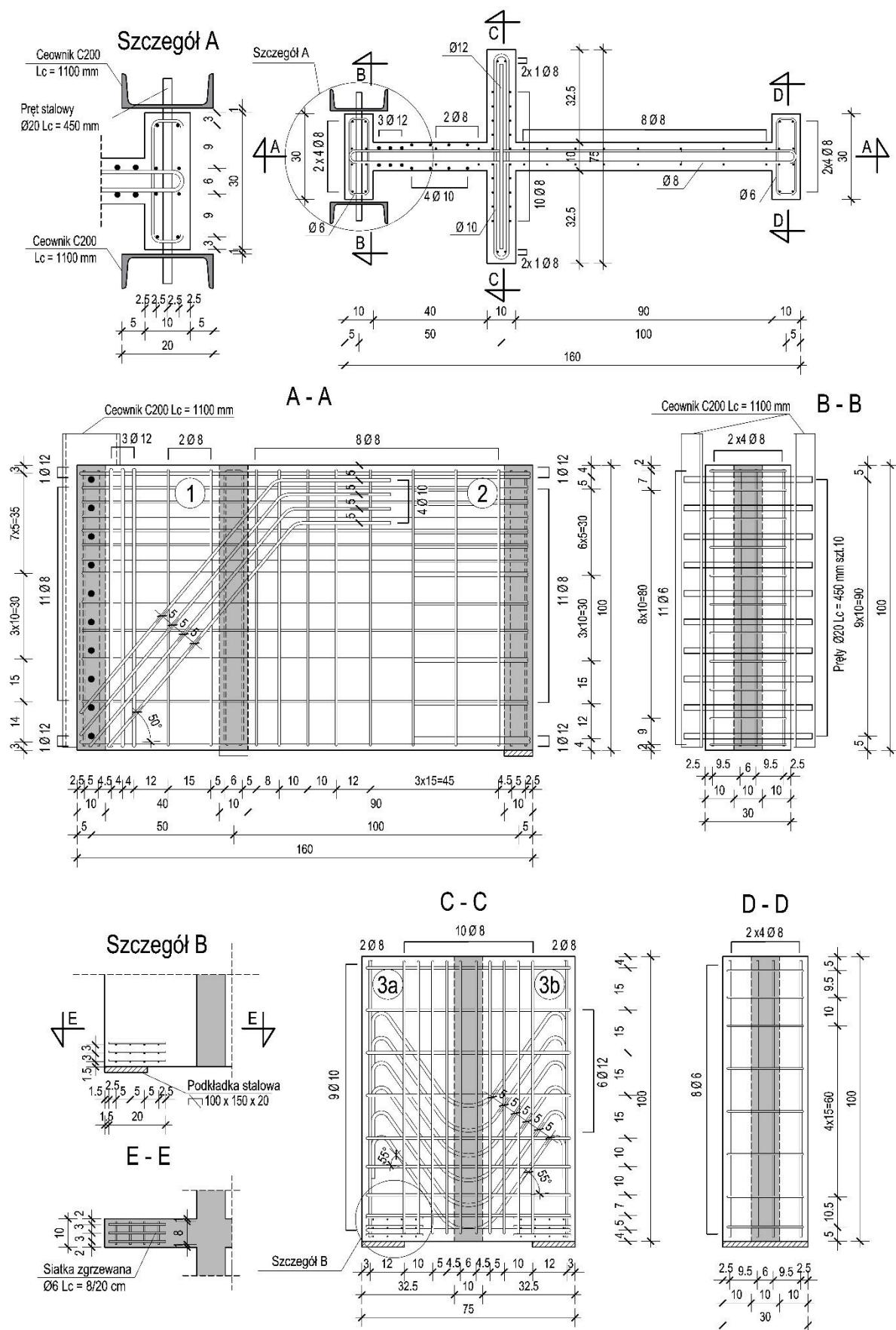
W tarczy wspornikowej, przyjęte zbrojenie miało za zadanie przenieść siłę F_1 , czyli obciążenie rozłożone wzdłuż całej wysokości wspornika. W tarczy poprzecznej, zbrojenie zostało dobrane w taki sposób, aby było w stanie przenieść obciążenie F_3 działające wzdłuż całej wysokości, od zawieszanej tarczy wspornikowej i podłużnej.

Do zbrojenia żelbetowych układów tarczowych zastosowano pręty żebrowane o średnicy $\phi 8$, 10 i 12 mm. W celu uniknięcia lokalnego zmiażdżenia betonu w strefie podporowej tarcz poprzecznych zastosowano dodatkowe zbrojenie z uwagi na docisk w postaci zgrzewanych siatek o średnicy prętów 6 mm. We wszystkich tarczach zbrojenie pionowe wykonano w postaci strzemion zamkniętych. Zbrojenie poziome w tarczy podłużnej i wspornikowej wykonano w postaci pętli, natomiast w tarczy poprzecznej w postaci zamkniętych strzemion. Pręty ukośne tarcz wspornikowych wykonano w postaci pętli zakotwionych poziomo w górnej części tarczy podłużnej. Z kolei w poprzecznych tarczach, pręty ukośne kotwiono pionowo przy krawędzi zewnętrznej. Szczegóły zbrojenia badanych węzłów tarczowych przedstawiono na kolejnych rysunkach 4.4-4.10.

▪ *Seria I – układ tarcz DB-0.5*

Układ tarcz DB I-0.5 zbrojony był ortogonalnie (rys. 4.4). Górne poziome zbrojenie główne tarczy wspornikowej, jak i dolne zbrojenia tarczy podłużnej i poprzecznej stanowiły dwa pręty $\phi 12$. W tarczy wspornikowej, pozostałe zbrojenie poziome (rozłożone po wysokości), jak również zbrojenie pionowe podwieszające, miało średnicę $\phi 8$ mm. W tarczy podłużnej zbrojenie poziome i pionowe także zostało wykonane z prętów o średnicy $\phi 8$ mm. W tarczy poprzecznej przyjęto poziome strzemiona zamknięte $\phi 10$ mm oraz pionowe podwieszające zbrojenie $\phi 8$ mm. Dodatkowe zbrojenie w miejscu oddziaływania reakcji nad podporami tarczy poprzecznej wykonano w postaci trzech warstw siatek zgrzewanych o średnicy $\phi 6$ mm, spełniających wymogi normy PN-EN 1992-1-1:2008 [N8] oraz PN-B-03264:2002 [N7] w zakresie nośności na docisk.

Układ tarcz DB II-0.5 ze zbrojeniem mieszanym, zbrojony był ortogonalnie z dodatkowymi prętami ukośnymi (rys. 4.5). W tarczy wspornikowej ukośne zbrojenie przyjęto w postaci czterech prętów odgiętych ($4 \times 2\phi 10$), nachylonych do płaszczyzny poziomej pod kątem $\alpha = 50^\circ$ oraz pręty podwieszające ($3 \times 2\phi 12$) rozmieszczone na długości równej dwóch grubości tarczy ($2t$) od jej krawędzi zewnętrznej. Tak przyjęte zbrojenie ukośne i pionowe miało przenosić całkowitą siłę F_1 rozłożoną po wysokości wspornika zgodnie z zaleceniami [1], według których pionowe pręty podwieszające powinny przejąć $0.6 F_1$, natomiast ukośne pręty $0.4 F_1 / \sin \alpha$ (α – kąt nachylenia zbrojenia ukośnego względem osi poziomej). Tarczę (3) zaprojektowano, przyjmując zamknięte strzemiona pionowe o średnicy $\phi 8$ i pręty odgięte ($6\phi 12$) o średnicy gięcia równej 20ϕ , nachylone do poziomu pod kątem 55° zgodnie z kierunkami naprężeń głównych przyjętych według MES. Pozostałe zbrojenie dla węzła tarczowego DB II-0.5 przyjęto identycznie jak dla układu DB I-0.5.



Rys. 4.5 Zbrojenie przestrzennego układu tarcz DB II-0.5 (wymiały w [cm]).

Przygotowane przestrzenne szkielety zbrojenia ortogonalnego układu tarcz DB I-0.5 oraz zbrojenia mieszanego (pręty ortogonalne i ukośne) układu tarcz DB II-0.5 zostały przedstawione na rysunkach 4.6 i 4.7.



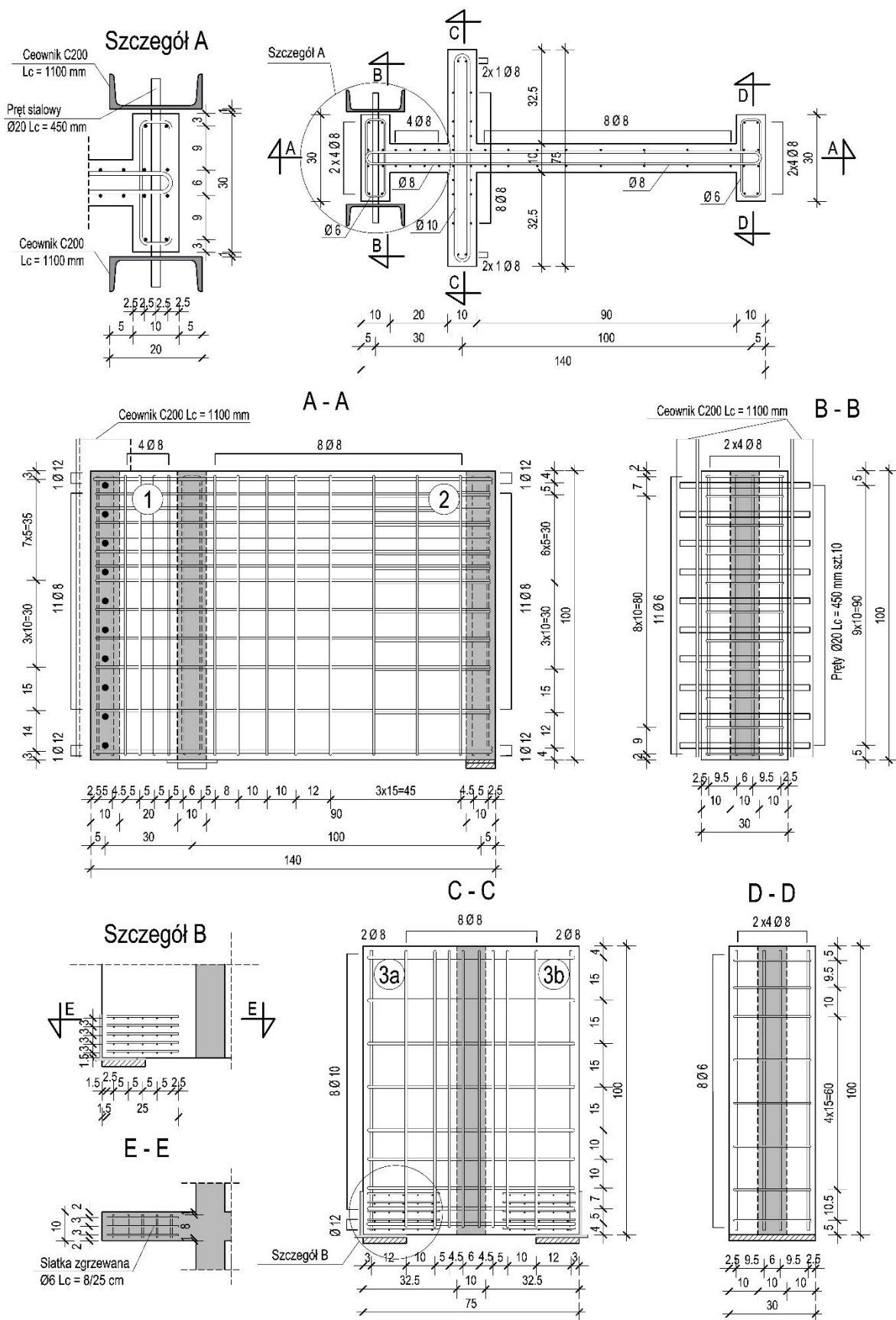
Rys. 4.6 Zbrojenie układu tarczowego DB I-0.5.



Rys. 4.7 Zbrojenie układu tarczowego DB II-0.5.

▪ *Seria II – układ tarcz DB-0.3*

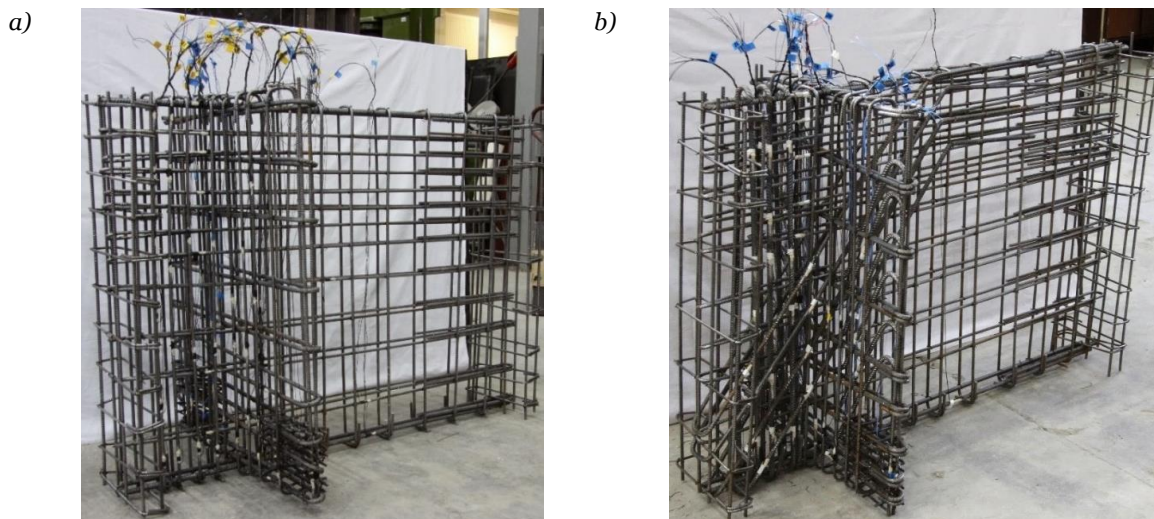
Zbrojenie układów tarczowych wykonanych w II serii badań (rys. 4.8 i 4.9), ze zmniejszoną smukłością ścinania tarczy wspornikowej do 0.3, zostało przyjęte jak dla tarcz z I serii badań, uwzględniając redukcję liczby niektórych prętów pionowych oraz długość prętów poziomych z uwagi na zmniejszoną rozpiętość tarczy wspornikowej do $l_1 = 30$ cm. Dodatkowo, chcąc uniknąć wyczerpania nośności w obszarach podporowych tarczy poprzecznej (które miało miejsce w I serii badań), oprócz zastosowania wspomnianego wcześniej (s. 80) zewnętrznego wzmocnienia stalowego, przyjęto zwiększoną liczbę warstw siatek zgrzewanych o średnicy 6 mm.



Rys. 4.8 Zbrojenie przestrzennego układu tarcz DB I-o.3 (wymiary w [cm]).



Przygotowane przestrzenne szkielety zbrojenia ortogonalnego układu tarcz DB I-0.3 oraz zbrojenia mieszanego układu tarcz DB II-0.3 zostały przedstawione na rysunku 4.10.



Rys. 4.10 Zbrojenie przestrzennego układu tarczowego: a) DB I-0.3, b) DB II-0.3 .

4.1.3 Materiały

Beton

Mieszanekę betonową zaprojektowano zgodnie z aktualnie obowiązującymi normami PN-EN 206-1 [N10] (seria I) i PN-EN 206:2014 [N11] (seria II) o klasie konsystencji S5 z uwagi na trudnodostępny, przestrzenny kształt elementów badawczych i przyjętą pozycję pionową do betonowania. Współczynnik w/c wynosił 0.5, natomiast wielkość ziaren kruszywa ograniczono do 8 mm.

Wytrzymałość betonu na ściskanie określono zgodnie z PN-EN 12390-3:2011 [N12], w chwili badań tarcz, na co najmniej 10 próbkach sześciennych o boku 150 mm i przynajmniej 10 próbkach walcowych Ø150/300 mm dla każdej serii badawczej. Próbkę walcową i sześcienną przygotowano zgodnie z PN-EN 12390-1:2013 [N13]. Współczynnik zmienności wytrzymałości, niezależnie od serii badawczej i kształtu próbek, był mniejszy od 7%. Wyniki badania wytrzymałości betonu przedstawiono poniżej w tabeli 4.2.

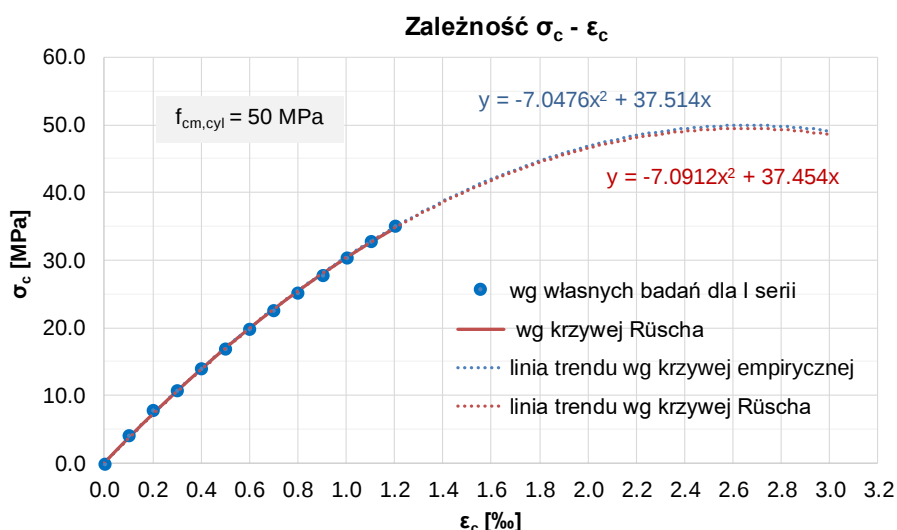
Tabela 4.2 Wytrzymałość betonu na ściskanie.

Seria badawcza	$f_{cm,cube}$	$V_{fcm,cube}$	$f_{cm,cyl}$	$V_{fcm,cyl}$
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
I seria	66.0	4.8	50	6.4
II seria	62.5	5.2	43	5.7

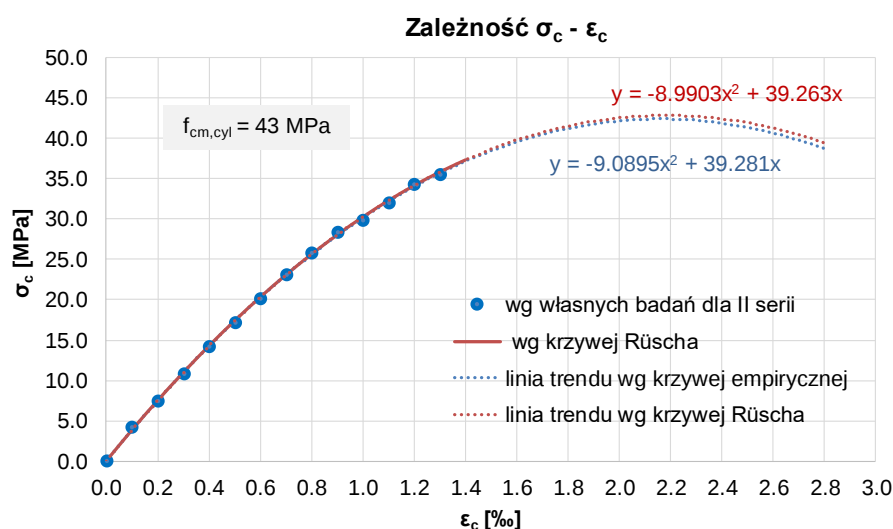
Ponadto za pomocą modułomierza wyznaczono zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ na podstawie badań co najmniej pięciu próbek walcowych Ø150/300 mm. Mając wyznaczone punkty pomiarowe opisujące relację naprężenie – odkształcenie, przyjęto krzywą $\sigma_c - \varepsilon_c$ dla każdej serii badawczej (rys. 4.11 i 4.12) stosując aproksymację metodą najmniejszych kwadratów. Na podstawie krzywej empirycznej określono początkowy moduł sprężystości E_{co} . Wyznaczono również odkształcenia ε_{ci} odpowiadające największej wartości naprężeń, czyli $f_{cm,cyl}$. Stosując się do wytycznych zawartych w p.3.1.5 [N8] określono przybliżoną wartość średniego siecznego modułu sprężystości betonu E_{cm} , będącego wartością tangensa kąta nachylenia siecznej między $\sigma_c = 0$ i $0.4 f_{cm}$.

W celach porównawczych, oprócz zależności empirycznej $\sigma_c - \varepsilon_c$ wyznaczono również krzywą zaproponowaną przez Rüscha [26] (rys. 4.3 i 4.4) według zależności (4.1), przyjmując za E_{c0} i ε_{c1} wartości wyznaczone na podstawie krzywej empirycznej.

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{E_{c0}\varepsilon - \frac{f_c}{\varepsilon_{c1}^2}\varepsilon^2}{1 + \frac{E_{c0}\varepsilon_{c1} - 2f_c}{f_c\varepsilon_{c1}}\varepsilon} \quad (4.1)$$



Rys. 4.11 Zależność naprężenie-odkształcenie betonu wyznaczona dla I serii badań.



Rys. 4.12 Zależność naprężenie-odkształcenie betonu wyznaczona dla II serii badań.

Jak można zauważyć na powyższych wykresach (rys. 4.11 i 4.12) obie funkcje opisujące zależność naprężenie σ_c – odkształcenie ε_c dla badanego betonu są do siebie bardzo zbliżone.

Wielkości ε_{c1} oraz E_{cm} obliczono również na podstawie Tablicy 3.1 [N8] stosując się do zamieszczonych poniżej wzorów 4.2 i 4.3.

$$\varepsilon_{c1} = 0.7f_{cm}^{0.31} \quad (4.2)$$

$$E_{cm} = 22(0.1f_{cm})^{0.3} \quad (4.3)$$

Wszystkie obliczone wielkości dotyczące odkształcalności betonu zestawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Odkształcalność betonu.

Seria badawcza	Moduł E_{co}		Odkształcenia ε_{c1}			Moduł E_{cm}		
	$E_{co,exp}$	$E_{co,Riisch}$	$\varepsilon_{c1,exp}$	$\varepsilon_{c1,Riisch}$	$\varepsilon_{c1,EC2}$	$E_{cm,exp}$	$E_{cm,Riisch}$	$E_{cm,EC2}$
	[GPa]	[GPa]	[%]	[%]	[%]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
I seria	37.5	37.4	2.7	2.6	2.4	33.7	33.2	35.7
II seria	39.3	39.3	2.2	2.2	2.2	34.5	34.8	34.1

Moduły sprężystości E_{cm} w obu seriach badawczych były do siebie bardzo zbliżone (ok. 34 GPa) pomimo różnic w wielkościach wytrzymałości na ściskanie.

Stal

Zbrojenie w danej serii badawczej wykonano z jednej partii stali. Do zbrojenia tarcz użyto stali żebrowanej o gatunku *B500SP* o średnicach 8, 10, 12 mm. Do zbrojenia siatek ułożonych w miejscach nad podporami zastosowano pręty o średnicy $\phi 6$. W tabeli 4.4 podano wartości granicy plastyczności poszczególnych prętów zbrojeniowych.

Tabela 4.4 Granica plastyczności f_y stali zbrojeniowej

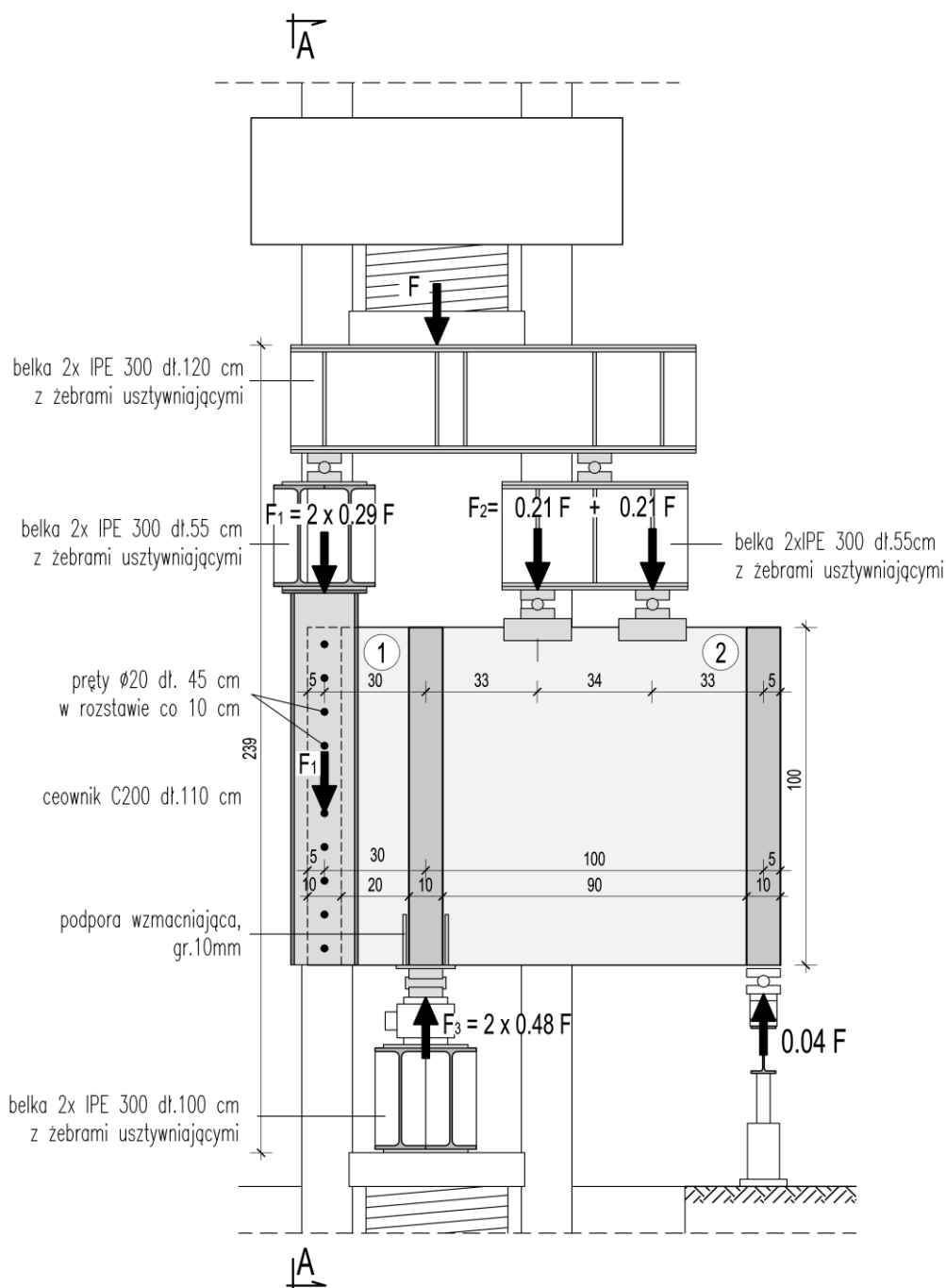
Seria badawcza	$\phi 6$	$\phi 8$	$\phi 10$	$\phi 12$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
I seria	568	582	534	556
II seria	564	560	564	585

4.1.4 Stanowisko badawcze i przebieg badań

Przyjęty w badaniach sposób obciążenia tarczy wspornikowej wymagał zaprojektowania specjalnego stanowiska badawczego. Stanowisko to zostało przyjęte odrębnie dla układu tarcz o określonej smukłości ścinania oraz dostosowane do możliwości prasy wytrzymałościowej szwajcarskiej firmy *Walter+Bai A.G.* o zakresie obciążeń do 5000 kN i maksymalnej wysokości elementu do 3 mb. Na rysunkach 4.13 i 4.14 przedstawiono schemat stanowiska dla *II serii badań* z tarczą wspornikową o smukłości $l_t/H = 0.3$.

Główne elementy stanowiska badawczego, oprócz samych przestrzennych układów tarczowych, stanowiły stalowe belki dwuteowe oraz zaprojektowany układ pionowych ceowników wraz z dospawanymi do nich po wysokości poziomymi stalowymi sworzniami (średnicy $\phi 20$ w rozstawie co 10 cm) mających na celu przeniesienie pośredniego obciążenia na tarczę wspornikową.

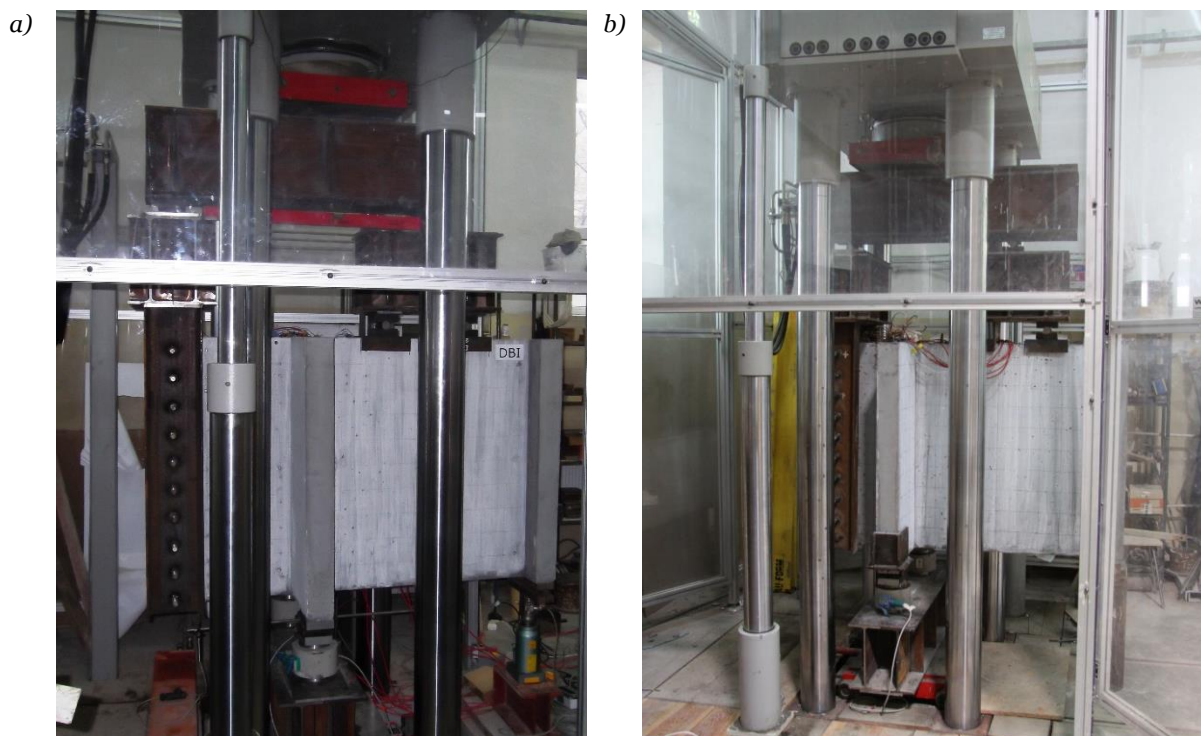
Całkowita wysokość stanowiska, wraz z badanym elementem, wynosiła 239 cm. Złożony układ żelbetowych tarcz oraz rozmieszczenie stalowych masywnych elementów nad, a także pod elementem badawczym stanowiły spore utrudnienie i wyzwanie w realizacji stanowiska. W *II serii badań*, umiejscowienie węzła tarczowego z krótkim wspornikiem tarczowym uwarunkowane było również uwzględnieniem istniejących słupów od maszyny wytrzymałościowej, w taki sposób, by nie przesłaniały widoku tarczy wspornikowej do wykonania niezbędnych pomiarów podczas prowadzonych badań. W związku z tym dostępne warunki techniczne stanowiły pewnego rodzaju ograniczenie w doborze ścieżki przekazania sił na poszczególne tarcze.



Rys. 4.13 Schemat stanowiska badawczego dla II serii badań (układ tarcz DB-0.3).

Każdy układ tarczowy umieszczony na stanowisku badawczym obciążany był siłą wypadkową F . Siła ta, poprzez stalowe belki teowe przekazywana była w postaci dwóch sił skupionych $2 \times 0.5F_2$ na górną krawędź tarczy przeszłowej i równocześnie poprzez belki teowe, ceowniki oraz poziome, równomiernie rozmieszczone sworznie, rozkładała obciążenie wzdłuż całej wysokości wspornika. Na tarczę poprzeczną - po jej wysokości - przekazywana była siła pośrednia F_3 (pochodząca z zawieszanej do niej tarczy przeszłowej i wspornikowej), wywołując reakcję podporową po obu stronach tarczy. Na końcu tarczy jednoprzęsłowej ze wspornikiem zgodnie z rozkładem układu sił powstawała niewielka reakcja, która dla każdej serii badawczej nie przekraczała $0.1 F$.

Przykładowe węzły tarczowe z I i II serii badań eksperymentalnych, przygotowane na stanowisku badawczym przedstawiono na poniższym rysunku 4.15.



Rys. 4.15 Widok stanowisko badawczego: a) I seria badań – układ tarcz DB I -0.5, b) II seria badań – układ tarcz DB II-0.3.

4.2 Zakres i metodyka pomiarów

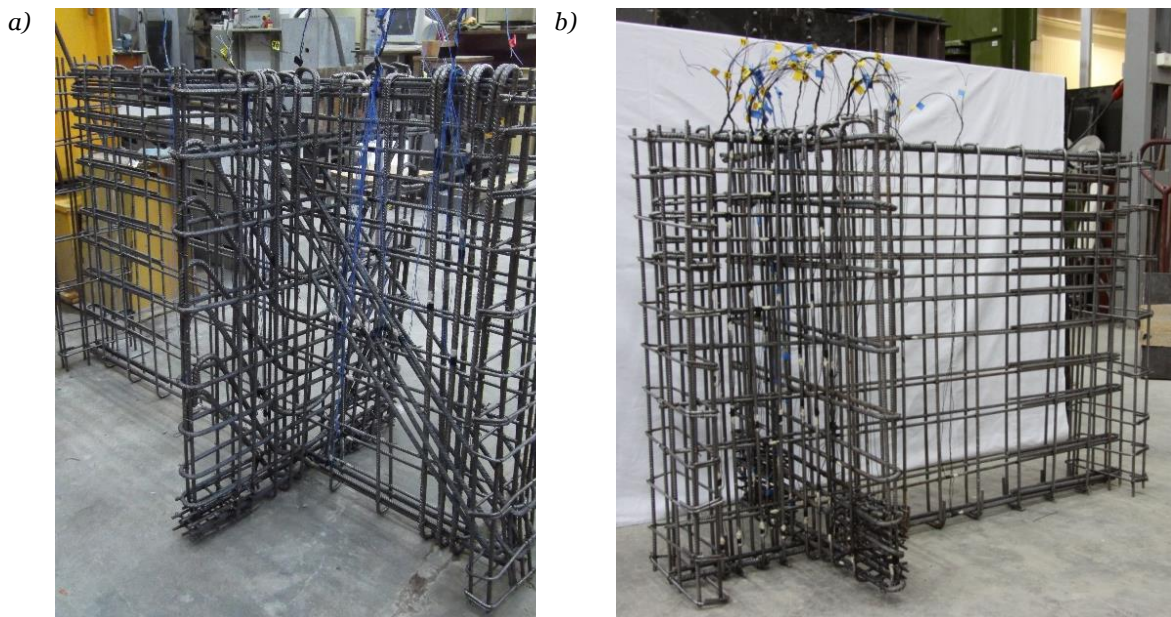
Podczas obciążania układów tarczowych prowadzone były następujące pomiary: odkształcenie stali zbrojeniowej, odkształcenie powierzchni betonowej, szerokości rozwarcia rys wraz z rejestracją morfologii zarysowania oraz przemieszczenia pionowe dolnej krawędzi poziomej.

4.2.1 Odkształcenia stali

Pomiar odkształceń stali zbrojeniowej dokonywany był dla każdego poziomego obciążenia. Rejestracja odbywała się automatycznie, a wyniki były wyświetlane na bieżąco podczas badań, co umożliwiało kontrolne sprawdzenie „stanu wyężenia” badanych układów tarczowych podczas przyrastającego obciążenia. Odkształcenia stali zbrojeniowej mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych typu *Vishay EA-06 240LZ_120/E* o długości 10 mm i długości bazy pomiarowej równej 6.1 mm. Stała tensometryczna k wynosiła $2,08 \pm 0.5\%$, a oporność $120 \Omega \pm 0.3\%$.

Większość pomiarów tensometrycznych nakierowana była na uzyskaniu wielkości odkształceń zbrojenia dla tarczy wspornikowej i poprzecznej. W I serii badań zastosowano ok. 30 tensometrów dla każdego z obydwu układów tarczowych. W II serii badawczej (z uwagi na posiadanie większych środków finansowych) zwiększono tę liczbę dwukrotnie, czyli na każdy układ tarczowy przypadało 60 tensometrów. Lokalizacja punktów pomiarowych w elementach tarczowych odpowiadała obszarom, w których to spodziewano się największych koncentracji naprężeń. Ze względu na przyjęte zróżnicowane zbrojenie tarcz punkty pomiarowe rozmieszczono indywidualnie dla każdego elementu. Na rysunku 4.16

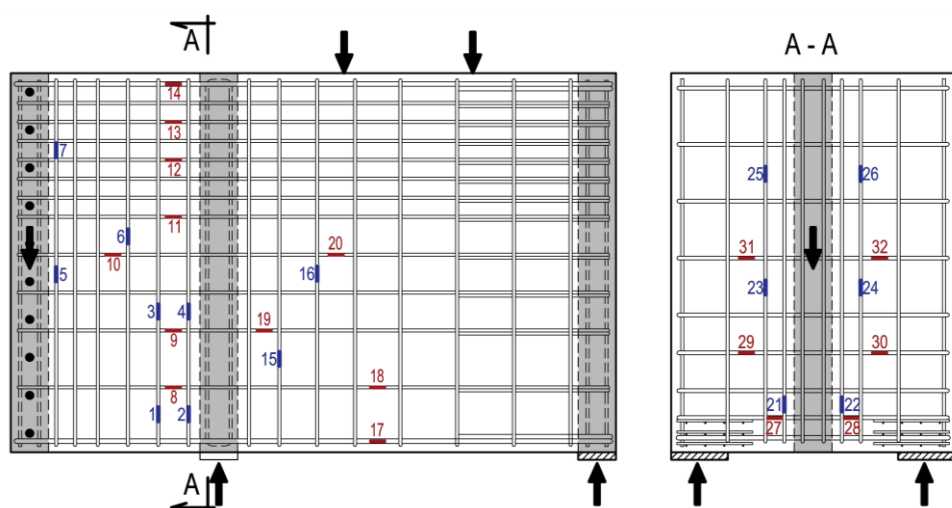
przedstawiono dla wybranych układów tarczowych naklejone i zabezpieczone tensometry z podłączonymi przewodami doprowadzającymi.



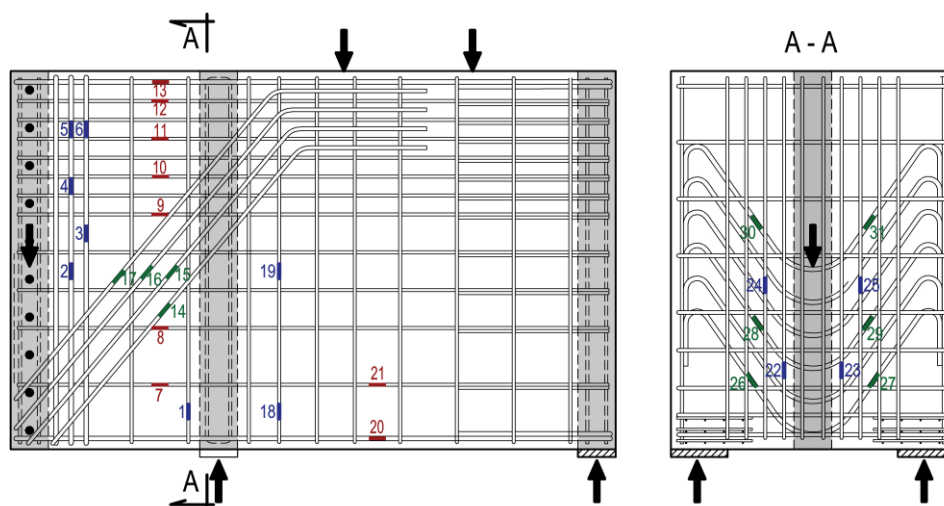
Rys. 4.16 Przygotowane tensometry na siatce zbrojeniowej z wyprowadzonymi przewodami w układzie tarczowym: a) DB II-0.5, b) DB I-0.3.

Na kolejnych rysunkach 4.17 - 4.20 przedstawiono lokalizację tensometrów na prętach zbrojeniowych wraz z przyjętą numeracją dla wszystkich badanych węzłów tarczowych: kolorem **niebieskim** zostały oznaczone tensometry na zbrojeniu pionowym, kolorem **czerwonym** – tensometry na zbrojeniu poziomym, a kolorem **zielonym** – tensometry mierzące odkształcenia prętów ukośnych.

▪ *Seria I – układ tarcz DB-0.5*

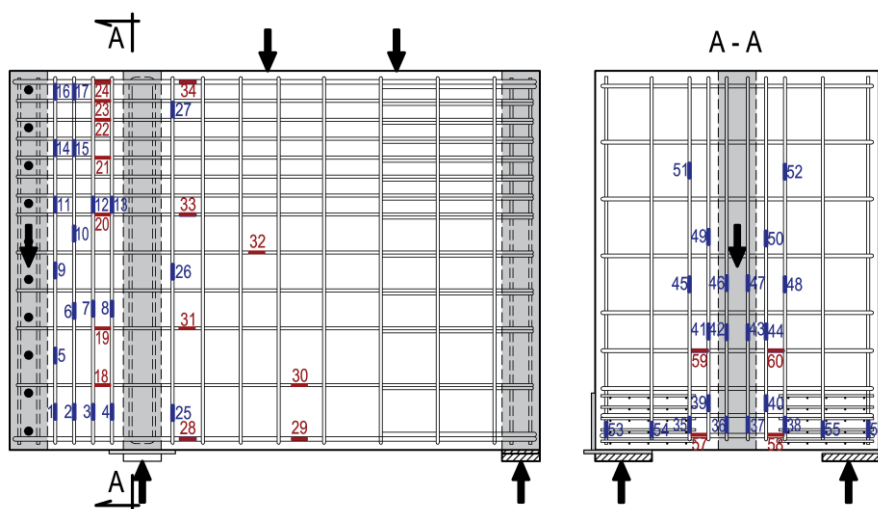


Rys. 4.17 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB I-0.5

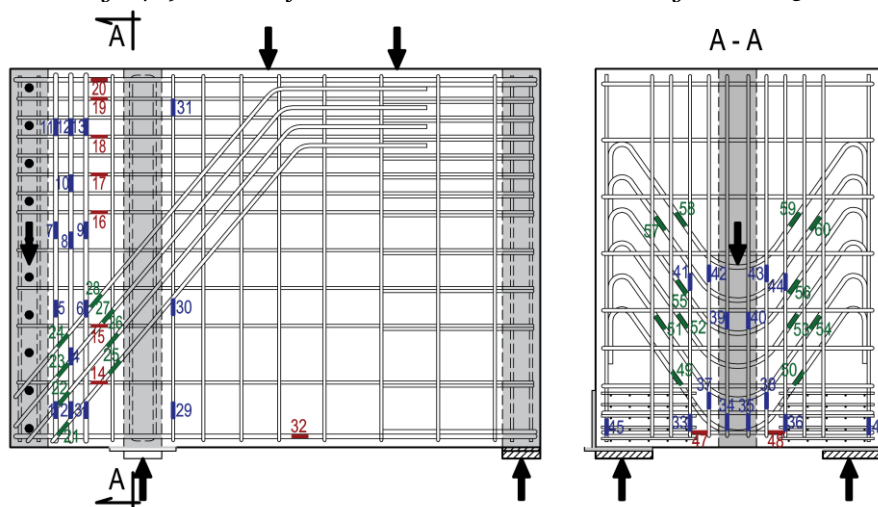


Rys. 4.18 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB II-0.5.

▪ *Seria II – układ tarcz DB-0.3*



Rys. 4.19 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB I-0.3.

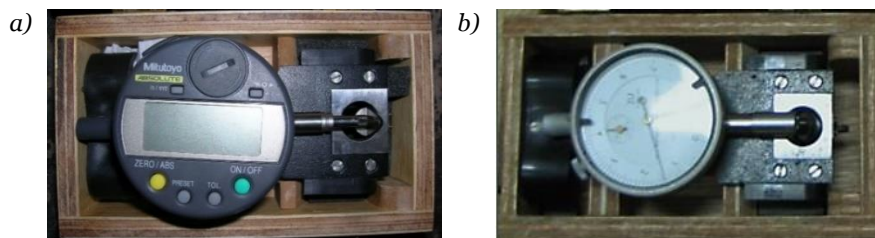


Rys. 4.20 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB II-0.3.

4.2.2 Odształcenia betonu

Tensometria mechaniczna

W obu seriach badawczych do pomiaru odkształceń betonu na powierzchni bocznej tarcz zastosowano tensometrię mechaniczną przy użyciu ekstensometru firmy *Mayes Instruments Limited* z odczytem cyfrowym (rys. 4.21a) Baza pomiarowa wynosiła 100 mm, a dokładność odczytu była mierzona do 0.001 mm co odpowiadało odkształceniu jednostkowemu 0.805×10^{-5} .

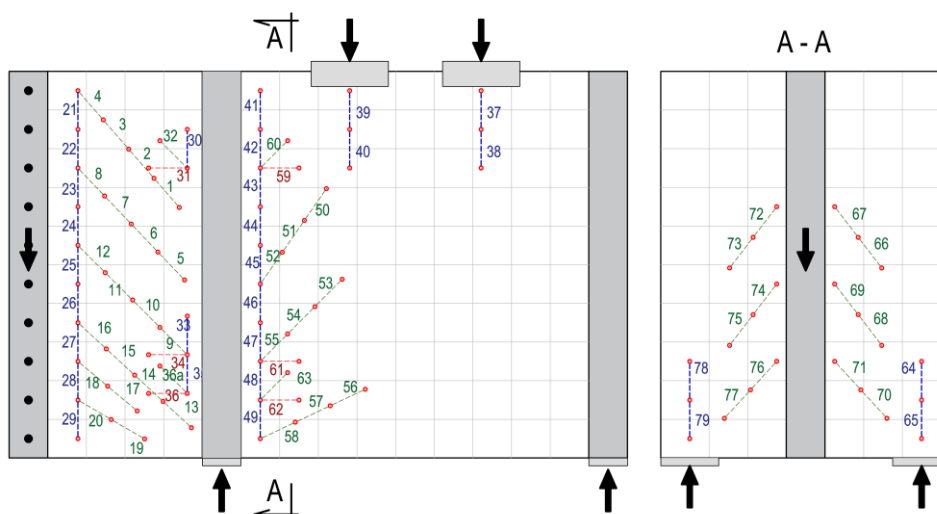


Rys. 4.21 Ekstensometr do pomiaru odkształceń betonu z czujnikiem a) elektronicznym, b) zegarowym.

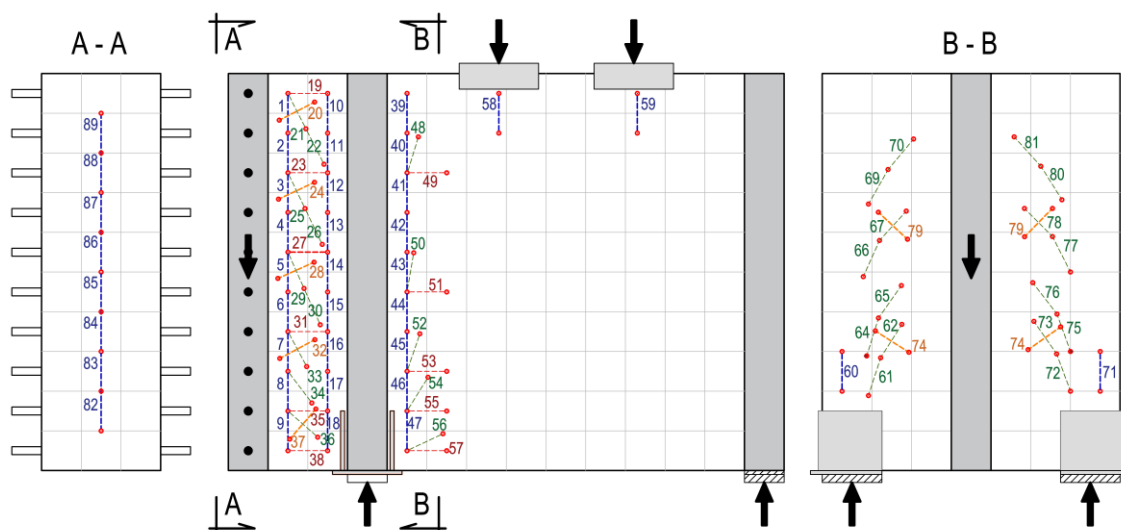
W II serii badawczej posłużono się również dodatkowo ekstensometrem zegarowym (rys. 4.21b), co pozwoliło na wykonywanie odczytów w jednakowym czasie i tym samym przyspieszyć nieco rejestrację odkształceń dla każdego poziomu obciążenia przy bardzo dużej liczbie baz pomiarowych (ok. 90 baz). Baza pomiarowa dla tego ekstensometru również wynosiła 100 mm, natomiast dokładność odczytu mierzona do 0.002 mm odpowiadała odkształceniu jednostkowemu 1.62×10^{-5} . Ze względu na dużą czułość urządzeń, każdorazowo przed pomiarami, dokonywany był odczyt kontrolny na wzorcu stalowym. Odczyty wykonano przed obciążeniem oraz dla wybranych poziomów obciążenia.

Bazy pomiarowe w formie reperów rozmieszczono na powierzchni tarcz głównie na kierunku ściskanych krzyżulców, a także wzdłuż pionowych krawędzi tarczy oraz w wybranych miejscach na kierunku naprężeń rozciągających zgodnie z uzyskanymi trajektoriami naprężeń głównych z analizy MES. Lokalizację wszystkich reperów przedstawiono poniżej na rysunkach 4.22 oraz 4.23.

Numerację baz pomiarowych przypisano w kolejności: tarcza wspornikowa, przęsłowa, poprzeczna oraz pilaster od strony tarczy wspornikowej. Z uwagi na spore zagęszczenie baz pomiarowych, zwłaszcza w tarczy wspornikowej, dla każdego kierunku przypisano odmienny kolor bazy i odpowiadającą numerację.



Rys. 4.22 Lokalizacja reperów do pomiaru odkształceń betonu dla tarcz układu DB-0.5 (I seria badań).

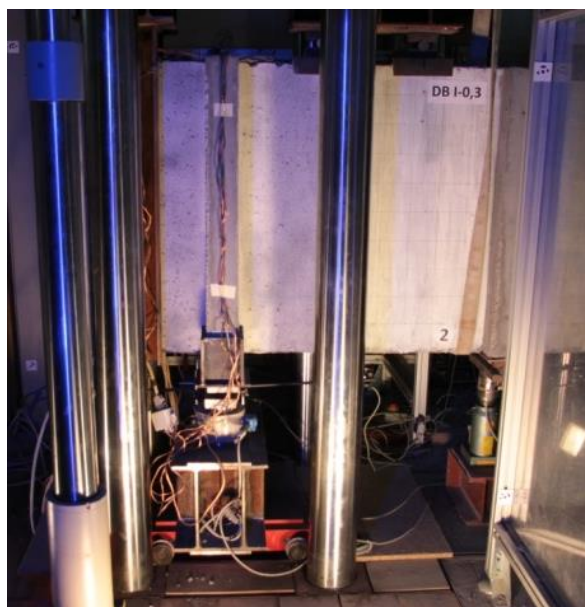


Rys. 4.23 Lokalizacja reperów do pomiaru odkształceń betonu dla tarcz układu DB-0.3 (II seria badań).

Pomiar optyczny

W II serii badań, oprócz wykonania pomiarów za pomocą tensometrii mechanicznej, zastosowano również optyczny system Aramis [N14] do pomiaru odkształceń i deformacji betonowej powierzchni tarczy wspornikowej i niewielkiego obszaru tarczy podłużnej. Aramis jako system bezkontaktowy, oparty jest na metodzie *Cyfrowej Korelacji Obrazów* (DIC - Digital Image Correlation) i umożliwia doświadczalne określenie stanów deformacji zmieniających się w czasie. Jest to narzędzie pomocne do lokalizacji i obserwacji rozwoju rys.

Technika CKO działa poprzez naniesienie losowego desenu (rys. 4.24) na wybranej powierzchni badanego elementu, następnie wykonaniu pierwszego obrazu, tzw. obrazu odniesienia (referencyjnego), gdy element badawczy nie został jeszcze obciążony i kolejno wykonaniu serii obrazów w trakcie działającego obciążenia odnoszących się do obrazu referencyjnego. Dzięki temu, możliwe jest obliczanie przemieszczeń określonych punktów i tworzenie map odkształceń badanej powierzchni na dowolnie wybranych kierunkach.



Rys. 4.24 Widok oznaczonej powierzchni badawczej tarczy DB I-0.3 z naniesionym wzorem i przygotowanej do wykonania pomiaru odkształceń systemem Aramis.

Dane do pomiaru przemieszczeń i deformacji zostały zebrane poprzez wykonanie zdjęć powierzchni badanych tarcz dwiema kamerami (2 x6 MPx) jednocześnie w równych założonych odstępach czasu o maksymalnej częstotliwości wykonywania zdjęć 25 klatek/sekundę (rys. 4.25). Pomiaru wykonywane były od momentu przyłożenia obciążenia aż do zniszczenia w sposób ciągły. Dokładność pomiaru odkształceń wynosiła $\pm 25 \mu\text{m/m}$, natomiast dokładność pomiaru pozycji i przemieszczenia w 3D na poziomie setnych części milimetra.



Rys. 4.25 Widok wzorca kalibracyjnego oraz głowicy pomiarowej 3D (układ dwóch kamer)

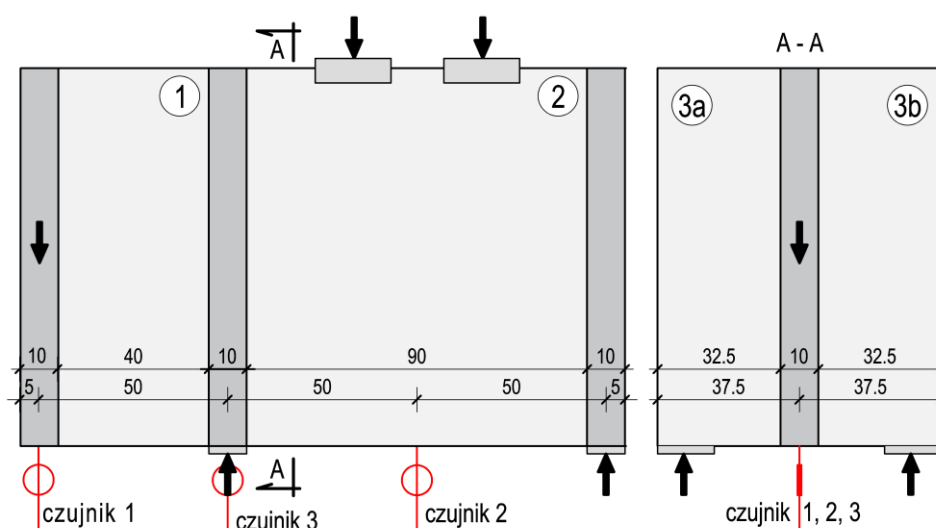
W badaniach został użyty system *Aramis 3D Camera* wraz z oprogramowaniem do obróbki danych *GOM Correlate 2016*. System *Aramis* składał się z dwóch kamer o rozdzielczości 6MPx każda, dwóch obiektywów o ogniskowej 24 mm. System pozwala na wykonanie do 25 zdjęć na sekundę przy pełnej rozdzielczości kamer. W celu redukcji ilości danych w trakcie badań wykorzystano zapis 2 zdjęć na sekundę. Zapewniana dokładność pomiaru odkształceń wynosiła 0.05 ‰.

4.2.3 Przemieszczenia

Pomiarów przemieszczeń krawędzi poziomych badanych tarcz w kierunku pionowym dokonywano za pomocą czujników indukcyjnych *LVDT* połączonych z mostkiem tensometrycznym i rozmieszczonych w trzech punktach (rys. 4.26). W każdej serii badawczej przyjęto jednakowy schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych:

- czujnik nr 1 - w osi przykładanego obciążenia na krawędzi zewnętrznej tarczy wspornikowej (1),
- czujnik nr 2 - w środku rozpiętości tarczy podłużnej (2),
- czujnik nr 3 - w środku rozpiętości tarczy poprzecznej (3).

Rejestracja przemieszczeń odbywała się w sposób ciągły – od momentu obciążenia aż do zniszczenia badanego układu. Dokładność pomiaru wynosiła $1.0 \times 10^{-5} \text{ mm}$, a czujniki pracowały w zakresie do 25 mm.



Rys. 4.26 Rozmieszczenie czujników indukcyjnych dla tarcz układu DB-0.5 (I seria).

4.2.4 Morfologia i szerokość rys

Przy każdym poziomie obciążenia rejestrowano propagację rys. Obraz zarysowania oznaczano bezpośrednio na elementach badawczych przy użyciu lup o 5-krotnym powiększeniu, jak również sporządzano w trakcie badań cyfrowy zapis fotograficzny. W II serii badań, rejestracja rozwoju zarysowania tarczy wspornikowej podczas całego cyklu obciążania odbywała się poprzez zapis systemu ARAMIS.

Do pomiaru szerokości rys stosowano mikroskop o 40-krotnym powiększeniu z podziałką co 0.02 mm w zakresie do 4.0mm (rys. 4.27). W II serii badań, z racji trudnego dostępu do powierzchni tarczy wspornikowej, pomiar mikroskopem nie był możliwy, a szerokość rys została zmierzona na podstawie wyników uzyskanych z pomiaru optycznego systemem ARAMIS.



Rys. 4.27 Mikroskop optyczny i pomiar szerokości rys podczas badań.

W celu łatwiejszego odwzorowania rys przy opracowaniu rysunków, tarcze przed badaniami pomalowano cienką warstwą białej farby emulsyjnej oraz naniesiono na ich powierzchnię ortogonalną siatkę o wymiarach 10 x 10 cm (rys. 4.28).



Rys. 4.28 Przygotowany węzeł tarczowy DB I-O.3 do badań.

4.3 Wyniki badań i ich analiza

W niniejszym podrozdziale zaprezentowano i omówiono wyniki uzyskane z pomiarów podczas prowadzonych badań, dotyczące odkształceń stali i betonu, przemieszczeń, a także morfologii i szerokości rys, oraz nośności. W analizie wyników badań uwzględniono wpływ ukształtowania zbrojenia w przypadku tarczy wspornikowej i poprzecznej oraz zmianę smukłości tarczy wspornikowej na poszczególne wielkości pomiarowe. Na prezentowanych rysunkach, wykresach bądź tabelach, wielkości sił rysujących i niszczących (maksymalnych), odnoszą się do całego przestrzennego układu tarcz (F_{cr} , F_u), bądź też do poszczególnych tarcz płaskich ($F_{i,cr}$, $F_{i,u}$) uwzględniających rozkład obciążenia F podany w p. 4.1 Zakres i program badań, (rys. 4.2 i 4.3).

Poniżej przedstawiono siły rysujące i niszczące z badań eksperymentalnych:

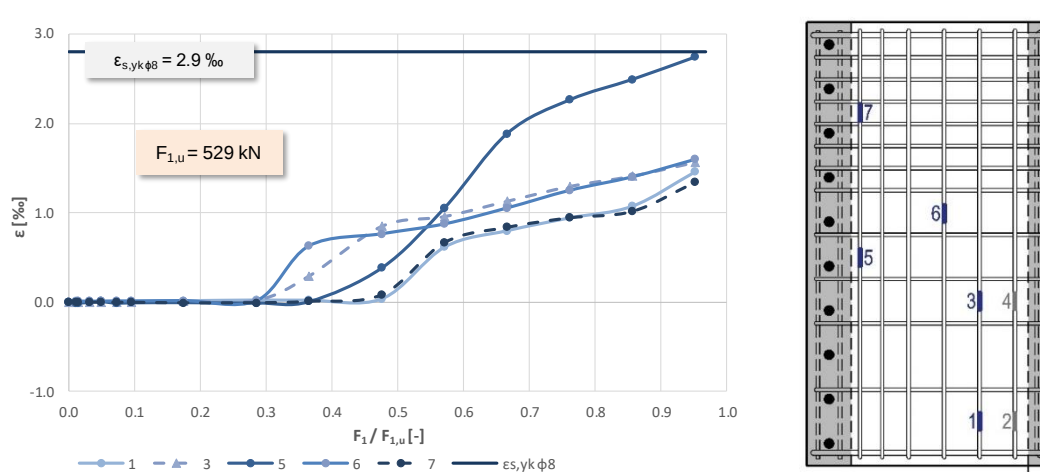
- a) wielkości siły F z prasy wytrzymałościowej
 - F_{cr} - siła rysująca powodująca powstanie pierwszego zarysowania w całym układzie tarczowym,
 - F_u - siła niszcząca powodująca wyczerpanie nośności całego układu tarczowego,
- b) wielkości siły F_1 obciążającej tarczę wspornikową (1)
 - $F_{1,cr}$ - siła rysująca powodująca powstanie pierwszego zarysowania w tarczy wspornikowej,
 - $F_{1,u}$ - maksymalna siła obciążająca tarczę wspornikową po wysokości w chwili zniszczenia układu tarczowego (F_u),
- c) wielkości siły F_2 obciążającej tarczę podłużną (2)
 - $F_{2,cr}$ - siła rysująca powodująca powstanie pierwszego zarysowania w tarczy podłużnej,
 - $F_{2,u}$ - maksymalna siła obciążająca tarczę podłużną na krawędzi górnej (obciążenie dwupunktowe) w chwili zniszczenia układu tarczowego (F_u),
- d) wielkości siły F_3 obciążającej tarczę poprzeczną (3)
 - $F_{3,cr}$ - siła rysująca powodująca powstanie pierwszego zarysowania w tarczy poprzecznej,
 - $F_{3,u}$ - maksymalna siła obciążająca tarczę poprzeczną po wysokości w środku przęsła (równa maksymalnym reakcjom powstałym w dwóch miejscach podparcia dolnej krawędzi tarczy poprzecznej) w chwili zniszczenia układu tarczowego (F_u).

4.3.1 Odształcenia stali

Wyniki pomiarów odkształceń stali zbrojeniowej ε_s zilustrowano na poniższych wykresach (rys. 4.29 - 4.43) w zależności od stosunku przykładanej siły F_i do siły niszczącej $F_{i,u}$ ($F_i / F_{i,u}$), dla tarczy wspornikowej i poprzecznej. Konwencję znaków jaką przyjęto na wykresach odkształceń stali: „+” oznacza rozciąganie, „-” ściskanie.

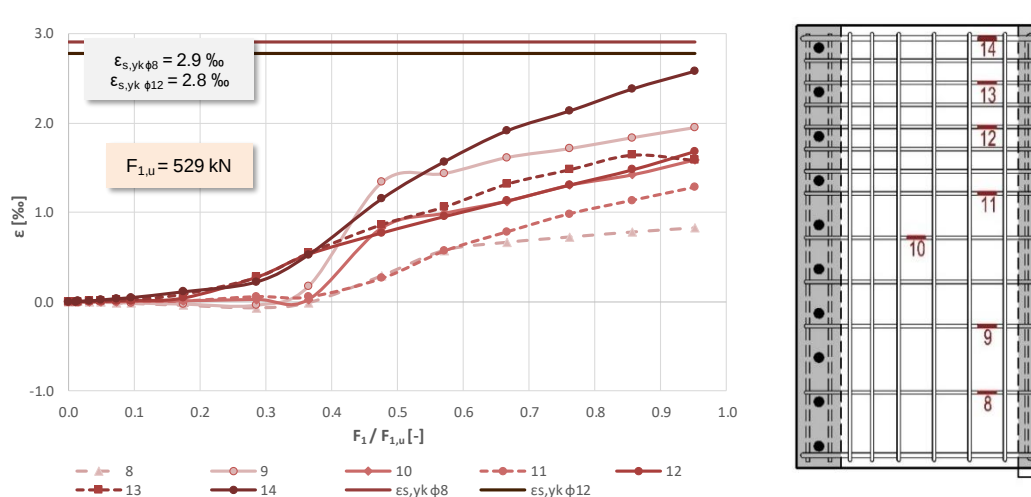
Na wykresach zaznaczono wielkość odkształceń granicznych $\varepsilon_{s,yk}$ odpowiadającą granicy plastyczności stali f_{yk} dla wybranych średnic prętów zbrojenia. Obok każdego wykresu zamieszczono lokalizację tensometrów analizowanej tarczy z przypisaną im numeracją. Kolory wykresów odkształceń stali odpowiadają przyjętym kolorom tensometrów umieszczonych na danym rodzaju zbrojenia: *niebieski* – zbrojenie pionowe, *czerwony* – zbrojenie poziome, *zielony* – zbrojenie ukośne. Tensometry, które zostały uszkodzone już podczas betonowania i wyłączone z pomiarów, oznaczono na rysunkach kolorem *szarym*. Natomiast uszkodzenia tensometrów, powstałe w trakcie trwających badań, zostały opisane i oznaczone na wykresie kolorem czerwonym przy danym poziomie obciążenia, dla którego odnotowano zniszczenie.

▪ *Seria I - układ tarcz DB I-0.5*



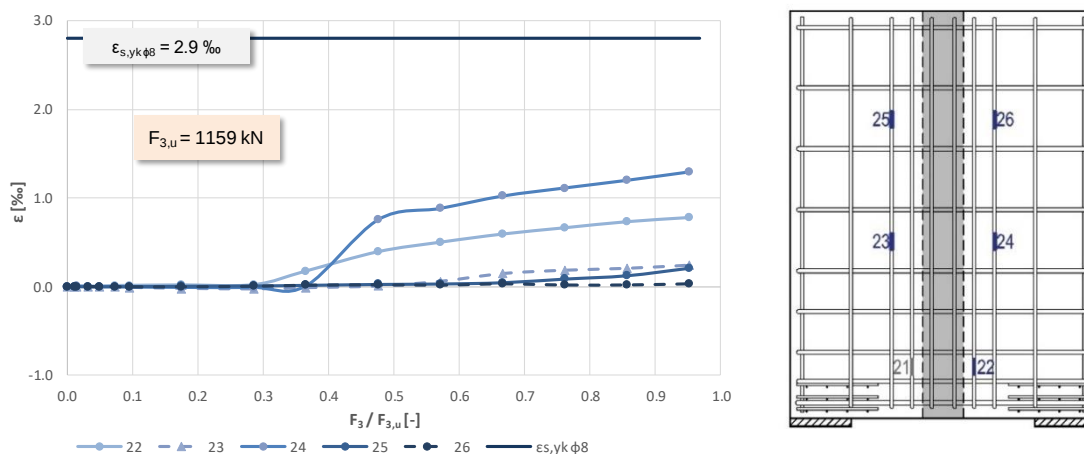
Rys. 4.29 Odształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.

Pierwsze przyrosty odkształceń zbrojenia pionowego, tarczy wspornikowej zbrojonej ortogonalnie o smukłości 0.5 zarejestrowano już przy poziomie obciążenia równego 0.3 $F_{1,u}$, a kolejny wzrost odkształceń dla prętów pionowych pojawiał się po przekroczeniu wartości obciążenia równego 0.5 $F_{1,u}$ (rys. 4.29). Maksymalne odkształcenia prętów pionowych, tuż przed zniszczeniem układu DB I-0.5, miały zbliżone wartości i wynosiły ok. 1.5 ‰ (0.5 $\varepsilon_{s,yk} \phi 8$). Jedynie odkształcenia zbrojenia znajdującego się najbliżej krawędzi od strony przekazywanego obciążenia po wysokości, wykazały największą wartość 2.7‰ w centralnej wysokości zbrojenia i były bliskie odkształceniom granicznym $\varepsilon_{s,yk}$ (tensometr 5).



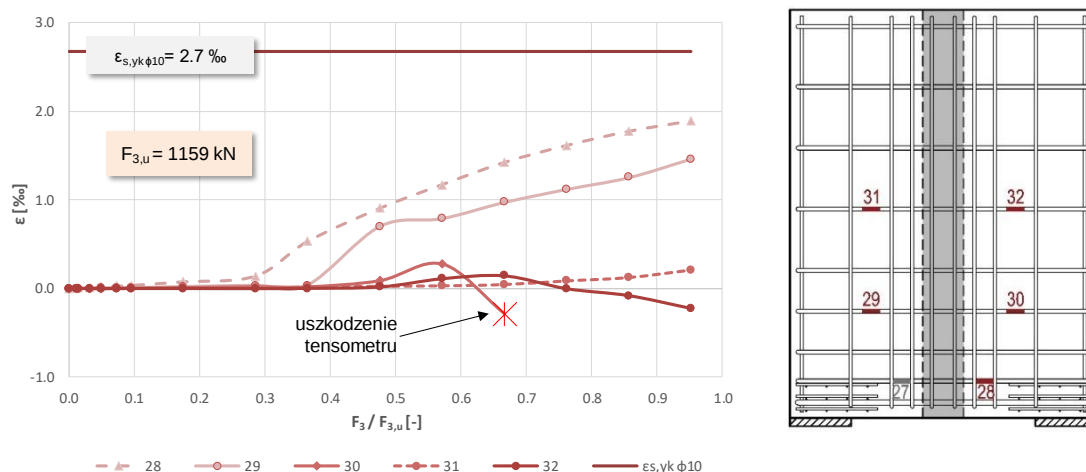
Rys. 4.30 Odształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.

W przypadku zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej DB I-0.5 (1), wzrost odkształceń (rys. 4.30) następował po przekroczeniu poziomu równego $0.2 F_{1,u}$ dla górnych prętów zbrojenia poziomego (tensometr nr 13 i 14). Natomiast znaczący przyrost odkształceń prętów poziomych, rozłożonych po wysokości wspornika, odnotowano przy poziomie obciążeń równych $0.4 F_{1,u}$. Największe wartości odkształceń zanotowano w górnym zbrojeniu poziomym $\phi 12$, i tuż przed wyczerpaniem nośności układu DB I-0.5 były one bliskie wartości granicznej (ok. $0.9 \varepsilon_{s,yk \phi 12}$).



Rys. 4.31 Odształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy poprzecznej układu DB I-0.5.

W tarczy poprzecznej DB I-0.5 (3) wzrost wartości odkształceń prętów pionowych (rys. 4.31) nastąpił po przekroczeniu $0.3 F_{3,u}$ w przypadku pomiaru zlokalizowanego w dolnej części tarczy (tensometr nr 22), a przy obciążeniu $0.4 F_{3,u}$ odnotowano przyrost odkształceń w środkowej części wysokości tarczy poprzecznej. Pomierzone odkształcenia jednostkowe ε_s prętów pionowych, były zdecydowanie mniejsze w porównaniu z tarczą wspornikową DB I-0.5 (1). Największe wartości w pionowych prętach podwieszających zarejestrowano w środkowej części wysokości tarczy (tensometr nr 24), lecz nie przekraczały one $0.5 \varepsilon_{s,yk}$ w momencie wyczerpania nośności badanego węzła DB I-0.5, czyli były o ok. 50% mniejsze od maksymalnych odkształceń pionowych prętów wspornika DB I-0.5 (1).

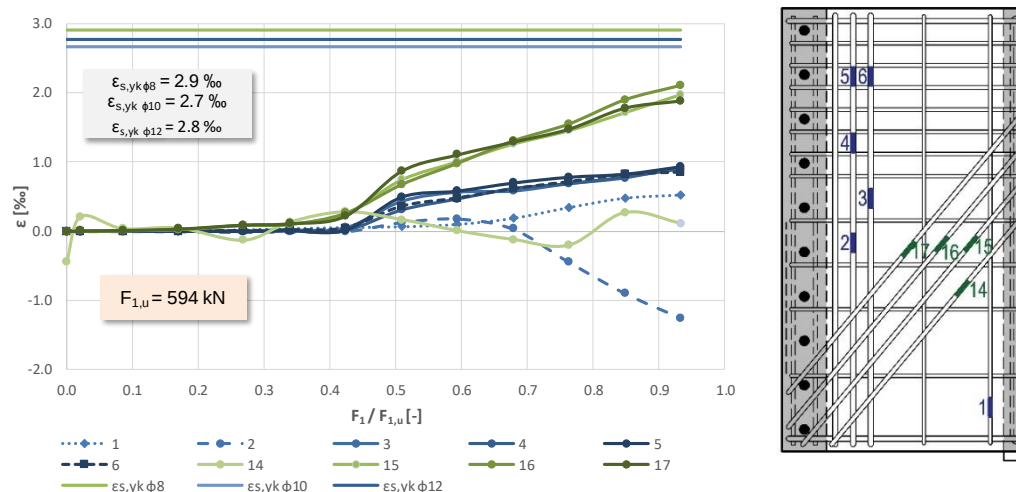


Rys. 4.32 Odształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej układu DB I-0.5.

Podobnie w zbrojeniu poziomym tarczy poprzecznej (rys. 4.32), pierwszy przyrost odkształceń rejestrowano dla prętów usytuowanych w dolnym obszarze tarczy, po przekroczeniu wielkości $0.3 F_{3,u}$, jak również dla żadnych prętów poziomych w fazie zniszczenia, nie uzyskano odkształceń $\varepsilon_{s,yk}$ odpowiadających granicy plastyczności stali. Największe wartości, równe 1.9 ‰ ($0.7 \varepsilon_{s,yk}$) zanotowano przy dolnej krawędzi tarczy (tensometr nr 28).

▪ Seria I - układ tarcz DB II-0.5

W tarczy wspornikowej ze zbrojeniem mieszanym DB II-0.5 (1), zgodnie z przyjętymi założeniami [1] przeważający udział zbrojenia w przenoszeniu obciążenia rozłożonego po wysokości miały stanowić pionowe strzemiona podwieszające oraz pręty odgięte.

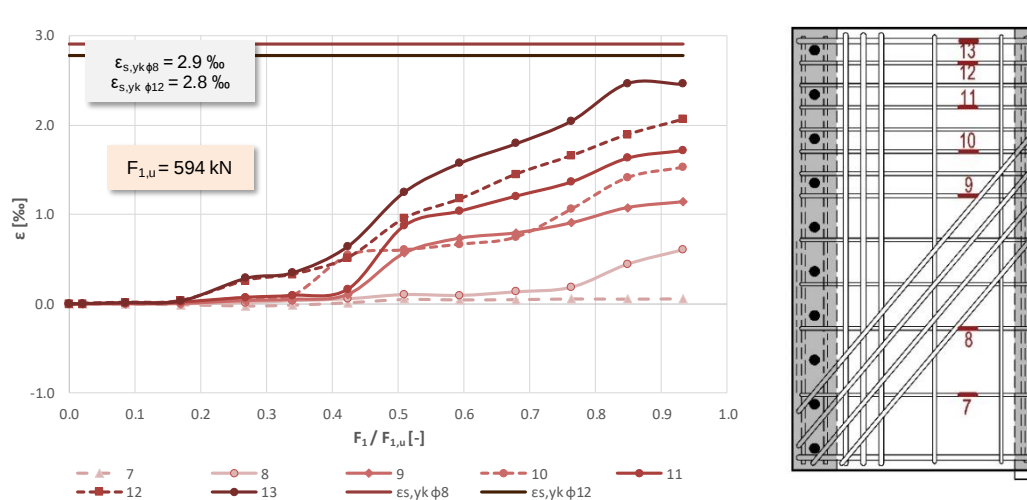


Rys. 4.33 Odształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.

Z wykresu na rys. 4.33 wynika, iż znaczący przyrost odkształceń zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy wspornikowej, następował przy wielkości obciążenia równego ok. $0.4 F_{1,u}$, czyli nieco później niż w przypadku zbrojenia pionowego ortogonalnie zbrojonej tarczy wspornikowej DB I-0.5 (1). Wielkości odkształceń jednostkowych pionowych strzemion podwieszających były do siebie zbliżone (oprócz tensometru nr 2), a ich maksymalne wartości osiągnięte tuż przed zniszczeniem, nie przekroczyły 1.0 ‰ ($0.35 \varepsilon_{s,yk\phi12}$). Natomiast ponad dwukrotnie większe odkształcenia zostały odnotowane dla prętów zbrojenia ukośnego, dla których maksymalne wartości odkształceń wynosiły ok. $0.75 \varepsilon_{s,yk\phi10}$ (2.0 ‰).

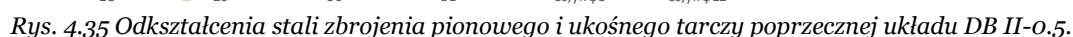
Wyjątkiem był pręt ukośny, usytuowany najniżej w tarczy wspornikowej (*tensometr nr 14*), którego zasięg nie obejmował zewnętrznego pilastra z działającym wzdłuż jego wysokości obciążeniem. Na wykresie przedstawionym na rysunku 4.35, możemy zauważyć, że pręt ten nie włączył się do współpracy podczas całego cyklu obciążania, jak również tuż przed samym zniszczeniem wartości odkształceń były niewielkie i wynosiły ok. $0.04 \varepsilon_{s,yk \phi 10}$.

W przypadku zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej *DB II-0.5 (1)* (rys. 4.34), identycznie jak miało to miejsce w tarczy wspornikowej *DB I-0.5 (1)*, rejestracja odkształceń dla górnych prętów (*tensometr nr 12 i 13*) następowała we wczesnym etapie obciążania, po przekroczeniu poziomu równego $0.2 F_{1,u}$. Wyraźny wzrost odkształceń prętów poziomych rozmieszczonych po wysokości wspornika, nastąpił przy poziomie obciążenia równego $0.4 F_{1,u}$. Przedstawione wykresy odkształceń (*rys. 4.34*) odzwierciedliły równomiernie zmniejszającą się intensywność w przenoszeniu obciążenia wraz z odległością położenia prętów poziomych od górnej krawędzi tarczy wspornikowej *DB II-0.5 (1)*.

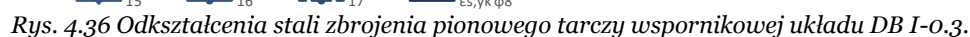


Rys. 4.34 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.

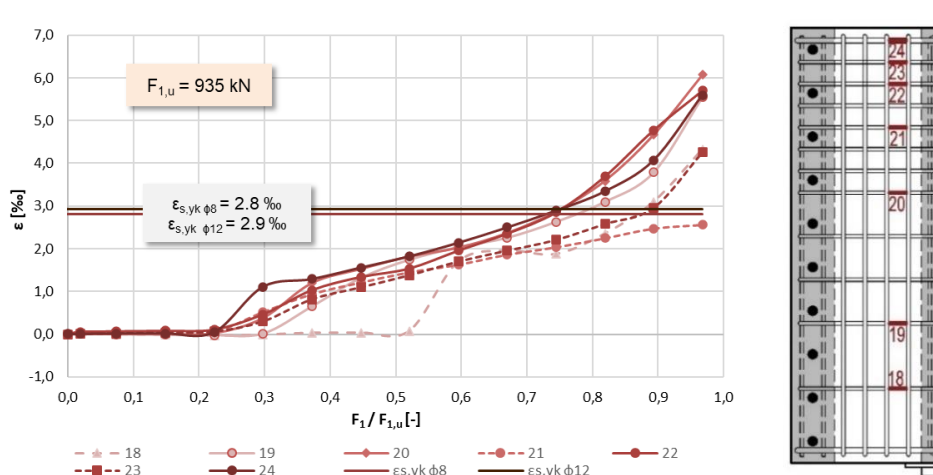
Zmierzone w trakcie badań odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy *DB II-0.5 (1)* (*rys. 4.34*), wykazały również znaczący udział tego zbrojenia w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości wspornika. Największe odkształcenia ε_s , odnotowano dla górnego zbrojenia poziomego (*tensometr nr 13*). Odkształcenia te, tuż przed zniszczeniem układu *DB II-0.5* wynosiły ok. 2.5‰ i podobnie jak w tarczy wspornikowej zbrojonej ortogonalnie (*DB II-0.5 (1)*), były bliskie osiągnięcia granicy plastyczności ($0.9 \varepsilon_{s,yk \phi 12}$). Spore wartości odkształceń odnotowano również dla pozostałych prętów poziomych (*tensometr nr 9-12*) zlokalizowanych w górnej części wspornika, których maksymalne wartości przy sile równej $0.93 F_{1,u}$ były średnio większe od granicznych odkształceń pionowych prętów podwieszających (*rys. 4.35*) o ok. 50%. Z kolei wielkości odkształcenia zbrojenia poziomego rozmieszczonego w dolnej części wspornika (*tensometr nr 7 i 8*) były zdecydowanie mniejsze od wartości odkształceń tych samych prętów poziomych (*tensometr nr 8 i 9*) tarczy *DB II-0.5 (1)*.



- *Seria II - układ tarcz DB I-0.3*



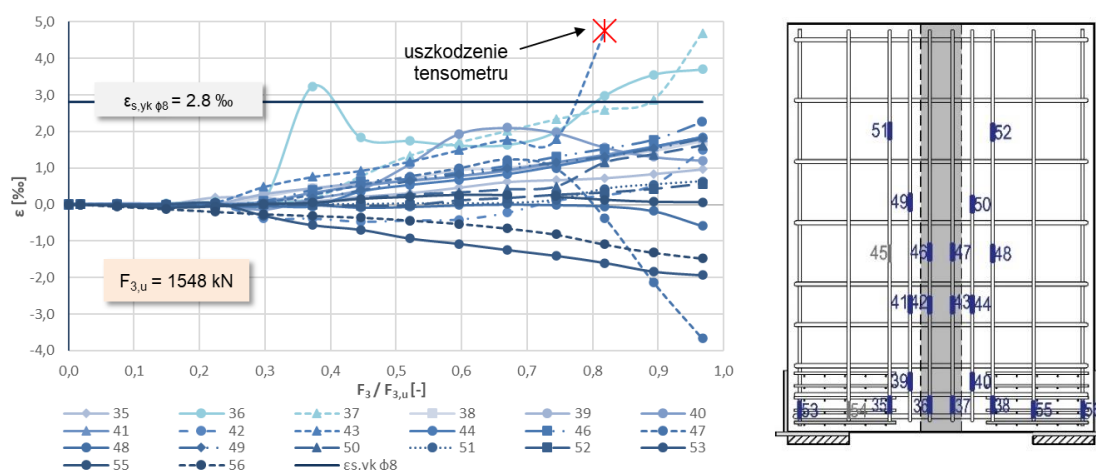
W tarczy wspornikowej *DB I-0.3 (1)* o smukłości 0.3 i zbrojonej ortogonalnie, pierwszy przyrost odkształceń dla wybranych prętów pionowych zarejestrowano już po przekroczeniu obciążenia równego $0.2 F_{1,u}$ (rys. 4.36). Natomiast przy obciążeniu równym ok. $0.75 F_{1,u}$ odnotowano pierwsze uplastycznienie zbrojenia (*tensometr 8*). Ostatecznie, zniszczenie układu *DB I-0.3* poprzedzone było osiągnięciem granicy plastyczności f_{yk} we wszystkich strzemiach pionowych - w środkowej części wspornika. Największe wartości odnotowano dla tensometrów nr 10 i 11, czyli dla strzemion położonych najbliżej krawędzi na której przekazywane było obciążenie po wysokości.



Rys. 4.37 Odształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu *DB I-0.3*.

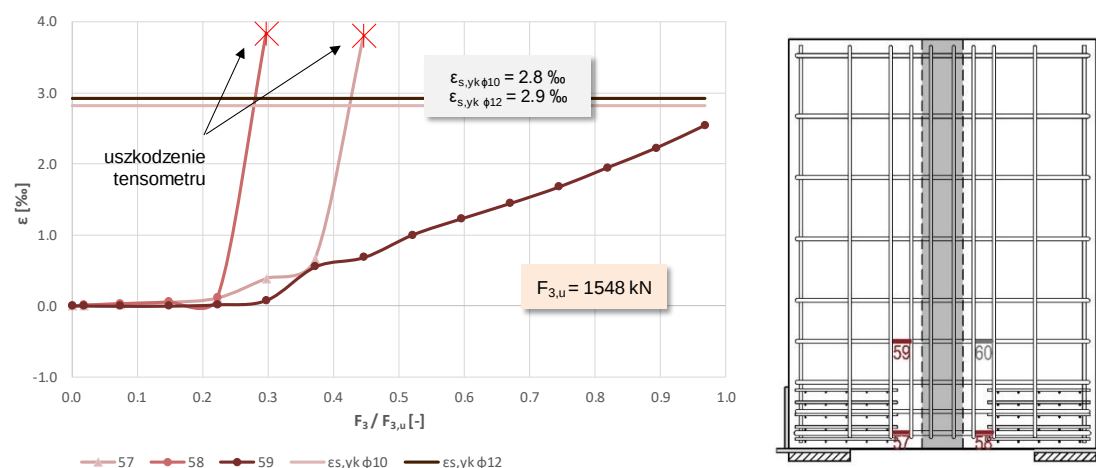
W przypadku zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej *DB I-0.3 (1)*, przyrost odkształceń dla większości prętów widoczny jest po przekroczeniu poziomu obciążeń równego $0.2 F_{1,u}$ (rys. 4.37). Najpóźniej do współpracy w przenoszeniu obciążeń ($0.5 F_{1,u}$) włączył się pręt zbrojenia poziomego położonego w dolnym obszarze wspornika (*tensometr 18*). Przy poziomie obciążenia równego $0.75 F_{1,u}$, podobnie jak miało to miejsce w zbrojeniu pionowym, doszło do uplastycznienia się stali wybranych prętów (*tensometr 20, 22 i 24*). Tuż przed zniszczeniem prawie wszystkie pręty zbrojenia poziomego, na których dokonywany był pomiar, osiągnęły odkształcenia graniczne. Największą wartość odkształceń odnotowano dla tensometru nr 20, zlokalizowanego w środkowej części tarczy wspornikowej *DB I-0.3 (1)*, jakkolwiek podobnej wartości odkształcenia maksymalne zarejestrowano dla kilku prętów zbrojenia poziomego rozłożonego po wysokości wspornika. Otrzymano zatem odmienny rozkład odkształceń od zarejestrowanego we wsporniku tarczowym o smukłości równej 0.5, patrz rys. 4.30.

W tarczy poprzecznej *DB I-0.3 (3)*, pierwsze wartości odkształceń ε_s prętów pionowych pojawiły się już we wczesnym etapie obciążeń, podobnie jak miało to miejsce w tarczy wspornikowej *DB I-0.3 (1)*, po przekroczeniu obciążenia równego $0.2 F_{3,u}$ (rys. 4.38). Z kolei pierwsze uplastycznienie zbrojenia pionowego, równie podobnie jak w tarczy wspornikowej, zarejestrowano przy poziomie obciążenia równego $0.77 F_{3,u}$. Jednakże przy wyczerpaniu nośności układu *DB I-0.3*, granicę plastyczności stali f_{yk} osiągnęły jedynie pionowe pręty podwieszające położone w obszarze przekazywania obciążenia pośredniego z tarczy wspornikowej i podłużnej, w miejscu położonym najbliżej dolnej krawędzi (*tensometr 36 i 37*). W miarę oddalania się pionowych strzemion od krawędzi z obciążeniem pośrednim, odkształcenia stali zbrojeniowej ε_s malały.



Rys. 4.38 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy poprzecznej układu DB I-o.3.

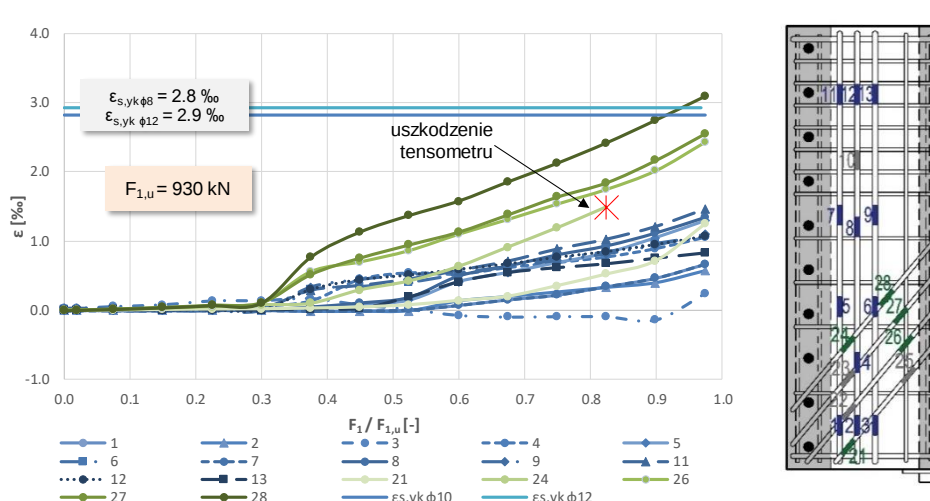
Jak możemy zaobserwować z wykresów przedstawionych na rys. 4.39 dolne pręty poziome tarczy poprzecznej DB I-o.3 (3) zbrojonej ortogonalnie uplastyczniły się już we wczesnym etapie obciążania (mniejszym niż $0.5 F_{3,u}$).



Rys. 4.39 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej układu DB I-o.3.

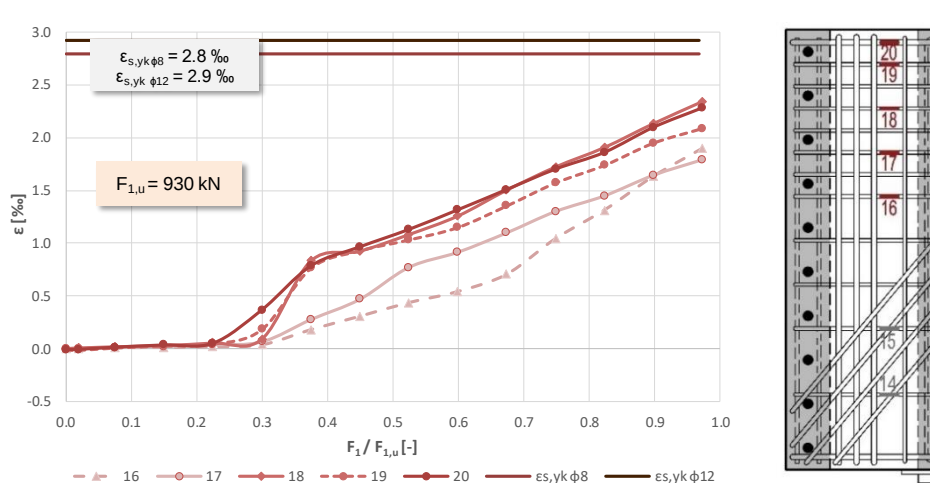
■ Seria II - układ tarcz DB II-o.3

W tarczy wspornikowej układu DB II-o.3, pierwszy przyrost odkształceń ε_s dla wybranych punktów pomiarowych w zbrojeniu pionowym i ukośnym można było zaobserwować po przekroczeniu wartości obciążeń równych $0.3 F_{1,u}$ (rys. 4.40), czyli nieco później niż miało to miejsce w przypadku prętów pionowych w tarczy DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie. Odkształcenia prętów ukośnych były bliskie, lub lokalnie osiągnęły wartości graniczne odpowiadające granicy plastyczności f_{yk} (tensometr 28). Dla najniższej położonego pręta ukośnego, który nie obejmował zasięgiem obszaru przekazywania obciążenia (tensometr 21) odnotowano najmniejsze odkształcenia przy zniszczeniu (ok. 1,3 ‰) - podobnie, jak miało to miejsce dla wspornika tarczowego o smukłości 0,5 układu DB II-o.5, patrz rys. 4.33.



Rys. 4.40 Odształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy wspornikowej układu DB II-o.3.

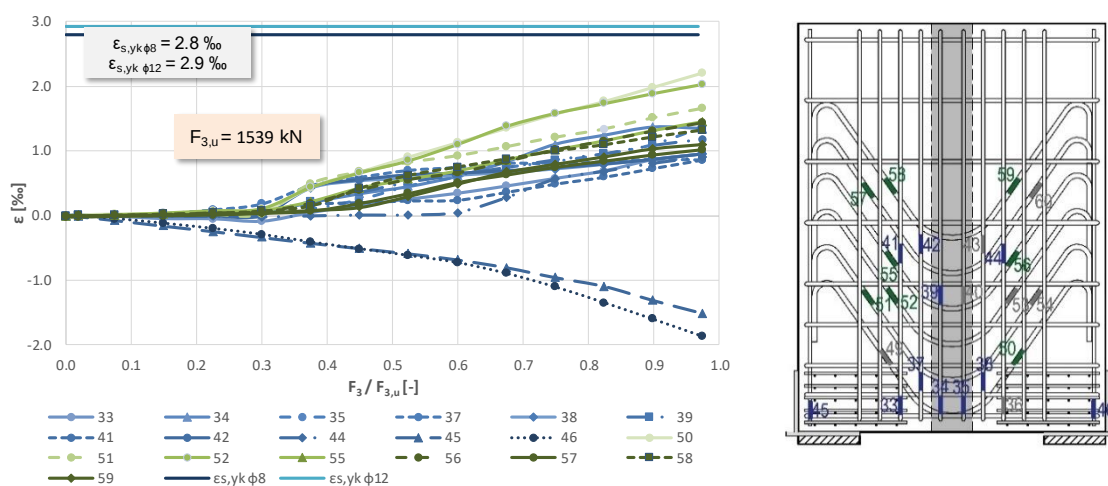
W zbrojeniu pionowym - podwieszającym maksymalne wartości odkształceń jakie zarejestrowano przed zniszczeniem (rys. 4.40), były znacznie mniejsze i miały zbliżone wartości na całej wysokości wspornika wynoszące ok. 1.0 ‰ ($\sim 0.35 \epsilon_{s,yk \phi 12}$). Zatem większość obciążenia F_1 rozłożonego po wysokości wspornika, podobnie jak w przypadku wspornika DB II-o.5 (1), została przekazana na pręty ukośne. Porównując otrzymane z badań wykresy odkształceń stali w zbrojeniu pionowym dla tarczy wspornikowej DB II-o.3 (1) z tarczą DB I-o.3 (1) zbrojoną ortogonalnie, można zauważyć wyraźny spadek wielkości odkształceń przy zastosowaniu dodatkowych prętów ukośnych. W fazie zniszczenia, żadne z pionowych strzemion podwieszających nie osiągnęły granicy plastyczności f_{yk} , a maksymalne wartości odkształceń były średnio dwukrotnie mniejsze od zarejestrowanych w pionowym zbrojeniu wspornika zbrojonego ortogonalnie DB I-o.3 (1) (rys. 4.36).



Rys. 4.41 Odształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB II-o.3.

Odształcenia w zbrojeniu poziomym tarczy wspornikowej DB II-o.3 (1) (rys. 4.41) zaczynały przyrastać po przekroczeniu poziomu 0.2 - 0.3 $F_{1,u}$, czyli podobnie jak miało to miejsce w przypadku prętów poziomych tarczy DB I-o.3 (1). Średnie odkształcenia zarejestrowane w chwili przed zniszczeniem wynosiły ok. 2.1 ‰ ($0.75 \epsilon_{s,yk}$) i były ponad dwukrotnie mniejsze od średniej z maksymalnych odkształceń uzyskanych w tarczy wspornikowej zbrojonej ortogonalnie DB I-o.3 (1). Dodatkowo w żadnym z prętów poziomych nie osiągnięto granicy plastyczności f_{yk} .

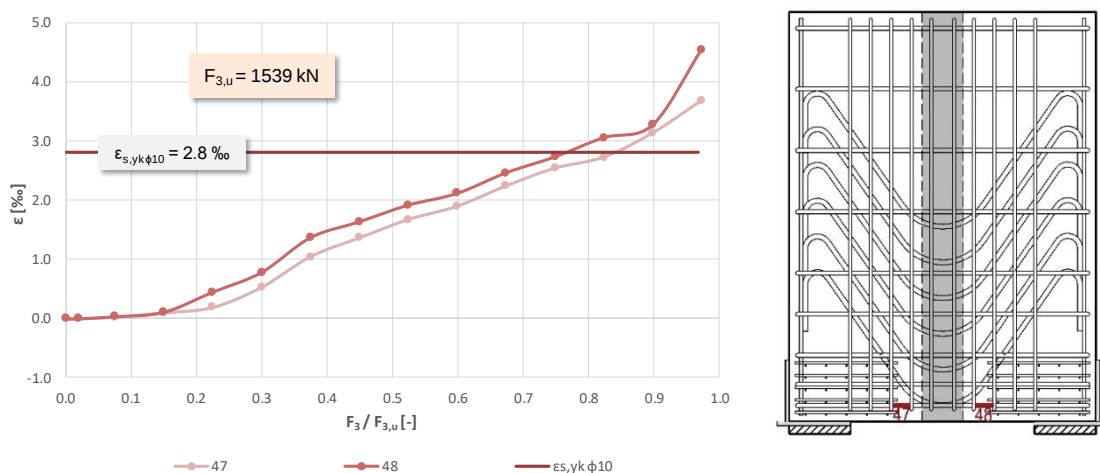
W tarczy poprzecznej układu *DB II-o.3*, pierwszy przyrost odkształceń w zbrojeniu pionowym (nie wliczając pomiarów dokonanych nad podporami – odkształcenia ε_s ściskające) i ukośnym odnotowano po przekroczeniu wartości obciążeń równych $0.3 F_{3,u}$ (rys. 4.42), czyli nieco później niż miało to miejsce w przypadku prętów pionowych w tarczy poprzecznej zbrojonej ortogonalnie *DB I-o.3* (3), patrz rys. 4.38. Również pręty ukośne, zaczęły włączać się do współpracy w przenoszeniu obciążeń po przekroczeniu poziomu równego $0.3 F_{3,u}$.



Rys. 4.42 Odształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy poprzecznej układu *DB II-o.3*.

W tarczy poprzecznej układu *DB II-o.3*, pierwszy przyrost odkształceń w zbrojeniu pionowym (nie wliczając pomiarów dokonanych nad podporami – odkształcenia ε_s ściskające) i ukośnym odnotowano po przekroczeniu wartości obciążeń równych $0.3 F_{3,u}$ (rys. 4.42), czyli nieco później niż miało to miejsce w przypadku prętów pionowych w tarczy poprzecznej zbrojonej ortogonalnie *DB I-o.3* (3), patrz rys. 4.38. Również pręty ukośne, zaczęły włączać się do współpracy w przenoszeniu obciążeń po przekroczeniu poziomu równego $0.3 F_{3,u}$.

Maksymalne wartości odkształceń zbrojenia pionowego podwieszającego w fazie zniszczenia były do siebie zbliżone i wynosiły średnio ok. 1.0 ‰ ($0.66 \varepsilon_{s,yk \phi 8}$). Większe wartości odkształceń zanotowano dla prętów ukośnych (rys. 4.42), jednak żadne z nich nie osiągnęły wartości granicznej $\varepsilon_{s,yk \phi 12}$. Największe odkształcenia, wynoszące ok. 2.2 ‰ ($0.76 \varepsilon_{s,yk \phi 12}$) wykazał tensometr nr 50 dla zbrojenia położonego najbliżej dolnej krawędzi poziomej.



Rys. 4.43 Odształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej układu *DB II-o.3*.

Odształcenia dolnego zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej *DB II-0.3 (3)* zaczęły pojawiać się przy obciążeniu równym ok. $0.2 F_{3,u}$ (rys. 4.43). Do uplastycznienia tych prętów doszło przy poziomie obciążenia równego ok. $0.8 F_{3,u}$, czyli znacząco później niż miało to miejsce w tarczy poprzecznej *DB I-0.3 (3)*, patrz rys. 4.39.

Wnioski dotyczące odkształceń stali zbrojeniowej:

Tarcza wspornikowa

- we wspornikach zbrojonych w sposób mieszany (*DB II-0.5 (1)* i *DB II-0.3 (1)*), niezależnie od przyjętej smukłości (0.5 lub 0.3), największe odkształcenia, a tym samym udział prętów zbrojeniowych w przekazywaniu obciążenia działającego po wysokości, wykazały pręty poziome i ukośne. Wyniki badań nie potwierdziły zatem dotychczasowych zaleceń [1], [2] w których istotną rolę w przenoszeniu tak działającego obciążenia miały przenosić pionowe pręty podwieszające,
 - niezależnie od ukształtowania zbrojenia czy smukłości wspornika, spory udział w przekazywaniu obciążenia wykazały górne pręty poziome poprzez znaczące wartości odkształceń w chwili zniszczenia,
 - we wspornikach tarczowych o smukłości 0.5 w żadnym z prętów nie osiągnięto granicy plastyczności f_{yk} (wyczerpanie nośności w układach *DB-0.5* nastąpiło w strefie zwiększonych naprężeń docisku w obszarze podporowym tarczy poprzecznej). Jednakże we wsporniku zbrojonym ortogonalnie *DB I-0.5 (1)*, maksymalne odkształcenia wybranych prętów zbrojenia poziomego i pionowego były bliskie granicznym ($\sim f_y$),
 - we wsporniku tarczowym o smukłości 0.3 zbrojonym ortogonalnie *DB I-0.3 (1)*, zarówno w prętach poziomych, jak i pionowych została osiągnięta granica plastyczności f_y ,
 - we wspornikach o smukłości 0.3 ze zbrojeniem ukośnym *DB II-0.3 (1)*, nie doszło do uplastycznienia stali w żadnym z prętów zbrojenia pionowego i poziomego. Jedynie lokalnie w jednym z prętów ukośnych, osiągnięto granicę plastyczności tuż przed zniszczeniem,
 - uzyskane wielkości odkształceń stali prętów ukośnych tarcz wspornikowych, niezależnie od smukłości (0.5 lub 0.3), wykazały efektywną pracę tych prętów, które przechodziły poprzez pilaster, przekazujący obciążenie po wysokości na wspornik. W najniżej położonym pręcie ukośnym, niespełniającym tego warunku, odkształcenia w chwili zniszczenia ε_s były znikome,
- *wpływ ukształtowania zbrojenia*
- zastosowanie zbrojenia ukośnego spowodowało znaczący spadek odkształceń prętów zbrojenia pionowego niezależnie od badanej smukłości wspornika. We wspornikach układu *DB-0.5*, z uwagi na zastosowanie prętów ukośnych, średnie odkształcenia prętów pionowych były dwukrotnie mniejsze [27], [28], a we wspornikach układu *DB-0.3*, odnotowano ponad trzykrotne zmniejszenie odkształceń prętów pionowych,
 - we wspornikach o mniejszej smukłości (0.3) zaobserwowano również korzystny wpływ zastosowania zbrojenia ukośnego na zmniejszenie odkształceń prętów poziomych rozłożonych po wysokości wspornika [29],
 - niezależnie od badanej smukłości, zbrojenie ukośne zmieniało obszary najbardziej wyćężone w tarczy wspornikowej. W tarczach zbrojonych ortogonalnie największe odkształcenia strzemion

poziomych i pionowych podwieszających zlokalizowane były w środkowym i dolnym obszarze tarczy. Natomiast w tarczach ze zbrojeniem ukośnym miejsca maksymalnych odkształceń prętów poziomych i pionowych znajdowały się w górnej części wspornika,

▪ *wpływ smukłości*

- zmniejszenie smukłości wspornika, niezależnie od przyjętego kształtu zbrojenia wpłynęło na rozkład odkształceń zbrojenia poziomego. We wspornikach o smukłości 0.5, największe maksymalne odkształcenia ε_s odnotowano dla poziomych prętów górnych. Natomiast w tarczy wspornikowej układu *DB-0.3* najbardziej wyężone były strzemiona poziome.

Tarcza poprzeczna

- w tarczach poprzecznych układu *DB I-0.5* zbrojonych ortogonalnie, w żadnym z prętów nie osiągnięto granicy plastyczności f_{yk} . W tarczach poprzecznych układu *DB II-0.5*, jedynie w jednym z prętów ukośnych, tuż przed wyczerpaniem nośności, doszło do uplastycznienia stali,
- w tarczach poprzecznych układu *DB I-0.3* zbrojonych ortogonalnie, zarówno w zbrojeniu poziomym jak i pionowym została osiągnięta granica plastyczności stali. Natomiast w tarczach poprzecznych układu *DB II-0.3*, zbrojonych w sposób mieszany, jedynie w prętach poziomych położonych najbliżej dolnej krawędzi, doszło do uplastycznienia stali przy poziomie obciążenia ok. 0.8 F_u ,

▪ *wpływ ukształtowania zbrojenia*

- w tarczach poprzecznych układu *DB I-0.3* zaobserwowano korzystny wpływ zastosowania zbrojenia ukośnego na zmniejszenie odkształceń zarówno prętów pionowych, jak i poziomych.

4.3.2 Odkształcenia betonu

W pierwszej serii badań (układ tarczowy *DB I-0.5* oraz *DB II-0.5*) wyniki uzyskano przy zastosowaniu tensometrii mechanicznej i zaprezentowano dla wybranych baz pomiarowych zlokalizowanych na kierunku ściskanych krzyżulców w tarczach wspornikowych (rys. 4.44-4.51 oraz tab. 4.5) oraz tarczach poprzecznych (tab. 4.6).

W II serii badań (układ tarczowy *DB I-0.3* oraz *DB II-0.3*) wyniki odkształceń betonu na powierzchni wsporników tarczowych przedstawiono dla wielkości uzyskanych na podstawie pomiarów wykonanych systemem *Aramis*. W trakcie prowadzenia badań eksperymentalnych, pomiar mechaniczny przy użyciu ekstensometru okazał się trudny do precyzyjnego wykonania, z uwagi na spore trudności w dostępie do powierzchni wspornika (mała smukłość wspornika 0.3 oraz przesłonięcie obszaru badawczego przez pionowe stalowe ceowniki, patrz *rys. 4.13* przedstawiający stanowisko badawcze). Wyniki odkształceń betonu na powierzchni tarczy poprzecznej uzyskano przy użyciu ekstensometru i przedstawiono na kierunku głównych odkształceń ściskających.

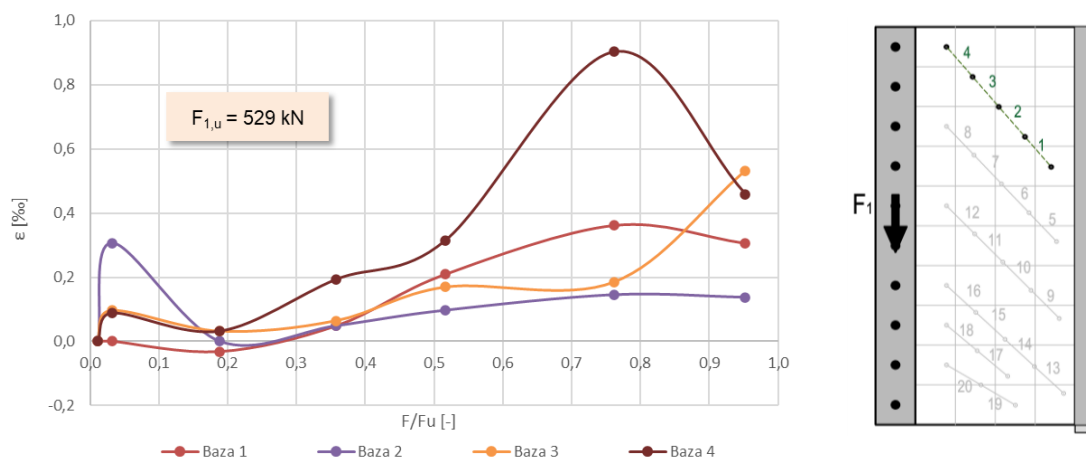
▪ *Seria I - układ tarcz DB I-0.5 i DB II-0.5*

Graniczne odkształcenia betonu ε_{cu} wzdłuż wybranych ściskanych krzyżulców, uzyskane z pomiarów wykonanych tuż przed zniszczeniem na podstawie tensometrii mechanicznej zestawiono w tabeli 4.5 dla tarcz wspornikowych *DB I-0.5* (1) i *DB II-0.5* (1) oraz w tabeli 4.6 dla tarcz poprzecznych

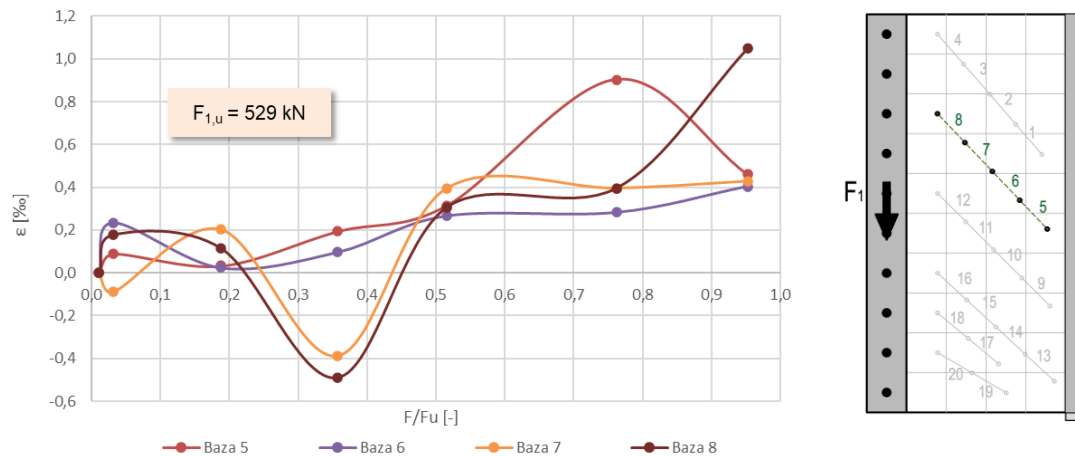
DB I-0.5 (3) i DB II-0.5 (3). Odształcenia podano jako wartość średnią z czterech baz dla danego krzyżulca.

Dla tarcz wspornikowych dodatkowo przedstawiono wykresy odkształceń ε_c (rys. 4.44-4.51) w zależności od poziomu przykładanej siły F_1 do siły niszczącej $F_{1,u}$ ($F_1 / F_{1,u}$). Konwencję znaków jaką przyjęto na wykresach odkształceń betonu: „+” oznacza ściskanie, „-” rozciąganie. Obok każdego wykresu zamieszczono lokalizację baz pomiarowych z przypisaną im numeracją.

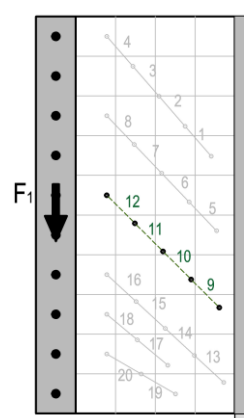
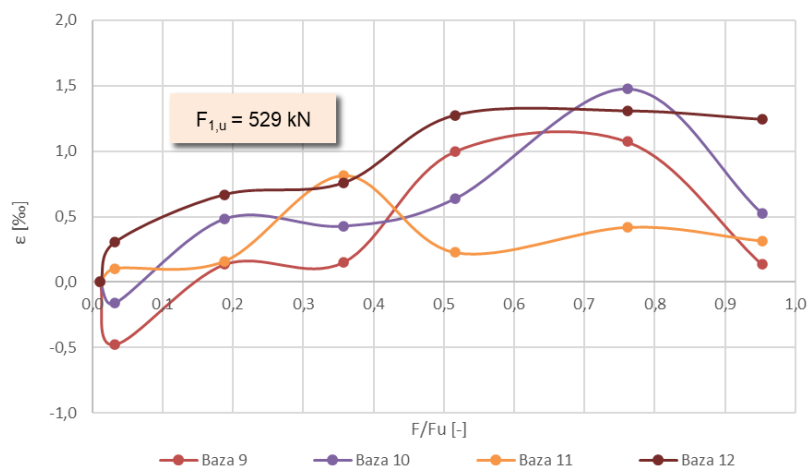
– tarcza wspornikowa DB I-0.5 (1) – *tensometria mechaniczna*



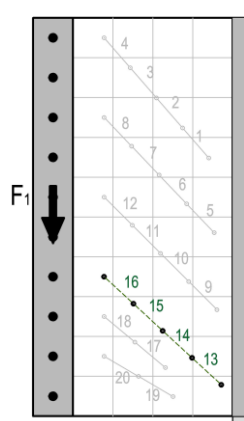
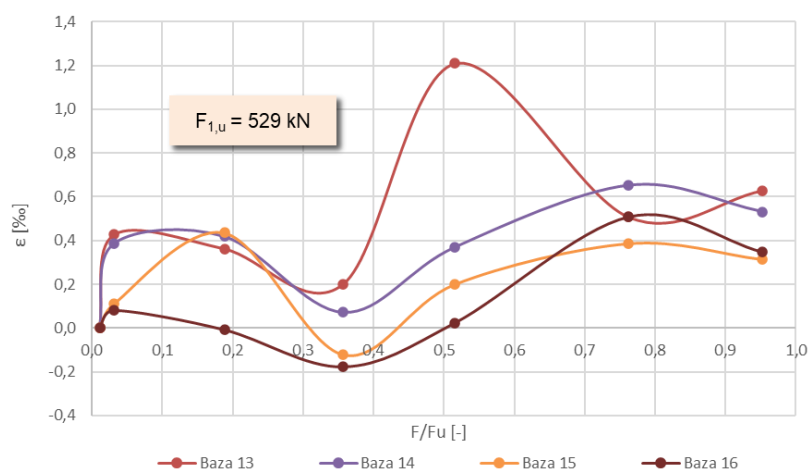
Rys. 4.44 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 1-4) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.



Rys. 4.45 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 5-8) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.

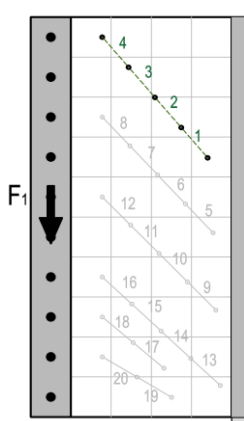
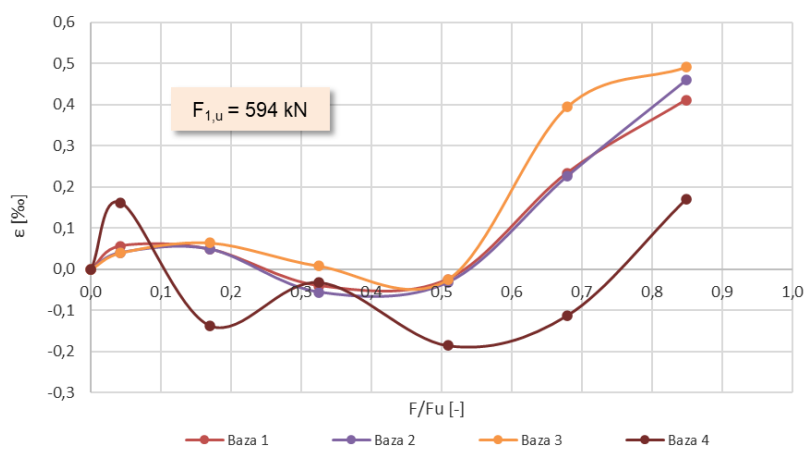


Rys. 4.46 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 9-12) tarczy wspornikowej układu DB I-o.5.

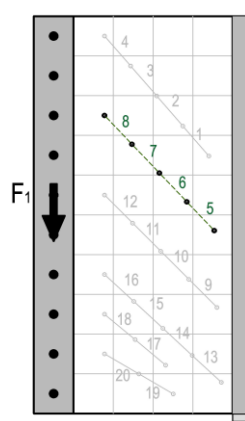
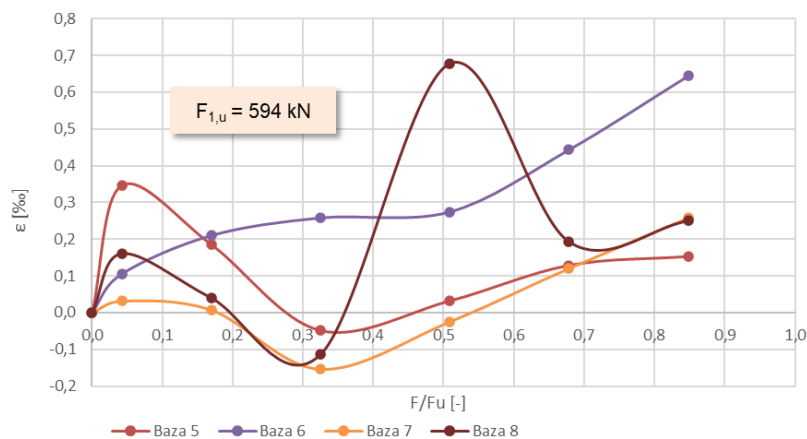


Rys. 4.47 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 13-16) tarczy wspornikowej układu DB I-o.5.

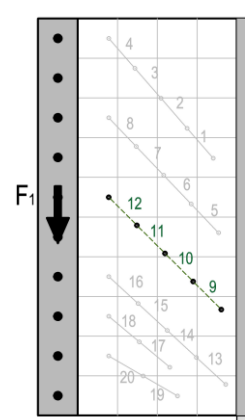
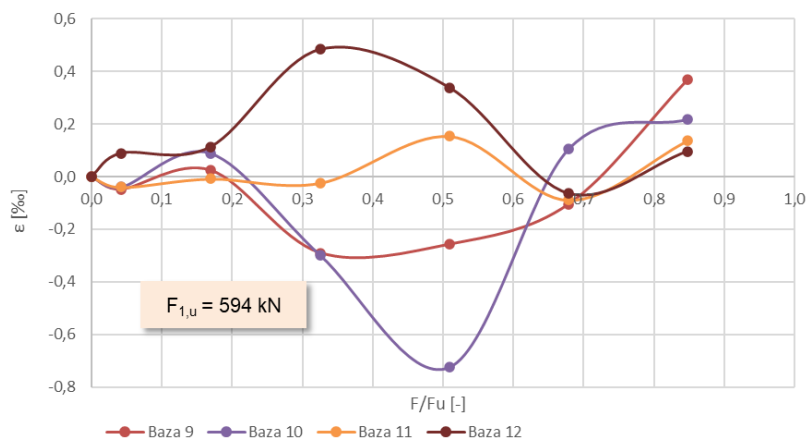
– tarcza wspornikowa DB II-o.5 (1) – tensometria mechaniczna



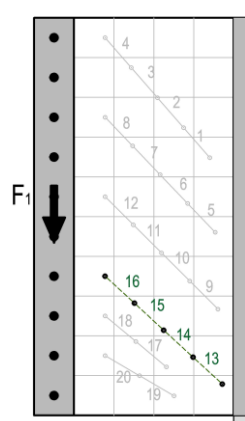
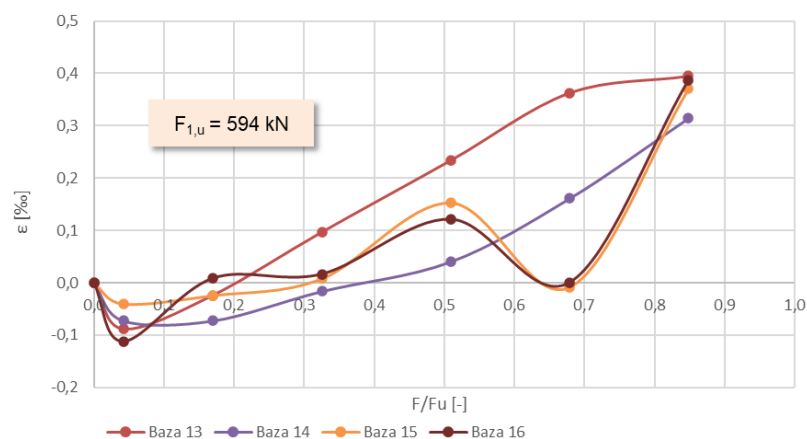
Rys. 4.48 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 1-4) tarczy wspornikowej układu DB II-o.5.



Rys. 4.49 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 5-8) tarczy wspornikowej układu DB II-o.5.



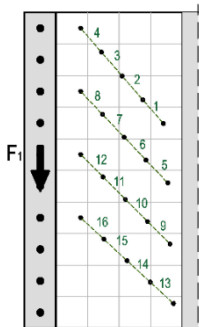
Rys. 4.50 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 9-12) tarczy wspornikowej układu DB II-o.5.



Rys. 4.51 Odształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 13-16) tarczy wspornikowej układu DB II-o.5.

Tabela 4.5 Średnie odkształcenia graniczne ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców tarczy wspornikowej dla serii I.

Tarcza wspornikowa	$F_1/F_{1,u}$ [-]	Odkształcenia ściskające ε_{cu} [‰]			
		baza 1-4	baza 5-8	baza 9-12	baza 13-16
DB I-0.5 (1)	0.95	0.325	0.584	0.554	0.580
DB II-0.5 (1)	0.85	0.476	0.384	0.206	0.367



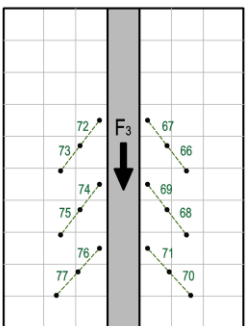
Na wielkość odkształceń ściskających betonu badanych tarcz wspornikowych wpływał sposób ukształtowania zbrojenia (tab. 4.5). Zastosowanie prętów ukośnych w tarczy DB II-0.5 (1) przyczyniło się do zmniejszenia odkształceń granicznych ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców betonowych, średnio o prawie 40 %.

Największe średnie odkształcenia na kierunku ściskanych krzyżulców w tarczy DB I - 0.5 (1) zaobserwowano w środkowej i dolnej części wspornika, $\varepsilon_{cu} = 0.584$ ‰. W tarczy DB II - 0.5 (1) największe odkształcenia ściskające zarejestrowano dla krzyżulca w górnym obszarze wspornika, $\varepsilon_{cu} = 0.476$ ‰, czyli o prawie 20% mniej niż w przypadku tarczy zbrojonej ortogonalnie.

– tarcza poprzeczna DB I-0.5 (3) i DB II-0.5(3) – *tensometria mechaniczna*

Tabela 4.6 Średnie odkształcenia graniczne ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców tarczy poprzecznej dla serii I.

Tarcza poprzeczna	$F_3/F_{3,u}$ [-]	Odkształcenia ściskające ε_{cu} [‰]			
		baza 66; 67; 72; 73	baza 68; 69; 74; 75	baza 70; 71; 76; 77	wartość średnia
DB I-0.5 (3)	0.95	0.202	0.709	0.635	0.515
DB II-0.5 (3)	0.85	0.375	0.721	0.520	0.539

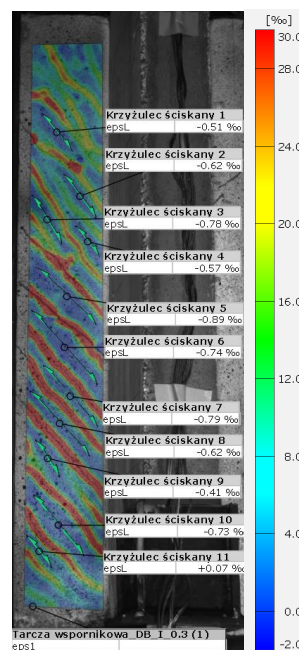
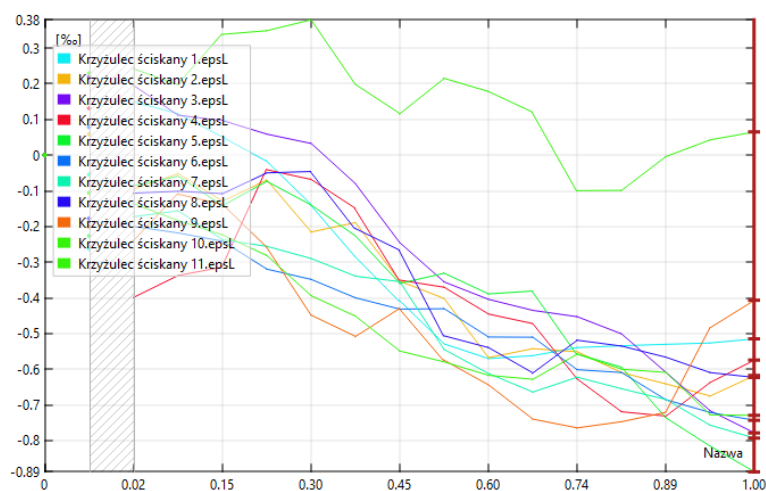


Odkształcenia w tarczy poprzecznej DB I-0.5 (3) na kierunku ściskanych krzyżulców, osiągnęły miejscami niższe wartości zarejestrowane przed zniszczeniem w porównaniu do odkształceń tarczy poprzecznej zbrojonej dodatkowymi prętami ukośnymi DB II-0.3 (3) (tab. 4.6). Powodem takiej relacji było najprawdopodobniej pojawienie się rys przecinających bazy pomiarowe w tarczy DB II-0.3 (3).

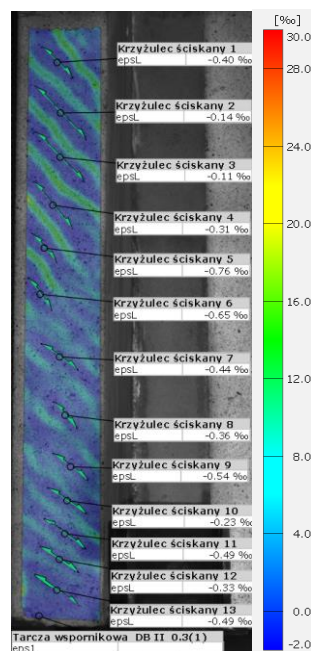
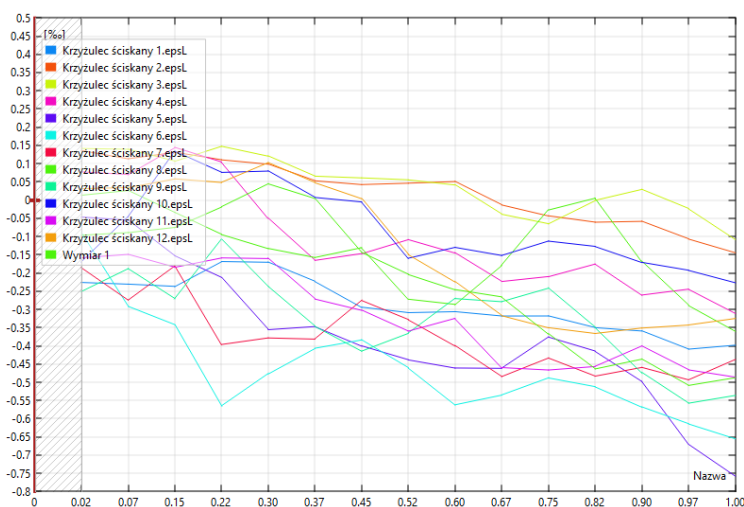
▪ *Seria II - układ tarcz DB I-0.3 i DB II-0.3*

- tarcza wspornikowa DB I-0.3 (1) i DB II-0.3 (1) - pomiar optyczny

Odształcenia ε_c na kierunku ściskanych betonowych krzyżulców przedstawiono na poniższych wykresach (rys. 4.52 i 4.53) w zależności od poziomu przykładanego obciążenia na wspornik $F_1/F_{1,u}$. Obok każdego wykresu zamieszczono lokalizację baz pomiarowych na tle mapy odkształceń głównych rozciąganych ε_1 z przypisaną im numeracją oraz wielkościami granicznymi ε_{cu} odpowiadającymi sile niszczącej $F_{1,u}$. Konwencję znaków jaką przyjęto na wykresach odkształceń betonu: „-” oznacza ściskanie, „+” rozciąganie.



Rys. 4.52 Odształcenia ε_c ściskanych betonowych krzyżulców w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.

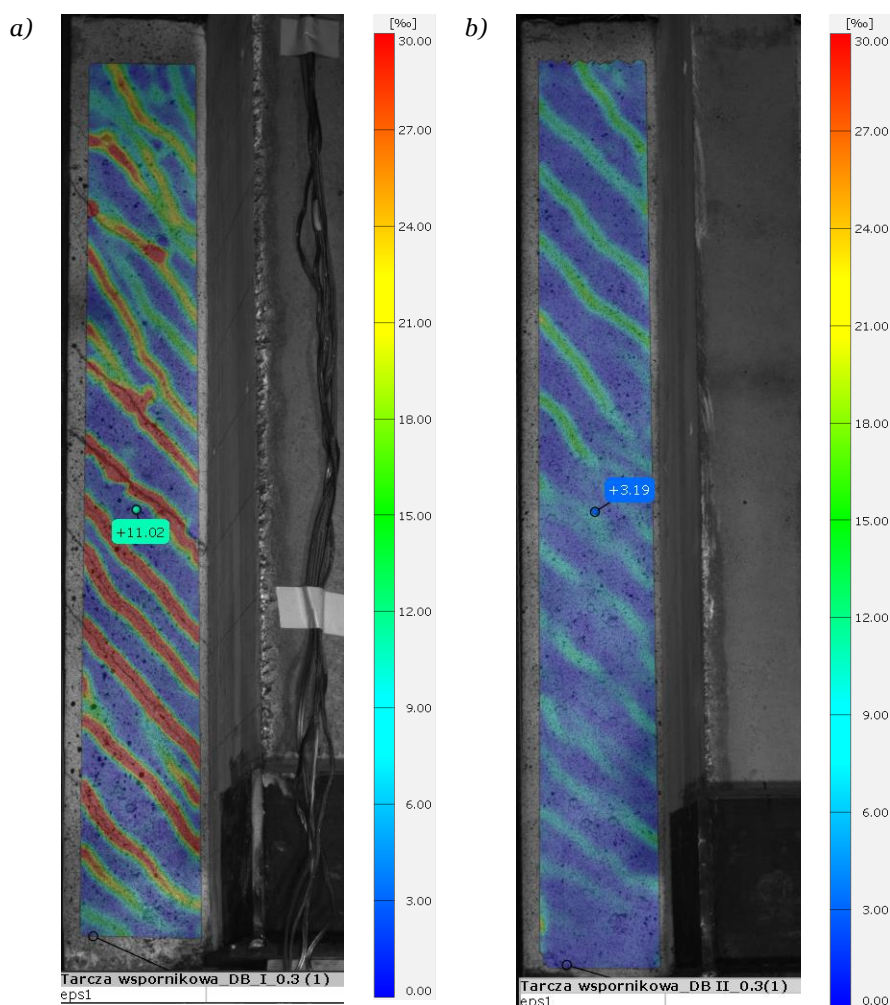


Rys. 4.53 Odształcenia ε_c ściskanych betonowych krzyżulców w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.

Jak można zaobserwować na podstawie rysunku 4.52, największe odkształcenia ε_c tarczy DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie zarejestrowano w środkowym obszarze na wysokości wspornika i wynosiły one w chwili zniszczenia $\varepsilon_{cu} = 0.89\text{‰}$. Natomiast średnia wartość odkształcenia otrzymana z pomiarów (krzyżulec 1-10) wynosiła $\varepsilon_{cu} = 0.67\text{‰}$.

W tarczy ze zbrojeniem ukośnym DB II-0.3 (1), największe wartości odkształceń ściskanych betonu również odnotowano w środkowym obszarze wspornika (rys. 4.53). Pod działaniem obciążenia niszczącego $F_{1,u}$ maksymalne odkształcenia wynosiły $\varepsilon_{cu} = 0.76\text{‰}$, czyli o 15 % mniej w porównaniu z wielkością graniczną odkształceń tarczy DB I-0.3 (1). Natomiast średnie wartości granicznych odkształceń betonu ściskanego były równe $\varepsilon_{cu} = 0.40\text{‰}$ i tym samym o 40% mniejsze od średnich odkształceń krzyżulców we wsporniku DB I-0.3 (1) o . Zatem wyężenia betonowych krzyżulców w tarczach o smukłości 0.3 również było zależne od sposobu ukształtowania zbrojenia.

Dla lepszego zobrazowania zachowania się badanych tarcz wspornikowych o smukłości 0.3 z odmiennie ukształtowanym zbrojeniem, przedstawiono porównanie rozkładu odkształceń głównych i średnich wartości ε_1 (rys. 4.54) i ε_2 (rys. 4.55) z całego obszaru badawczego z uwzględnieniem zarysowania w chwili zniszczenia ($F_{1,u}$), uzyskane za pomocą systemu Aramis.

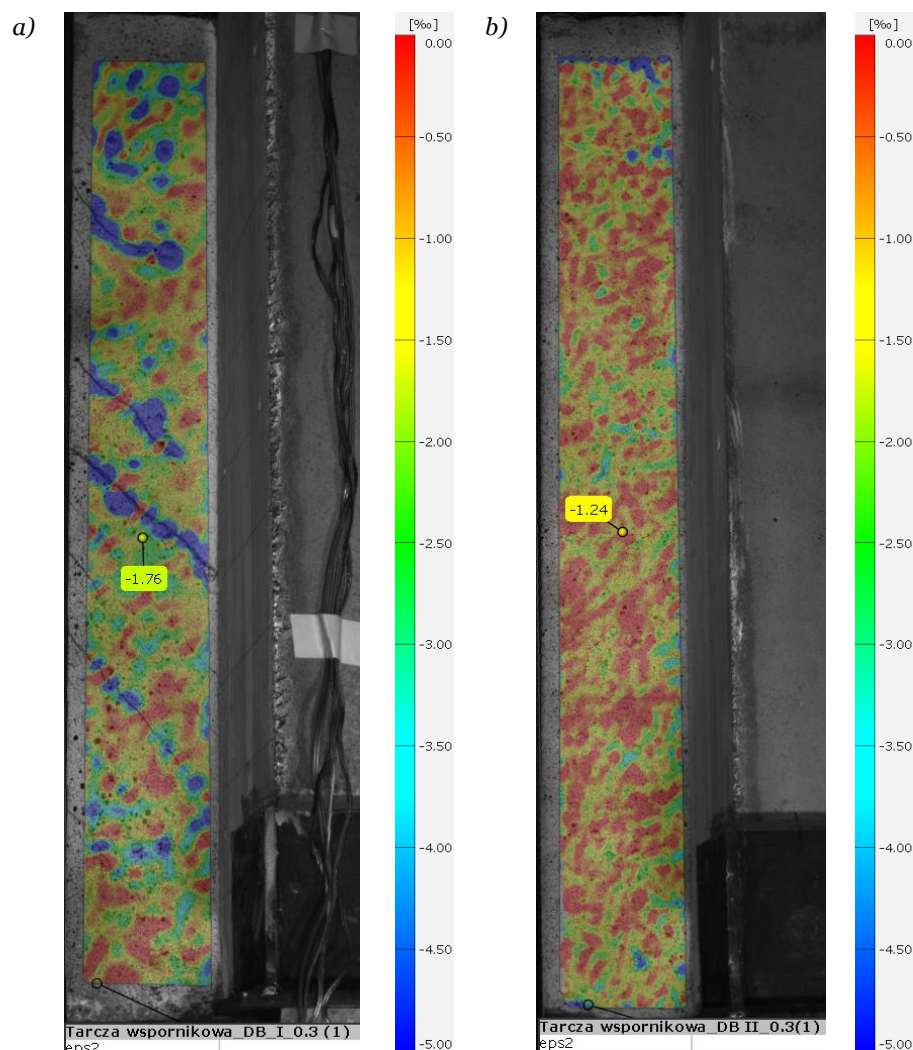


Rys. 4.54 Średnie odkształcenia główne ε_1 (z uwzględnieniem zarysowania) z całego obszaru tarczy wspornikowej w fazie zniszczenia: a) DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie, b) DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.

Porównując obrazy odkształceń rozciąganych ε_1 (rys. 4.54) można zauważyć znaczne różnice w obrazach zarysowania badanych tarcz pod działaniem obciążenia niszczącego dla którego wartości

graniczne $F_{1,u}$ obu wsporników były zbliżone, $F_{1,u} = 935 \text{ kN}$ tarcza DB I- 0.3 (1) i $F_{1,u} = 930 \text{ kN}$ tarcza DB II-0.3 (1). W tarczy ze zbrojeniem ortogonalnym (rys. 4.54a) odkształcenia ε_1 osiągnęły największe wartości w dolnym i środkowym obszarze wspornika, z widocznym intensywnym zarysowaniem w fazie zniszczenia.

Porównując odkształcenia ε_2 badanych wsporników (rys. 4.55) również widoczne są odmienne obrazy pod działaniem obciążenia niszczącego. Zatem sposób ukształtowania zbrojenia analizowanych tarcz wspornikowych układów DB-0.3 istotnie wpłynął na rozkład odkształceń i wyężenie betonu.



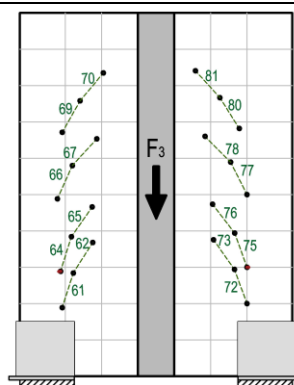
Rys. 4.55 Średnie odkształcenia główne ε_2 tarczy wspornikowej: a) DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie, b) DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.

- tarcza poprzeczna DB I-0.3 (3) i DB II-0.3 (3) - tensometria mechaniczna

Zastosowanie w tarczy poprzecznej DB II-0.3 (3) prętów ukośnych, przyczyniło się do zmniejszenia odkształceń ε_c na kierunku ściskanych krzyżulców betonowych, gdzie dla wartości granicznych spadek ten wynosił średnio 30 % w stosunku do odkształceń ε_{cu} tarczy poprzecznej ze zbrojeniem ortogonalnym DB I-0.3 (3) (tab. 4.7).

Tabela 4.7 Średnie odkształcenia graniczne ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców tarczy poprzecznej dla serii II.

Seria II (DB - 0.3)	$F_3 / F_{3,u}$ [-]	Odkształcenia ściskające ε_{cu} [‰]				
		baza	baza	baza	baza	wartość średnia
		69; 70; 80; 81	66; 67; 77; 78	64; 65; 75; 76	61; 62; 72; 73	
DB I-0.3 (3)	0.82	0.940	0.308	0.745	0.486	0.620
DB II-0.3 (3)	0.82	0.589	0.502	0.405	0.231	0.432



Wnioski dotyczące odkształceń betonu:

- badania stanów deformacji za pomocą *techniki DIC* (system *Aramis*) pozwoliły na bardziej zaawansowane analizy w stosunku do standardowych metod pomiarowych jakimi są m.in. tensometria mechaniczna z uwagi na możliwość bezstykowego ciągłego pomiaru na całej powierzchni badanych tarcz wspornikowych,
- dzięki zastosowanym pomiarom systemu *Aramis* możliwe było określenie miejsc wyężenia betonu [30], [31] na danym kierunku odkształceń głównych, co jest czynnikiem kluczowym do prawidłowej oceny stanu zarysowania i nośności. W przypadku pomiarów ekstensometrem istnieje duże ryzyko, że wstępnie dobrane kierunki baz nie będą pokrywać się z głównymi, przez co zwiększa się ryzyko przechodzenia przez daną bazę pomiarową rysy.

Tarcza wspornikowa

- *wpływ ukształtowania zbrojenia*
 - zastosowanie zbrojenia ukośnego spowodowało istotne zmiany w wyężeniu obszarów odkształceń betonu, zwłaszcza na kierunku głównych odkształceń rozciąganych ε_t , w związku z pojawiającym się zarysowaniem
- *wpływ smukłości*
 - przy zmniejszonej smukłości wspornika tarczowego zaobserwowano zwiększenie wartości odkształceń na kierunku ściskanych krzyżulców ε_c , w stanie granicznym nośności
 - średnie wartości odkształceń otrzymane z pomiarów dla całego obszaru badanego wspornika znacząco się zmniejszyły, na korzyść tarczy zbrojonej z prętami ukośnymi i niezależnie od analizowanej smukłości tarczy wspornikowej, spadek ten wynosił ok. 40%.

Tarcza poprzeczna

- *wpływ ukształtowania zbrojenia*
 - w I serii badań nie zaobserwowano znaczących zmian w pomiarach odkształceń betonu, natomiast w II serii badań odnotowano ograniczenie wyężenia ściskanych krzyżulców przy zastosowaniu prętów ukośnych o niecałe 40% w stanie granicznym nośności.

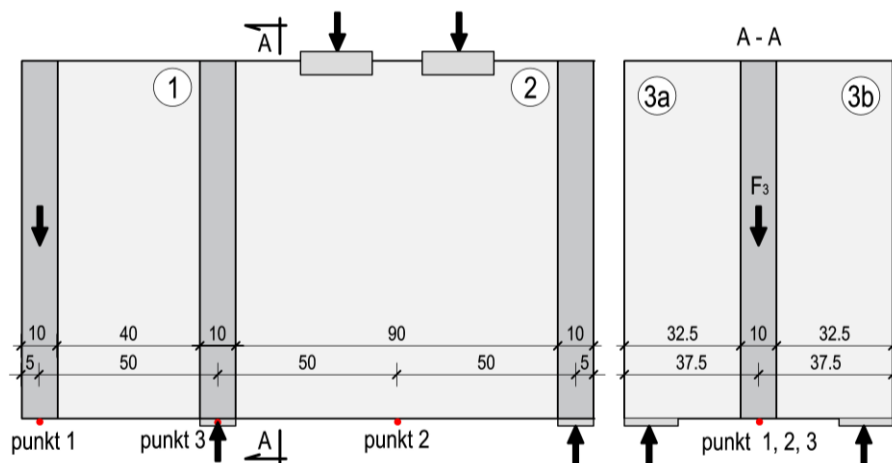
4.3.3 Przeszacowania

Punkty pomiarowe przeszacowania pionowego u_i badanych tarcz żelbetowych (rys. 4.55 i 4.57) założono zgodnie z przyjętym rozmieszczeniem i numeracją czujników indukcyjnych (patrz rys. 4.26 w p. 4.2 Przeszacowania), w następującej kolejności:

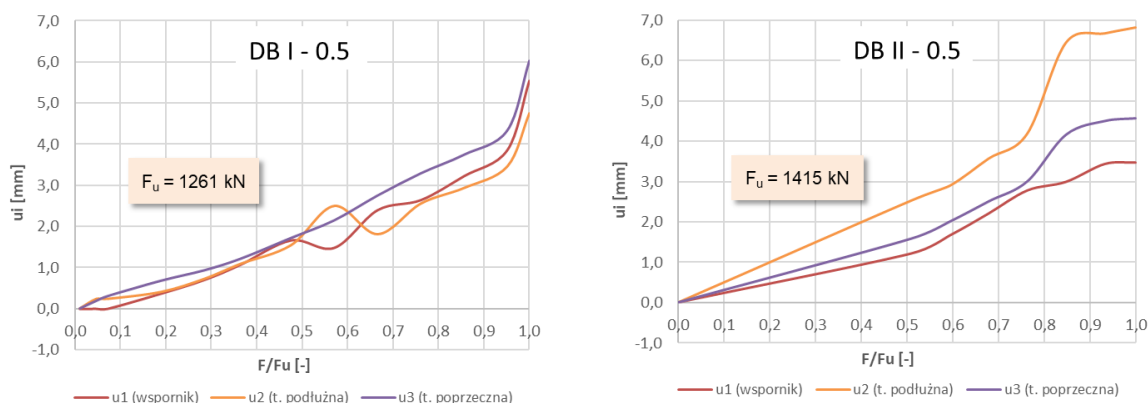
- punkt 1 – pomiar przeszacowania u_1 , na krawędzi zewnętrznej tarczy wspornikowej (1), w osi przykładanego obciążenia
- punkt 2 – pomiar przeszacowania u_2 , w środku rozpiętości tarczy podłużnej (2),
- punkt 3 – pomiar przeszacowania u_3 , w środku rozpiętości tarczy poprzecznej (3).

Zachowanie się tarcz pod wzrastającym obciążeniem w obu seriach badawczych (DB-0.5 i DB-0.3) zobrazowano na wykresach (rys. 4.56 i 4.58) w relacji przeszacowanie u_i - stosunek obciążenia F do obciążenia niszczonego F_u (F / F_u).

Seria I – układ tarcz DB I-0.5 i DB II-0.5



Rys. 4.56 Lokalizacja punktów pomiarowych dla tarcz układu DB-0.5 (I seria badań).



Rys. 4.57 Przeszacowania pionowe dolnej krawędzi tarcz układów DB I-0.5 i DB II-0.5.

Porównując wielkości przeszacowania u_1 (tarcza wspornikowa) i u_3 (tarcza poprzeczna) badanych układów tarczowych DB I-0.5 (zbrojonych ortogonalnie) i DB II-0.5 (zbrojonych w sposób mieszany – siatka ortogonalna i pręty ukośne) można zaobserwować wpływ zbrojenia ukośnego na zwiększenie sztywności tarcz (rys. 4.57).

W przypadku tarczy wspornikowej DB I-0.5 (1) maksymalne przeszacowanie na końcu wspornika w chwili zniszczenia wyniosło $u_1 = 5.5$ mm i było o 70% wyższe w odniesieniu do przeszacowania uzyskanego dla tarczy wspornikowej DB II-0.5 (1), dla których wartość przeszacowań

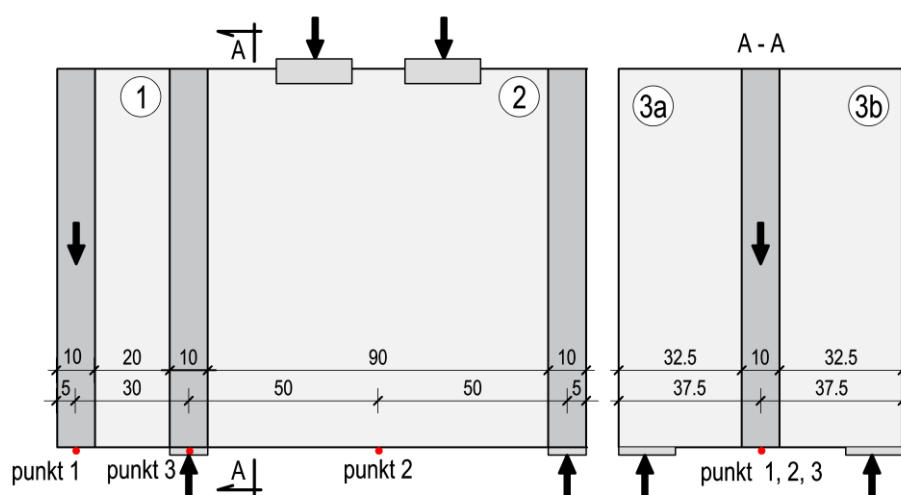
przy $F = F_u$ wyniosła $u_1 = 3.5$ mm. Dla obciążenia użytkowego równego ok. $0.6 F_u$ wartość przemieszczenia u_1 obu badanych tarcz wspornikowych są zbliżone. Dopiero po przekroczeniu wielkości $0.7 F_u$ większe przemieszczenia wspornika zaobserwowano w układzie *DB I-0.5*.

Największa wartość przemieszczeń tarczy poprzecznej *DB I-0.5 (3)* wynosiła $u_3 = 6.0$ mm i była 1.5 razy większa od przemieszczeń u_3 tarczy *DB II-0.5 (3)* zbrojonej w sposób mieszany. Wyniki uzyskanych pomiarów w obu badanych układach wskazują również na wzrost przemieszczeń tarczy poprzecznej w chwili pojawienia się zarysowania w obszarze podporowym, prowadzącego w ostateczności do wyczerpania nośności tarcz poprzecznych i zniszczenia obu badanych układów tarczowych. W układzie tarcz *DB I-0.5* rysa, która pojawiła się nad podporą i spowodowała zniszczenie, została zarejestrowana przy $F = 1200$ kN ($0.95F_u$), natomiast w przypadku układu *DB II-0.5* zarysowanie nad podporą odnotowano przy sile 960 kN, co odpowiadało poziomowi obciążenia równemu ok. $0.7F_u$.

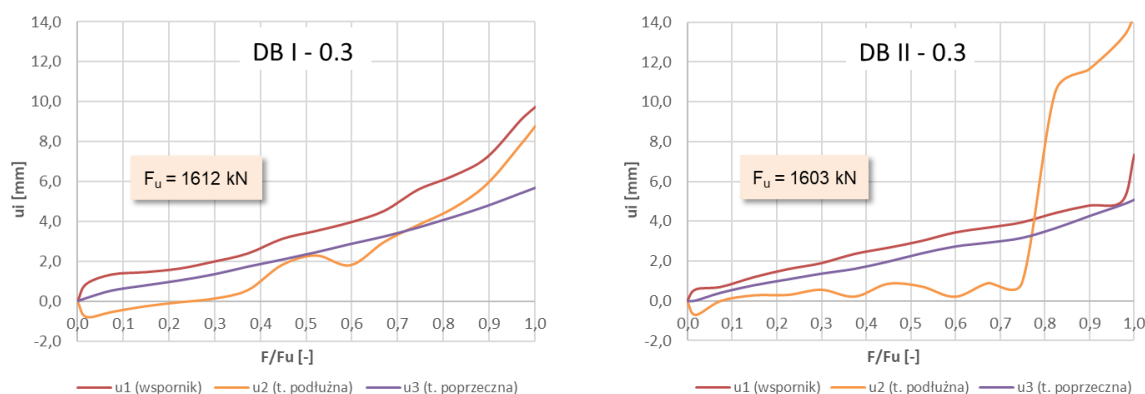
Wyniki pomiarów przemieszczeń u_2 w środku rozpiętości tarczy podłużnej wskazują, iż wielkość przemieszczenia analizowanej tarczy podłużnej zależna jest od sztywności pozostałych tarcz (wspornikowych i poprzecznych), zbrojonych odmiennie w każdym układzie tarczowym (*DB I-0.5* oraz *DB II-0.5*). W układzie tarcz *DB II-0.5*, w którym tarcze wspornikowe i poprzeczne zbrojono w sposób mieszany, tarcza podłużna doznała największych przemieszczeń u_2 . Przy obciążeniu bliskiemu niszczącemu F_u , wartość przemieszczeń wynosiła $u_2 = 6.8$ mm, czyli o ponad 40% więcej niż w przypadku tarczy podłużnej układu *DB I-0.5* ($u_2 = 4.7$ mm), w którym tarcza wspornikowa i poprzeczna zbrojona była ortogonalnie.

Seria II – układ tarcz *DB I-0.3* i *DB II-0.3*

Analizując przemieszczenia w drugiej serii badań (ze zmniejszoną smukłością wspornika do wartości 0.3) również obserwujemy korzystny wpływ zbrojenia ukośnego na wielkości przemieszczeń, zarówno w tarczy wspornikowej u_1 , jak i tarczy poprzecznej u_3 (rys. 4.59).



Rys. 4.58 Lokalizacja punktów pomiarowych dla tarcz układu *DB-0.3* (II seria badań).



Rys. 4.59 Przemieszczenia pionowe dolnej krawędzi tarcz układów DB I-0.3 i DB II-0.3.

Przemieszczenia tarcz wspornikowych u_1 , niezależnie od zastosowanego kształtu zbrojenia, zachowywały się podobnie do poziomu obciążeń równego ok. $0.5F_u$. W miarę dalszego wzrostu obciążenia, przemieszczenia tarczy wspornikowej ze zbrojeniem ortogonalnym DB I-0.3 (1) przyrastają coraz szybciej i ostatecznie osiągają maksymalną wartość przy zniszczeniu równą $u_1 = 9.8$ mm, czyli ok. 30% większą od maksymalnego przemieszczenia $u_1 = 7.7$ mm wspornika DB II-0.3 (1) zbrojonego w sposób mieszany. Wzrost przemieszczeń tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) najprawdopodobniej związany był z coraz większą liczbą pojawiających się rys, jak również z ich znacznym zwiększaniem szerokości, co jednocześnie wiązało się ze spadkiem sztywności elementu.

W tarczach poprzecznych wzrost przemieszczeń u_3 jest jednostajny w całym cyklu obciążenia dla obydwu badanych układów DB-0.3, niezależnie od przyjętego ukształtowania zbrojenia. Niewielki wzrost wartości przemieszczeń tarczy poprzecznej DB I-0.3 (3) zbrojonej ortogonalnie w stosunku do tarczy ze zbrojeniem ukośnym DB II-0.3 (3) zaczyna być zauważalny od poziomu obciążenia równego ok. $0.6 F_u$, jednak końcowe wartości różnią się od siebie o niecałe 10% (na korzyść tarczy poprzecznej układu DB II-0.3).

W tarczy podłużnej układu DB I-0.3 (2) wzrost przemieszczeń u_2 odnotowano po przekroczeniu obciążenia $0.3 F_u$ i w chwili zniszczenia maksymalne przemieszczenia wyniosły $u_2 = 8.3$ mm. W tarczy podłużnej układu DB II-0.3 (2) wartości przemieszczeń u_2 początkowo oscylowały w okolicy zera, natomiast dopiero po przekroczeniu obciążenia $0.7 F_u$ zarejestrowano intensywny wzrost przemieszczeń, osiągający w chwili zniszczenia wartość $u_2 = 14.3$ mm. Zatem pomiary przemieszczenia u_2 istotnie odbiegają od pomiarów wykonanych dla pozostałych tarcz, budząc tym samym pewne obawy o poprawności ich wykonania i uwzględnienia w wynikach badań.

Wnioski dotyczące przemieszczeń:

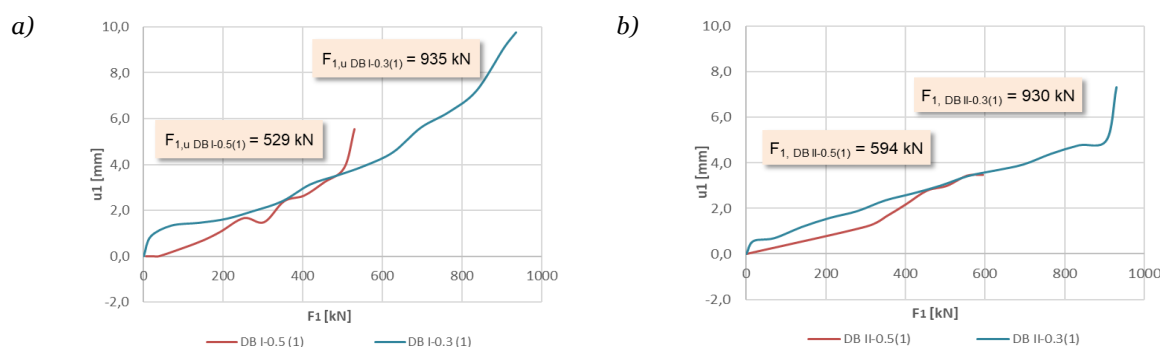
Tarcza wspornikowa

- *wpływ ukształtowania zbrojenia*
 - zastosowanie zbrojenia ukośnego w tarczach wspornikowych obciążonych po wysokości spowodowało zmniejszenie wielkości przemieszczenia u_1 niezależnie od badanej smukłości tarczy. Czyli odmiennie od przypadku tarcz wspornikowych ($l/H=0.5$) obciążonych na górnej krawędzi, gdzie wpływ ukształtowania zbrojenia na przemieszczenia wspornika nie był zauważalny [11]. W badanych tarczach wspornikowych o smukłości 0.5 (I seria badań) spadek

maksymalnych wielkości przemieszczeń wynosił 36 %, a w przypadku wsporników o smukłości 0.3 (II seria badań) spadek wynosił 21% w chwili zniszczenia,

▪ wpływ smukłości

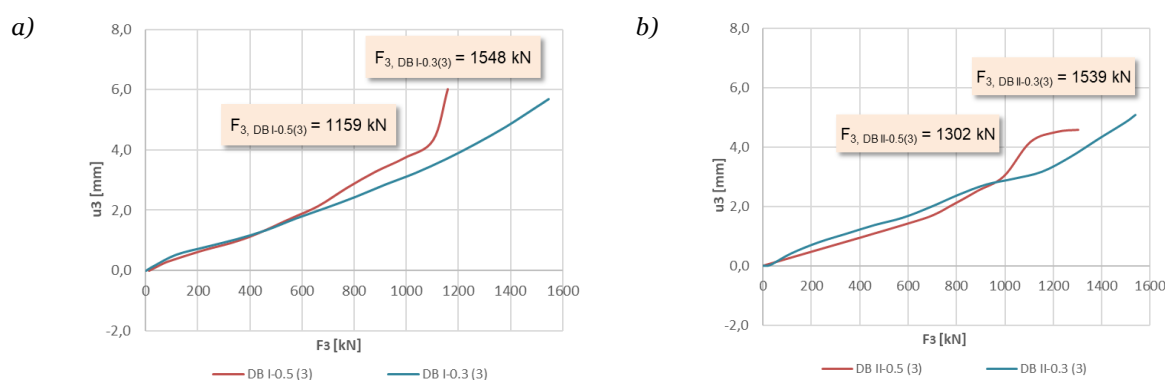
- Tarcze wspornikowe o mniejszej smukłości osiągnęły większe wartości przemieszczeń w chwili zniszczenia, niezależnie od ukształtowania zbrojenia. Należy jednak mieć na uwadze, że zniszczenie w przestrzennych układach tarczowych smukłości wspornika $l/H=0.5$ nastąpiło od strony tarczy poprzecznej. Dlatego pogląd na relację przemieszczenia wspornika względem danego poziomu obciążenia wydaje się właściwy, co przedstawiono na rysunku 4.60,
- Niezależnie od rodzaju zastosowanego zbrojenia przy zmiennej smukłości tarcz wspornikowych wartości przemieszczeń są do siebie zbliżone względem danego poziomu obciążenia. Jedynie tuż przed samym zniszczeniem, w przypadku układów przestrzennych zbrojonych ortogonalnie, tarcza wspornikowa DB I-0.5(1) osiągnęła wyższe wartości od tarczy DB I-0.3(1) o mniejszej smukłości (rys. 4.60a).



Rys. 4.60 Przemieszczenia pionowe u_1 dolnej krawędzi tarcz wspornikowych o smukłości 0.5 i 0.3 w odniesieniu do siły niszczącej $F_{1,u}$: a) zbrojonych ortogonalnie, b) zbrojonych ortogonalnie z prętami ukośnymi.

Tarcza poprzeczna

▪ wpływ ukształtowania zbrojenia



Rys. 4.61 Przemieszczenia pionowe u_3 dolnej krawędzi tarcz poprzecznych w I i II serii badań: a) zbrojonych ortogonalnie, b) zbrojonych ortogonalnie z prętami ukośnymi.

- zastosowanie zbrojenia ukośnego w tarczach poprzecznych również korzystnie wpłynęło na wielkości przemieszczeń u_3 w obu seriach badawczych. W I serii badań, spadek maksymalnych wielkości przemieszczeń w tarczy DB II-0.5(3) w stosunku do tarczy poprzecznej zbrojonej ortogonalnie DB I-0.5(3) wynosił ok. 33%. Natomiast w przypadku II serii badań wartości

przemieszczeń w fazie zniszczenia tarczy zbrojonej w sposób mieszany DB II-0.3 (3) były mniejsze o 7% od tarczy zbrojonej ortogonalnie DB I-0.3 (3),

- porównanie przemieszczeń u_3 tarcz poprzecznych zbrojonych w ten sam sposób lecz badanych w dwóch różnych seriach (rys. 4.60), wykazało zgodność przemieszczeń tarcz do poziomu obciążenia $F_3 = 600 \text{ kN}$ przy zastosowaniu zbrojenia ortogonalnego (rys. 4.60 a), a w przypadku tarcz ze zbrojeniem mieszanym (rys. 4.60 b) zbliżone wyniki przemieszczeń uzyskano do poziomu $F_3 = 1000 \text{ kN}$. Większą zgodność przemieszczeń u_3 tarcz ze zbrojeniem ukośnym można tłumaczyć tym, iż tarcze te miały większą sztywność w porównaniu z traczami zbrojonymi ortogonalnie. Były zatem mniej podatne na działanie tarcz przewieszonych, w tym tarcz wspornikowych, które w dwóch różnych seriach badawczych miały odmienne smukłości.

4.3.4 Zarysowanie i nośność

Analizę zarysowania i nośności badanych układów tarczowych w I i II serii badań przedstawiono w pierwszej kolejności w odniesieniu do całego przestrzennego układu obciążonego siłą F (z prasy wytrzymałościowej), gdzie zamieszczono obrazy zarysowań z uwzględnieniem rozwoju rys i ich szerokości od przyrastającego obciążenia F . Zestawiono także wielkości sił F_{cr} powodujących powstanie pierwszej rysy w analizowanych układach tarczowych oraz wielkości sił niszczących F_u , prowadzących do wyczerpania nośności wraz z obrazami badanych elementów po zniszczeniu.

Kolejno przeprowadzono analizę porównawczą tarcz wspornikowych i poprzecznych z uwzględnieniem wielkości sił rysujących $F_{i,cr}$ i niszczących (maksymalnych) $F_{i,u}$ przypadających na poszczególne tarcze, obrazów zarysowań i szerokości rys w zależności od sposobu ukształtowania zbrojenia, a w przypadku wspornika również dla zmiennej smukłości.

- PRZESTRZENNE UKŁADY TARCZOWE -

Morfologia rys

Obrazy zarysowanych tarcz badanych przestrzennych układów przedstawiono na rysunkach 4.62-4.65 dla I serii badań (DB-0.5) oraz na rysunkach 4.66- 4.69 dla II serii badań (DB-0.5). Przypisana numeracja powierzchni tarcz (zgodnie z oznaczeniem podanym już wcześniej na rys. 4.1), odpowiada wybranym płaszczyznom na których dokonywano rejestracji rys. W przypadku II serii badawczej dla układów tarcz DB-0.3 wprowadzono dodatkową numerację tarczy wspornikowej (1') oraz tarczy przesłowej (2'), które odnoszą się do powierzchni znajdujących się po drugiej stronie badanego elementu. Powodem zmiany powierzchni tarczy przy odrębnym oznaczaniu propagacji rys były wykonywane równolegle podczas prowadzonych badań, pomiary systemem Aramis na powierzchniach tarcz (1) i (2), co jednoznacznie wiązało się z brakiem możliwości ingerencji w analizowane płaszczyzny.

W analizie morfologii rys, jako pierwsze przedstawiono obrazy zarysowań przestrzennych układów tarczowych zarejestrowane tuż po zniszczeniu (seria I - rys. 4.62-63, seria II - rys. 4.66 - 67). Na rysunkach oznaczono kolorem czerwonym rysy niszczące oraz wybrane punkty pomiaru szerokości rys wykonane mikroskopem. Szerokość rys została podana w zależności od zwiększającego się obciążenia F z prasy wytrzymałościowej.

Kolejne obrazy zarysowań tarcz w serii I (rys. 4.64 - 65) i serii II (rys. 4.68 - 69), przedstawiają morfologię rys przestrzennych układów tarczowych z podziałem na rysy powstające przy danym poziomie obciążenia F z prasy wytrzymałościowej. Oznaczenie propagacji rys przy zwiększającym się poziomie obciążenia wyróżniono odpowiednimi kolorami, zamieszczonymi w legendzie. Na rysunkach przedstawiono również wartości wielkości kątów nachylenia poszczególnych rys ukośnych względem osi poziomej badanych tarcz.

▪ *Seria I – układ tarcz DB-0.5*

Pierwsze zarysowanie w przestrzennym układzie tarcz DB I-0.5 (ze zbrojeniem ortogonalnym) odnotowano przy sile $F_{cr} = 357 \text{ kN}$, co stanowiło ok. $0.28 F_u$. Była to rysa prostopadła w górnym rozciągającym narożu tarczy wspornikowej (1) oraz niewielka rysa ukośna w tarczy podłużnej (2) (rys. 4.64). W przypadku układu tarcz DB II-0.5 (zbrojonego w sposób mieszany), pierwsza rysa powstała przy sile $F_{cr} = 360 \text{ kN}$ ($0.25 F_u$) w tarczy podłużnej (2) i była to rysa ukośna (rys. 4.65). Rysę pionową w tarczy wspornikowej (1) odnotowano dopiero przy kolejnym poziomie obciążenia $F = 460 \text{ kN}$ ($0.37 F_u$). Przy dalszym obciążaniu układów tarczowych, pojawiające się zarysowanie to w zdecydowanej większości rysy diagonalne.

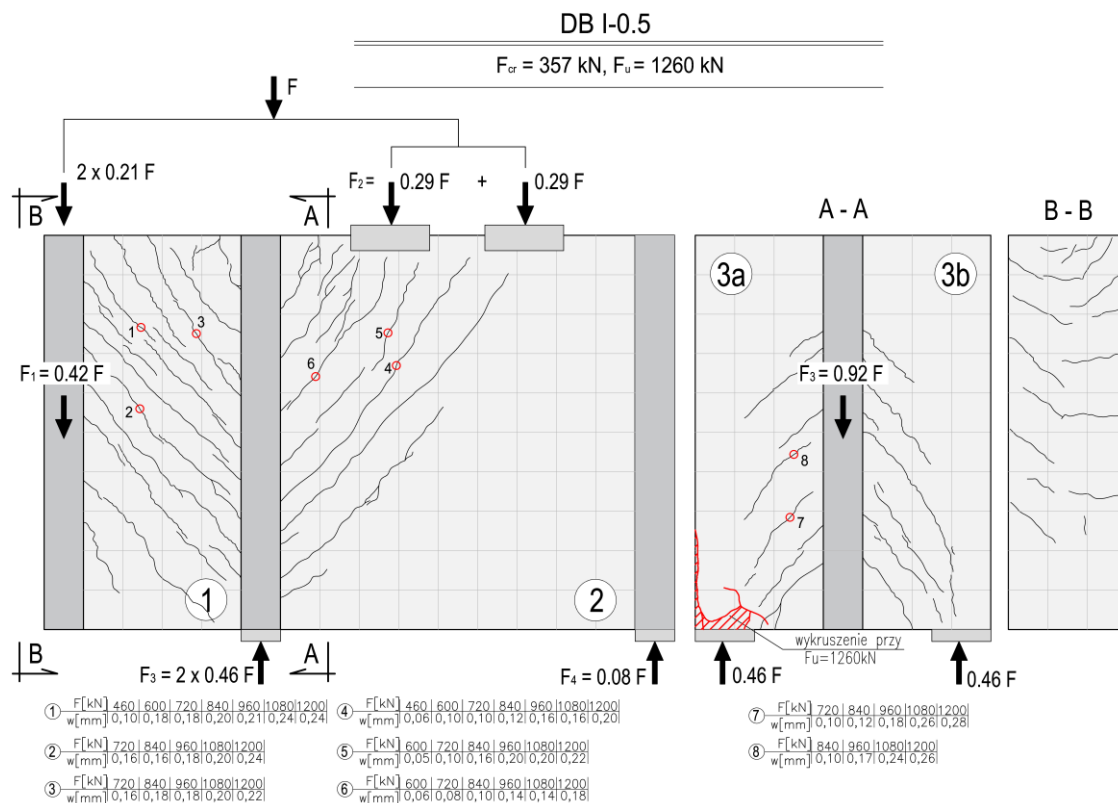
W tarczach wspornikowych (1), rysy ukośne pojawiające się wzdłuż wysokości elementu, przebiegały od krawędzi zewnętrznej na której przykładano obciążenie do podparcia pośredniego na tarczy poprzecznej. Ukośne rysy w tarczy wspornikowej zbrojonej ortogonalnie, w chwili zniszczenia układu DB I-0.5, objęły swym zakresem całą płaszczyznę (rys. 4.62), podczas gdy tarcza wspornikowa DB II-0.5 (1) zarysowała się do ok. 0.8 wysokości elementu, mierząc od górnej krawędzi (rys. 4.63). Nachylenie głównych rys diagonalnych, odzwierciedlających przebieg ściskanych krzyżulców we wsporniku DB I-0.5 (1) zawierało się w przedziale $41^\circ - 56^\circ$. Pojedyncza rysa w środkowej części tarczy osiągnęła minimalne nachylenie do osi poziomej równe 41° , a pozostałe rysy tworzące się bliżej górnej, bądź dolnej krawędzi zwiększały odpowiednio swój kąt nachylenia. W tarczy wspornikowej DB II-0.5 (1), rysy w środkowym obszarze badanego elementu, mieściły się w stosunkowo wąskim zakresie kątowym $42^\circ - 44^\circ$ i zwiększały swe nachylenie ku krawędzi górnej do wartości 53° .

Układ rys w tarczy podłużnej (2) w każdym z badanych przestrzennych układów, potwierdza, iż większość obciążenia przekazywana była na podporę z lewej strony – przy połączeniu z tarczą poprzeczną. Rysy ukośne tworzyły się na kierunku od zadanego obciążenia skupionego na górnej krawędzi do liniowego podparcia pośredniego na tarczy poprzecznej (3). Przy drugiej podporze, na którą przypadała niewielka wartość reakcji, nie zaobserwowano żadnego zarysowania. Nachylenie rys w tych tarczach mieściło się w zakresie $44^\circ - 52^\circ$ dla DB I-0.5 (2) i w przedziale $46^\circ - 57^\circ$ dla DB II-0.5 (2).

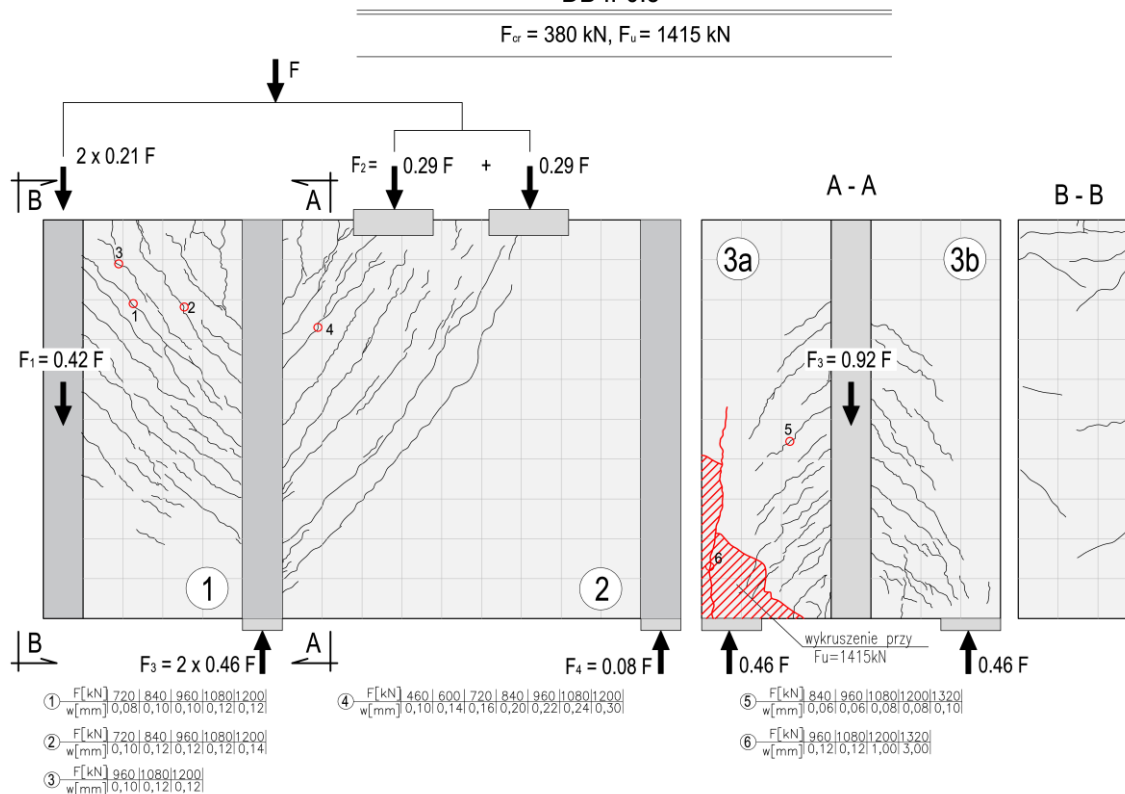
W tarczach poprzecznych (3) przy wzrastającym obciążeniu, przebieg rys był mniej liniowy a bardziej paraboliczny, zwłaszcza w przypadku tarczy z zastosowanym zbrojeniem ukośnym DB II-0.5 (3). Pomiar wielkości kątów nachylenia rys nie był zatem w tym przypadku łatwy i jednoznaczny do stwierdzenia. Przedział wartości kątów w tarczach poprzecznych był z pewnością większy niż w tarczach wspornikowych i zmieniał się wraz z przyrostem obciążania tarcz. Dla początkowo pojawiających się rys wynosił w przybliżeniu $38^\circ - 60^\circ$ niezależnie od kształtu zbrojenia tarczy poprzecznej. W końcowej fazie obciążania nachylenia rys zwiększało się miejscami nawet do 70° . Zarysowanie w stanie granicznym nośności, dla obydwu tarcz poprzecznych DB I-0.5 (3) i DB II-0.5 (3) występowało w obszarze do ok. 80% wysokości tarczy (licząc od krawędzi dolnej) i przebiegało od zadanego w sposób pośredni



obciążenia (pochodzącego z przewieszenia tarczy wspornikowej (1) i podłużnej (2)) w kierunku podpór punktowych, umiejscowionych symetrycznie po obu stronach dolnej krawędzi tarczy poprzecznej (rys. 4.62 i 4.63).

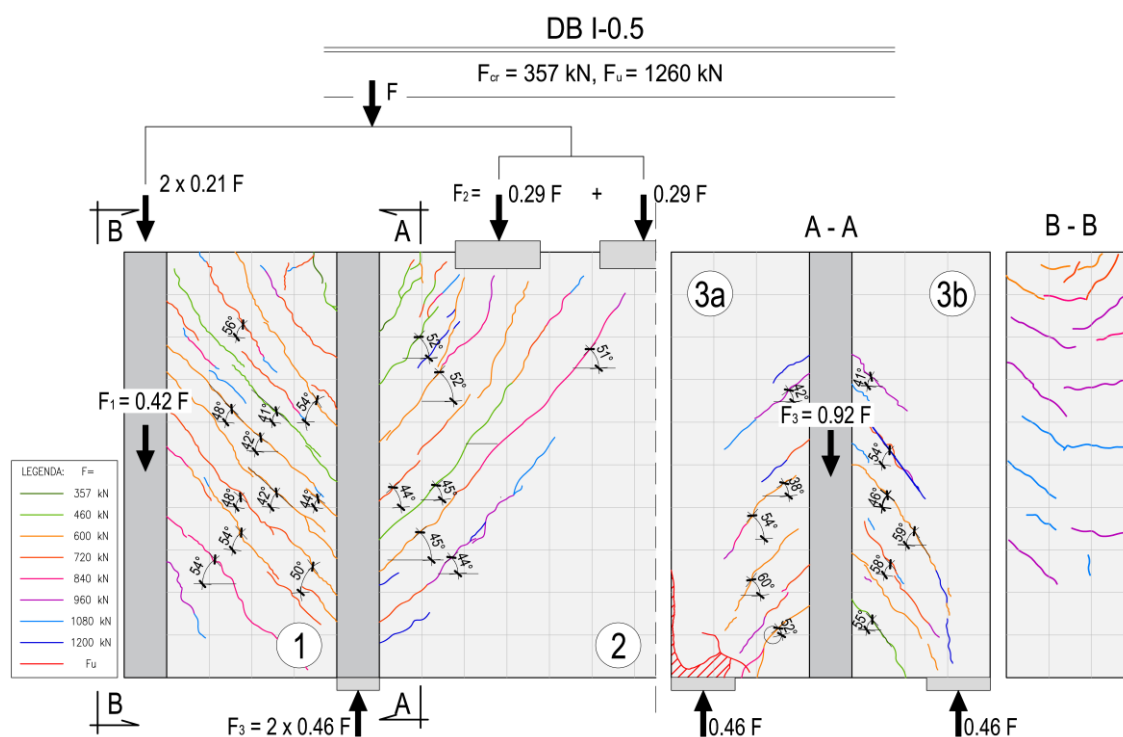


Rys. 4.62 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB I-0.5 w stanie nośności granicznej.

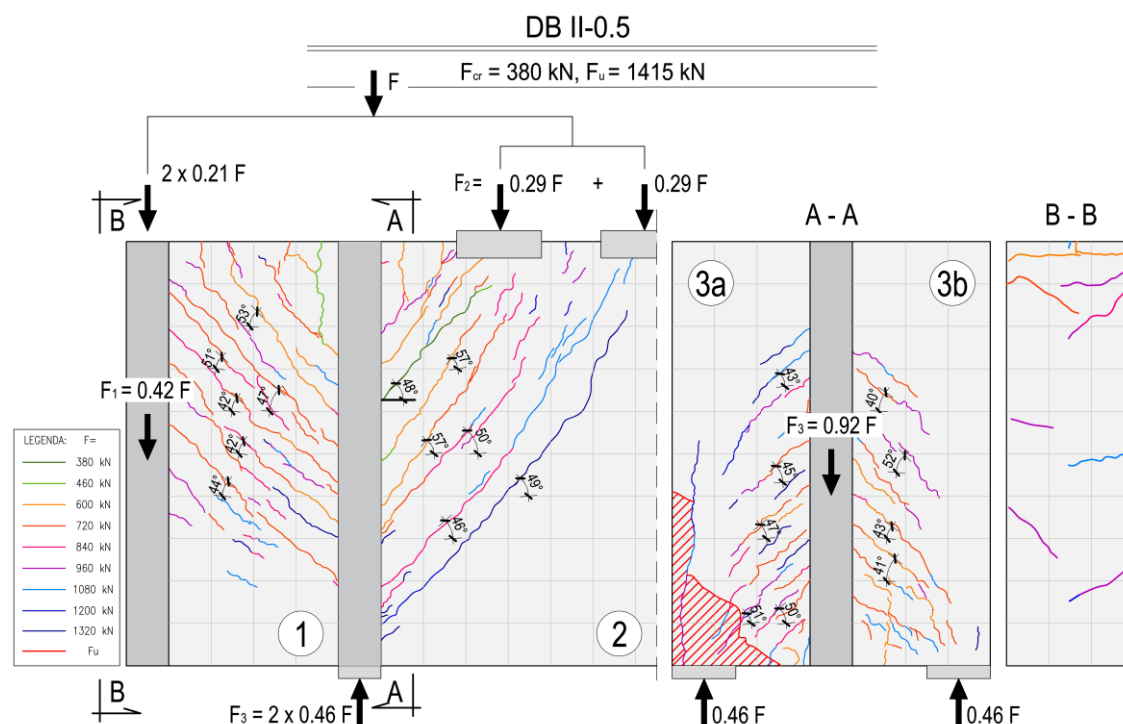


Rys. 4.63 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB II-0.5 w stanie nośności granicznej.





Rys. 4.64 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB I-0.5.



Rys. 4.65 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB II-0.5.

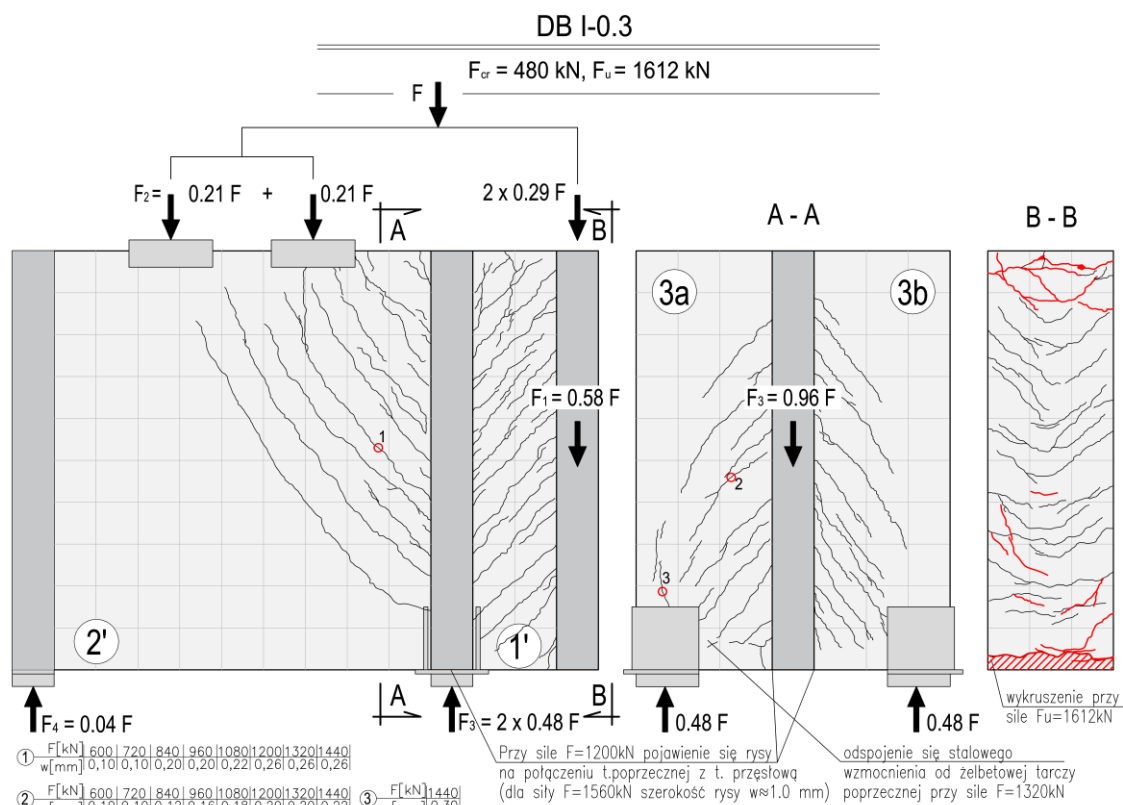
▪ *Seria II – układ tarcz DB-0.3*

Pierwsze zarysowanie układów tarcz DB-0.3, niezależnie od zastosowanego zbrojenia (*DB I-0.3* i *DB II-0.3*) zaobserwowano przy sile $F_{cr} = 480 \text{ kN}$, co stanowiło ok. $0.3 F_u$. Jako pierwsze powstały rysy na powierzchni tarczy wspornikowej (1) i tarczy podłużnej (3) (patrz *rys. 4.68-69*). W odróżnieniu od poprzednich tarcz wspornikowych o smukłości 0.5 (*seria I*), analizowane tarcze wspornikowe II serii badań, o smukłości 0.3, charakteryzowało powstanie pierwszego zarysowania w postaci rys ukośnych. Pierwsze rysy ukośne zlokalizowane były w środkowym obszarze elementu, co potwierdza istotne znaczenie sił tnących w tarczach wspornikowych o niewielkiej smukłości, już w początkowym etapie obciążania.

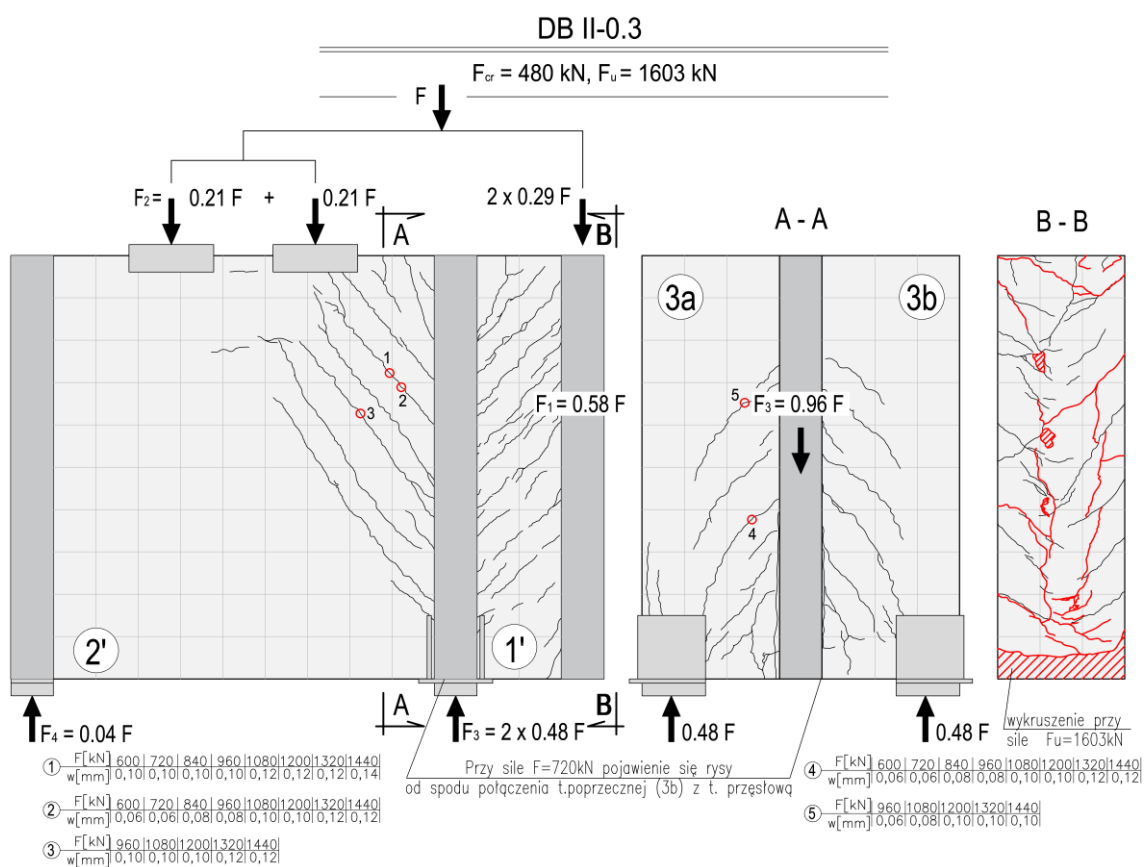
Analizując morfologię rys tarcz wspornikowych *DB I-0.3 (1)* i *DB II-0.3 (1)* (*rys. 4.66-69*), możemy zauważyć, iż zbrojenie ukośne pozytywnie wpłynęło na stan zarysowania badanej tarczy, zmniejszając zagęszczenie rys w obszarze dolnej części tarczy, podobnie jak miało to miejsce w I serii badań. Przy smukłości wspornika 0.3 kąt nachylenia rys ukośnych dla tarczy *DB I-0.3 (1)* zbrojonej ortogonalnie mieścił się w przedziale $43^\circ - 52^\circ$, gdzie większe nachylenie do osi poziomej wykazywały rysy znajdujące się w środkowym obszarze tarczy wspornikowej. W tarczy *DB II-0.3 (1)* z prętami ukośnymi, wartości kątów rys mieściły się w bardziej zawężonym przedziale $40^\circ - 54^\circ$, przy czym większe nachylenie obserwowano bliżej krawędzi górnej wspornika.

Układ rys w tarczach podłużnych *DB I – 0.3 (2)* i *DB II-0.3 (2)* był do siebie zbliżony, jednakże większe zagęszczenie rys przy połączeniu z tarczą poprzeczną zanotowano dla *DB I- 0.3 (2)*. Nachylenie głównych rys ukośnych mieściło się w zakresie $41^\circ - 57^\circ$ w tarczy *DB I-0.3 (2)*, natomiast w tarczy podłużnej *DB II-0.3 (2)*, kąt nachylenia rys zamykał się w węższym przedziale $48^\circ - 51^\circ$.

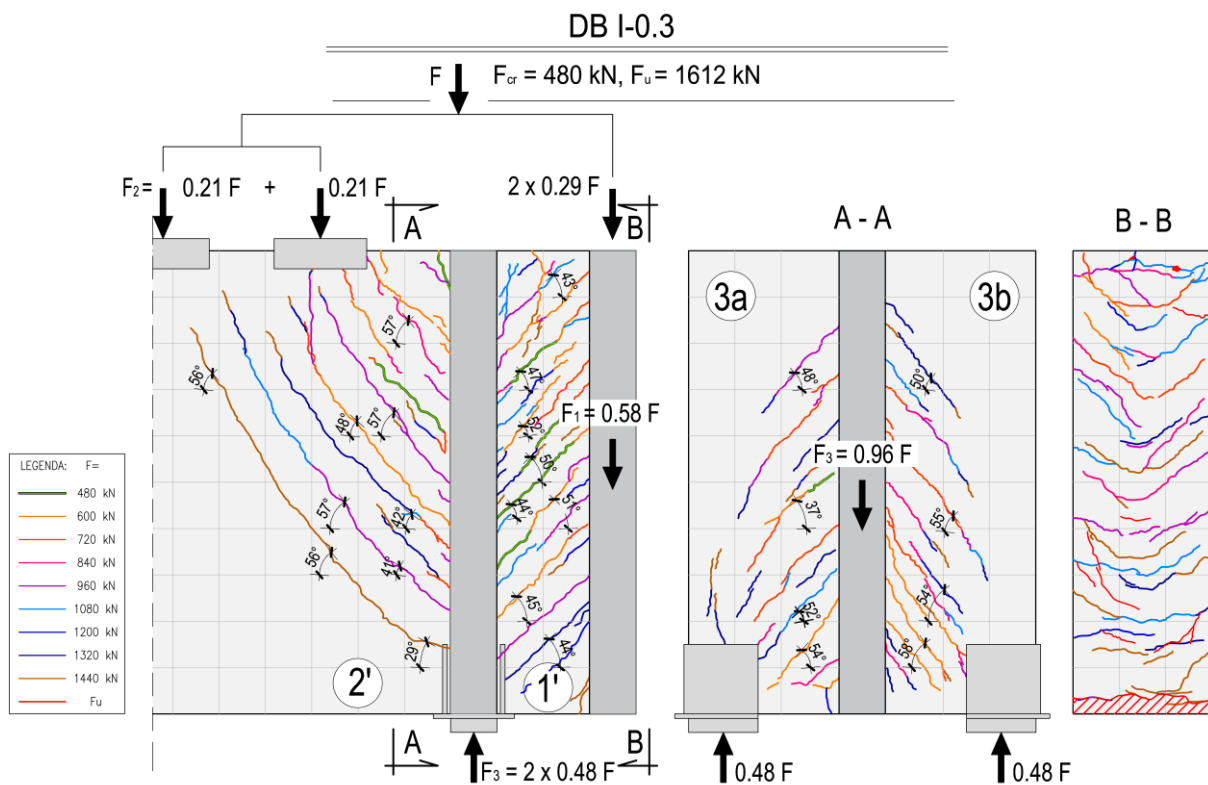
W tarczach poprzecznych (3) badanych układów DB-0.3 do których podwieszone zostały pozostałe tarcze (wspornikowa i podłużna), obserwujemy podobny obraz zarysowania jak dla tego samego rodzaju tarcz w I serii badań. W przypadku poprzecznej tarczy zbrojonej ortogonalnie *DB I-0.3 (3)* zarysowanie sięgało do 90% wysokości tarczy, a zagęszczenie rys było nieco większe niż w przypadku tarczy ze zbrojeniem diagonalnym *DB II-0.3 (3)*, w której obszar zarysowania dochodził do 75% wysokości tarczy. Wartości kątów nachylenia rys w tarczach poprzecznych, z uwagi na paraboliczny kształt ich przebiegu, były zmienne i zwiększały się wraz ze wzrostem przykładanego obciążenia. Przedział wartości kątów rys w początkowej fazie mieścił się w zakresie $35^\circ - 60^\circ$ dla obydwu tarcz poprzecznych, a w chwili zniszczenia nachylenie rys sięgało wartości do 70° .



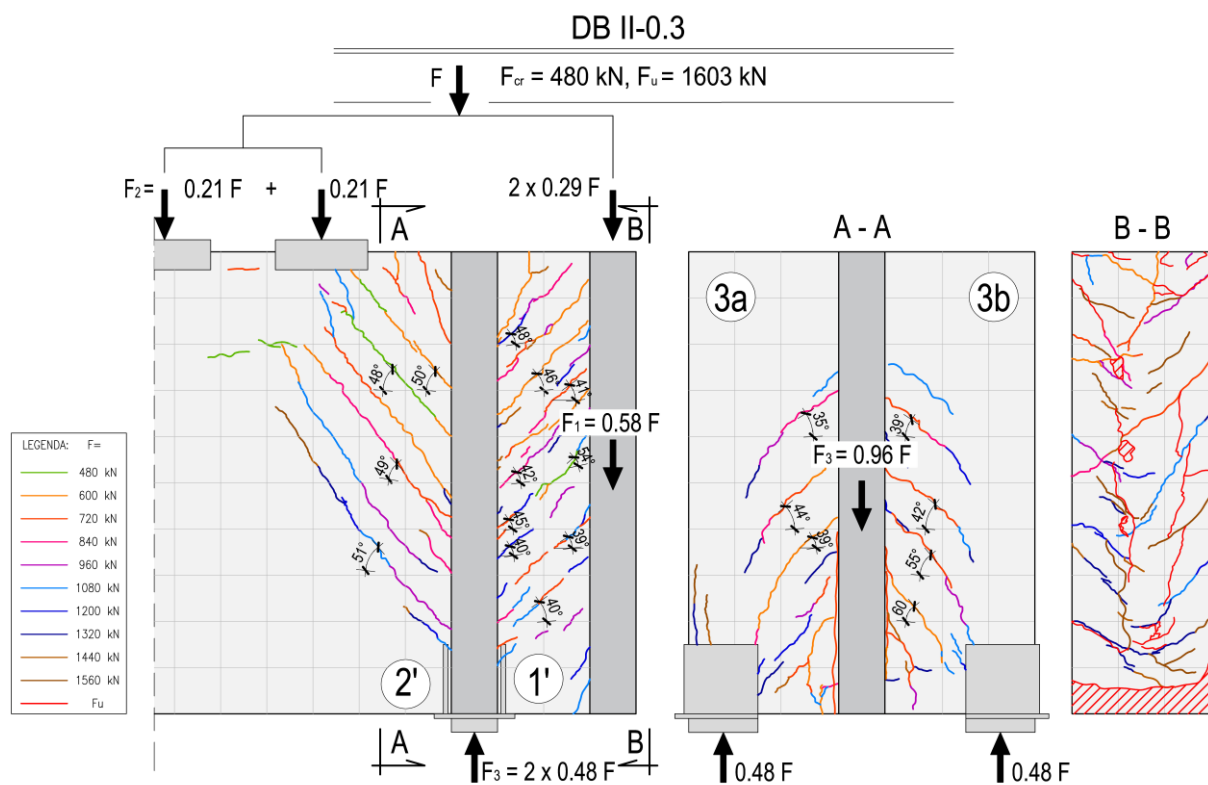
Rys. 4.66 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB I-0.3 w stanie nośności granicznej.



Rys. 4.67 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB II-0.3 w stanie nośności granicznej.



Rys. 4.68 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB I-0.3.



Rys. 4.69 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB II-0.3.

Sily rysujace i niszczone - układy tarczowe

Zestawienie eksperymentalnych sił rysujących F_{cr} (jako wielkości siły F z prasy wytrzymałościowej) i sił niszczących F_u , w odniesieniu do badanych przestrzennych układów tarczowych, przedstawiono poniżej w tabeli 4.8. Za wielkość F_{cr} przyjęto najmniejszą siłę, która spowodowała pierwsze zarysowanie układu tarczowego.

Tabela 4.8 Siły rysujące i niszczące badane układy tarczowe.

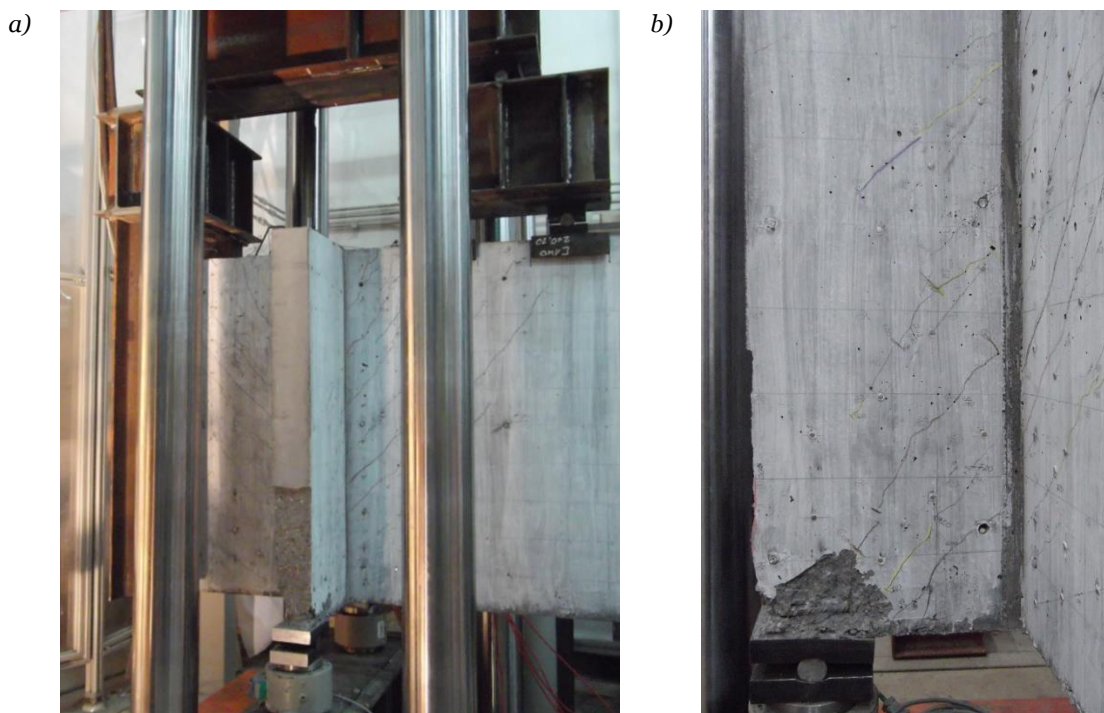
Seria badawcza	Układ tarcz	Tarcza, w której powstało pierwsze zarysowanie	Siła rysująca F_{cr}	Siła niszcząca F_u	F_{cr}/F_u
			[kN]	[kN]	[kN]
I seria	DB I-0.5	DB I-0.5 (1) i DB I-0.5 (2)	357	1260	0.28
	DB II-0.5	DB II-0.5(2)	360	1415	0.27
II seria	DB I-0.3	DB I-0.3 (1), DB I-0.3 (2) i DB I-0.3 (3)	480	1612	0.30
	DB II-0.3	DB II-0.3(1), DB II-0.3(2)	480	1603	0.30

Niezależnie od sposobu ukształtowania zbrojenia, zarówno w I jak i II serii badawczej, pierwsze zarysowanie odnotowano przy podobnym poziomie obciążenia, równym bądź bliskim 30% siły niszczącej F_u . Wielkości sił niszczących F_u dla układów DB-0.5 były niższe w porównaniu z DB-0.3 o 22% w przypadku układu zbrojonego ortogonalnie i o 12% dla układu ze zbrojeniem ukośnym. Wcześniejsze zniszczenie tarcz w I serii było powodem zmiążdżenia betonu w strefie podporowej tarczy poprzecznej, którego udało się uniknąć w II serii badań stosując odpowiednie stalowe wzmocnienie w obszarach podporowych.

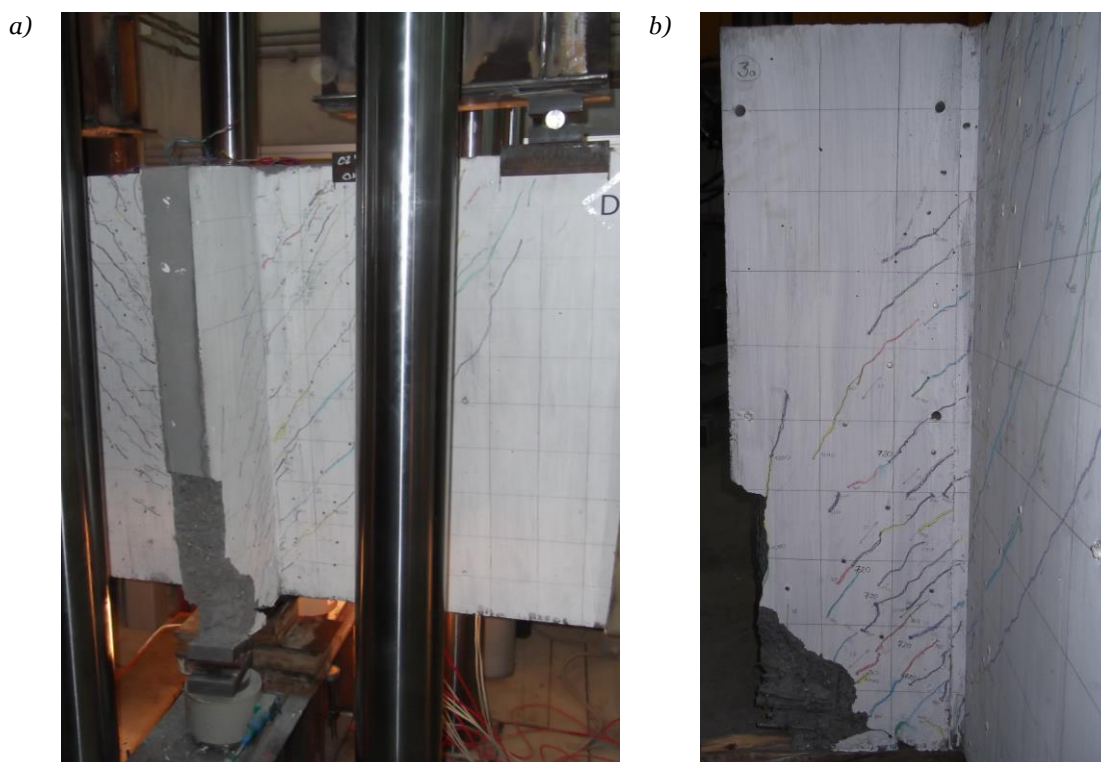
Nośność eksperymentalna▪ *Seria I – układ tarcz DB-0.5*

Przed zniszczeniem przestrzennego układu tarcz DB I-0.5, przy sile $F = 1200 \text{ kN}$, nad podporą tarczy poprzecznej pojawiła się pionowa rysa, szybko zwiększająca swoją szerokość. Ostatecznie obszar podporowy tarczy poprzecznej zdecydował o nośności całego układu. Zniszczenie układu DB I-0.5 zbrojonego ortogonalnie, nastąpiło pod obciążeniem $F_u = 1260 \text{ kN}$. Tarcze układu DB I-0.5 po zniszczeniu przedstawiono na rys. 4.70.

W układzie przestrzennym tarcz DB II-0.5 ze zbrojeniem ukośnym, podobnie jak w tarczach zbrojonych ortogonalnie układu DB I-0.5, o nośności zdecydował obszar podporowy tarczy poprzecznej. Pionowa rysa nad podporą pojawiła się już przy sile równej $F = 960 \text{ kN}$ mierząc szerokość równą 0.12 mm, a przy ostatnim poziomie obciążenia $F = 1260 \text{ kN}$, dla którego udało się dokonać pomiarów przed zniszczeniem, rysa ta zwiększyła swoją szerokość do 3.0 mm (patrz rys. 4.63). Zniszczenie nastąpiło pod obciążeniem $F_u = 1415 \text{ kN}$, większym o 12% od siły niszczącej układ tarcz DB I-0.5. Układ tarcz DB II-0.5 po zniszczeniu przedstawiono na rys. 4.71.



Rys. 4.70 Układ tarczowy DB I-0.5 po zniszczeniu: a) obszar połączenia tarczy wspornikowej i podłużnej z tarczą poprzeczną, b) obszar podporowy tarczy poprzecznej

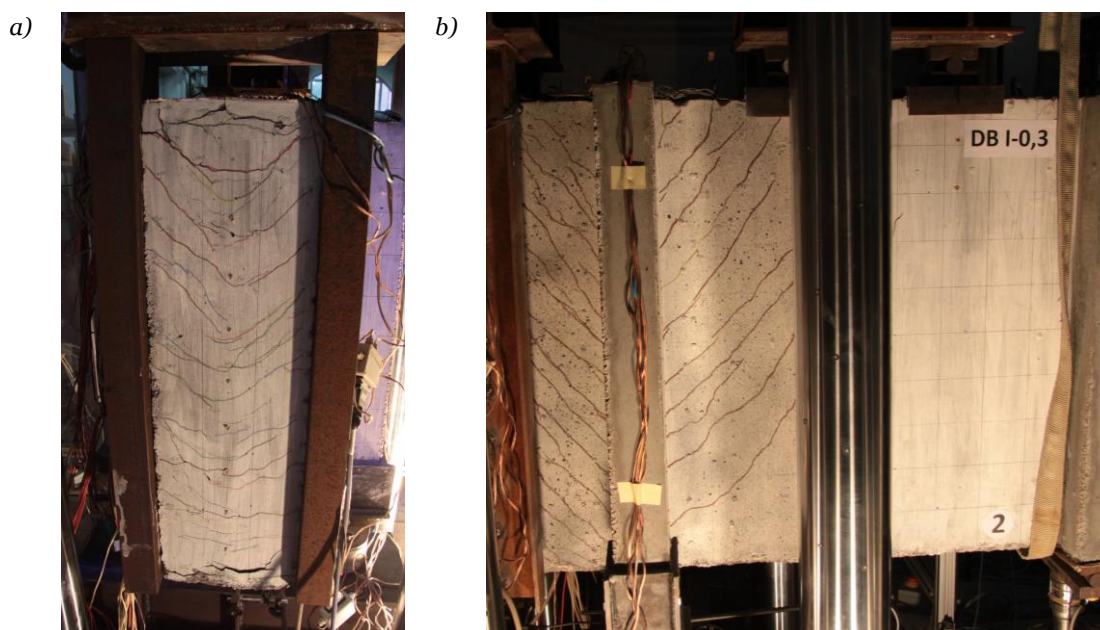


Rys. 4.71 Układ tarczowy DB II-0.5 po zniszczeniu: a) obszar połączenia tarczy wspornikowej i podłużnej z tarczą poprzeczną, b) obszar podporowy tarczy poprzecznej.

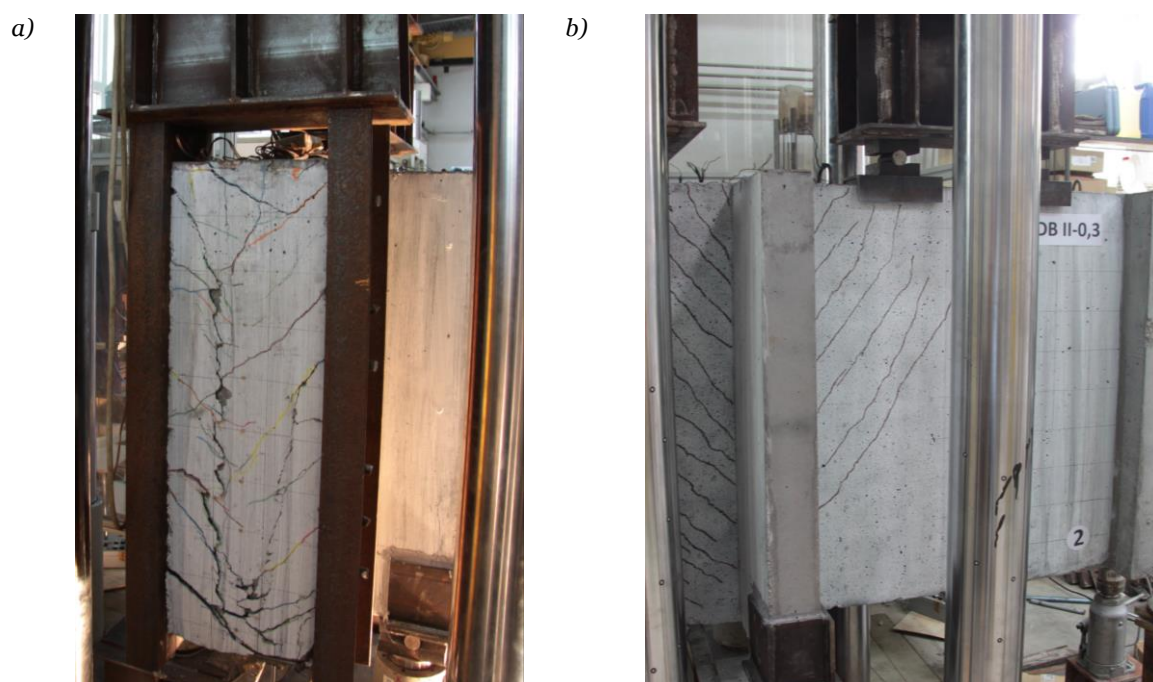
▪ *Seria II – układ tarcz DB-0.3*

W obu badanych układach tarcz DB I-0.3 i DB II-0.3, rysy niszczące (oznaczone kolorem czerwonym) pojawiły się na powierzchni pilastra w tarczy wspornikowej od strony przykładanego obciążenia. Rysy te, przyczyniły się w ostateczności do wyczerpania nośności obu układów tarczowych w II serii badań, powodując niszczenie betonu w obszarach przyłożenia sił oraz wykruszenie w dolnej części pilastra. Dodatkowo, w przeciwieństwie do tarcz z I serii badań, w układach tarczowych DB-0.3 została

osiągnięta w zbrojeniu granica plastyczności f_y , zarówno w prętach tarczy wspornikowej jak i poprzecznej (patrz w podrozdziale *Odształcenia stali*, s. 122-126). Układ tarcz DB I-0.3 tuż po zniszczeniu przedstawiono na rysunku 4.72, a układ tarcz DB II-0.3 na rysunku 4.73.



Rys. 4.72 Przestrzenny układ tarczowy DB I-0.3 po zniszczeniu: a) widok od strony frontowej – obszar przekazywania obciążenia na tarczę wspornikową, b) widok od strony powierzchni tarczy wspornikowej i podłużnej



Rys. 4.73 Przestrzenny układ tarczowy DB II-0.3 po zniszczeniu: a) widok od strony frontowej – obszar przekazywania obciążenia na tarczę wspornikową, b) widok od strony powierzchni tarczy wspornikowej i podłużnej

- TARCZE WSPORNIKOWE I POPRZECZNE -

Sily rysujące i niszczące tarcze

Zestawienie sił niszczących (maksymalnych) $F_{i,u}$ w odniesieniu do analizowanych tarcz wspornikowych (1) i poprzecznych (3) zamieszczono w tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Siły niszczące (maksymalne) $F_{i,u}$ tarcze w badanych układach.

Seria badawcza	Układ tarcz	F_u [kN]	$F_{i,u}$ [kN]	
			tarcza wspornikowa (1)	tarcza poprzeczna (3)
I seria			$F_{1,u} = 0.42F_u$	$F_{3,u} = 0.92F_u$
	DB I-0.5	1260	529	1159
	DB II-0.5	1415	594	1302
II seria			$F_{1,u} = 0.58F_u$	$F_{3,u} = 0.96F_u$
	DB I-0.3	1612	935	1548
	DB II-0.3	1603	930	1539

* wielkości sił $F_{i,u}$ zaokrąglono do 1.0 kN

Maksymalne obciążenia tarcz wspornikowych $F_{1,u}$ i poprzecznych $F_{3,u}$ układów DB-0.3 (seria II) w chwili zniszczenia, były większe w porównaniu z tarczami układów DB-0.5, niezależnie od przyjętego kształtu zbrojenia. W przypadku tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) o smukłości 0.3, siła $F_{1,u} = 935$ kN była większa o 77% od tarczy o smukłości 0.5. Natomiast w przypadku wspornika DB II-0.3 (1) ze zbrojeniem ukośnym, wzrost siły $F_{1,u}$ wyniósł 56% w porównaniu ze wspornikiem DB II-0.5 (1). Tarcze poprzeczne w układach DB-0.3 zbrojone ortogonalnie przeniosły obciążenie $F_{3,u} = 1515$ kN, większe o 31 % od tarczy poprzecznej układu DB I-0.5. W przypadku tarcz poprzecznych ze zbrojeniem ukośnym przyrost siły niszczącej $F_{3,u}$ obserwowany w II serii badań był mniejszy i wyniósł 16%.

Wielkości sił rysujących $F_{i,cr}$, powodujących pojawienie się pierwszego zarysowania w analizowanych tarczach, w zależności od przypadającego obciążenia F_i , przedstawia tabela 4.10.

Tabela 4.10 Siły rysujące $F_{i,cr}$ tarcze w badanych układach

Seria badawcza	Układ tarcz	tarcza wspornikowa (1)		tarcza poprzeczna (3)	
		$F_{1,cr}$	$F_{1,cr}/F_{1,u}$	$F_{3,cr}$	$F_{3,cr}/F_{3,u}$
		[kN]	[-]	[kN]	[-]
I seria	DB I-0.5	150	0.28	423	0.36
	DB II-0.5	193	0.32	552	0.42
II seria	DB I-0.3	278	0.30	461	0.30
	DB II-0.3	278	0.30	576	0.38

* wielkości sił $F_{i,cr}$ zaokrąglono do 1.0 kN

Wpływ ukształtowania zbrojenia na zarysowanie tarcz, można zaobserwować przede wszystkim w tarczach wspornikowych o smukłości 0.5 oraz w tarczach poprzecznych, niezależnie od badanej serii. Zastosowanie zbrojenia ukośnego w tych tarczach opóźniało pojawienie się pierwszego zarysowania.

W celu lepszego zobrazowania porównania zarysowania badanych tarcz, siły rysujące ($F_{i,cr}$) sprowadzono do wielkości ($F_{i,cr*}$) uwzględniając różne wytrzymałości betonu w obu seriach badawczych ($F_{i,cr*} = \alpha F_{i,cr}$). Współczynnik korygujący α przyjęto według zależności:

$$\alpha = \frac{f_{ctm}}{f_{ctm,i}} \quad (4.4)$$

Średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie wyznaczono według [32], według poniższego równania:

$$f_{ctm} = 0,232 \sqrt{f_{cm,cube(20)}} \quad (4.5)$$

gdzie wielkość $f_{cm,cube(20)}$ – wytrzymałość na kostkach sześciennych o boku 20cm

$$f_{cm,cube(20)} = 1,19 f_{cm,cyl} \quad (4.6)$$

Zestawienie sprowadzonych sił rysujących w tarczach wspornikowych ($F_{1,cr*}$) przedstawiono w tabeli 4.11, natomiast w tarczach poprzecznych ($F_{3,cr*}$) w tabeli 4.12.

Tabela 4.11 Sprowadzone siły rysujące tarcz wspornikowych w badanych układach

Seria badawcza	tarcza wspornikowa	$f_{ctm,i}$	$\alpha = \frac{f_{ctm}}{f_{ctm,i}}$	$F_{1,cr}$	$\frac{F_{1,cr}}{F_{1,u}}$	$F_{1,cr*} = \alpha F_{1,cr}$	$\frac{F_{1,cr*}}{F_{1,u}}$
		[MPa]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
I seria	DB I-0.5 (1)	3.16	0.96	150	0.28	144	0.27
	DB II-0.5 (1)			193	0.32	185	0.31
II seria	DB I-0.3 (1)	2.93	1.04	278	0.30	289	0.31
	DB II-0.3 (1)			278	0.30	289	0.31
f_{ctm}		3.05	1.00				

* wielkości sił $F_{1,cr}$ i $F_{1,cr*}$ zaokrąglono do 1.0 kN

Tabela 4.12 Sprowadzone siły rysujące tarcz poprzecznych w badanych układach

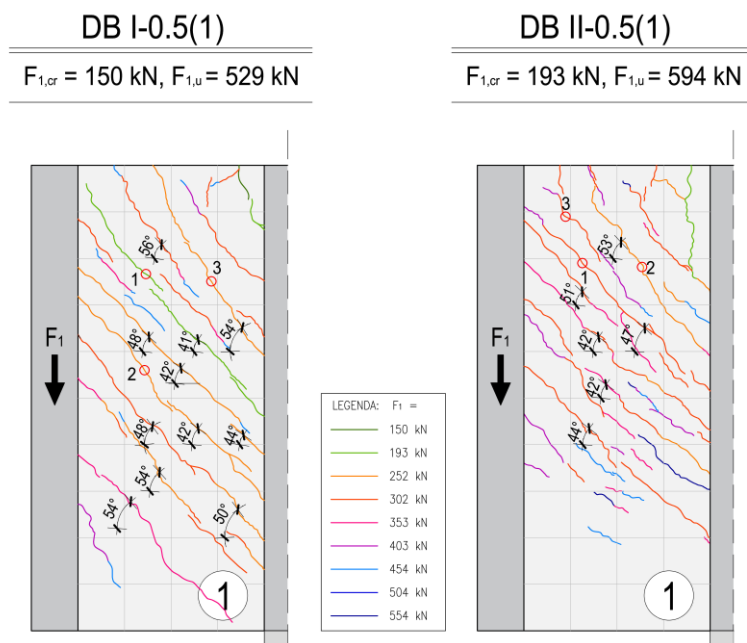
Seria badawcza	tarcza poprzeczna	$f_{ctm,i}$	$\alpha = \frac{f_{ctm}}{f_{ctm,i}}$	$F_{3,cr}$	$\frac{F_{3,cr}}{F_{3,u}}$	$F_{3,cr*} = \alpha F_{3,cr}$	$\frac{F_{3,cr*}}{F_{3,u}}$
		[MPa]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
I seria	DB I-0.5 (3)	3.16	0.96	423	0.36	406	0.35
	DB II-0.5 (3)			552	0.42	530	0.41
II seria	DB I-0.3 (3)	2.93	1.04	461	0.30	479	0.31
	DB II-0.3 (3)			576	0.38	599	0.39
f_{ctm}		3.05	1.00				

* wielkości sił $F_{3,cr}$ i $F_{3,cr*}$ zaokrąglono do 1.0 kN



Zarysowanie i szerokość rys

- *Seria I – układ tarcz DB-0.5*
 - *tarcze wspornikowe DB I-0.5 (1) i DB II-0.5 (1)*



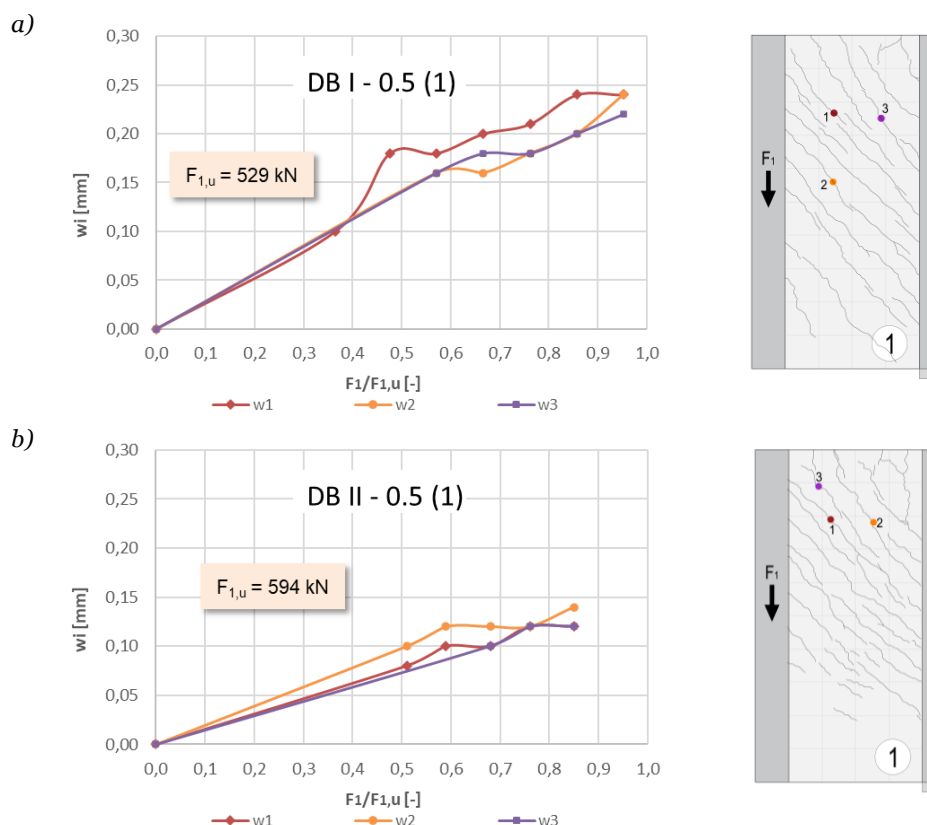
Rys. 4.74 Porównanie obrazu zarysowania tarczy wspornikowej (1) układu DB I-0.5 i DB II-0.5.

W tarczach wspornikowych o smukłości 0.5, jako pierwsze pojawiły się rysy prostopadłe w rozciągającym górnym narożu przy połączeniu z tarczą poprzeczną (rys. 4.74). W tarczy zbrojonej ortogonalnie DB I-0.5 (1), rysę prostopadłą zarejestrowano przy obciążeniu równym $F_{1,cr} = 150 \text{ kN}$, co stanowiło ok. 0.28 $F_{1,u}$. W tarczy wspornikowej z prętami ukośnymi DB II-0.5 (1), rysa prostopadła pojawiła się nieco później, pod działaniem obciążenia równomiernie rozłożonego $F_{1,cr} = 193 \text{ kN}$, czyli równego ok. 0.32 $F_{1,u}$. Zwiększanie obciążenia powodowało w dalszej kolejności pojawianie się rys ukośnych. Analizując morfologię zarysowania w obu badanych tarczach wspornikowych (rys. 4.74), można zauważyć, iż większość rys ukośnych powstała do wielkości obciążeniu równego ok. 0.5 $F_{1,u}$. W późniejszym procesie obciążania, nowo powstałych rys było już niewiele, w większości stanowiły przedłużenie istniejącego już zarysowania. Natomiast wraz ze wzrostem obciążenia, obserwowano zwiększone wartości szerokości rys.

Porównując obrazy zarysowania obu badanych tarcz wspornikowych z odmiennie przyjętym kształtem zbrojenia (rys. 4.74) widzimy, że oprócz wspomnianej już wcześniej różnej wysokości obszaru zarysowania, odnotowano różny charakter rys. W tarczy DB I-0.5 (1) zbrojonej ortogonalnie rysy ukośne były długie i przechodziły w większości przez całą rozpiętość wspornika – od krawędzi z przykładanym obciążeniem F_1 do krawędzi zamocowanej w tarczy poprzecznej. Natomiast w tarczy wspornikowej DB II-0.5 (1) z prętami ukośnymi, powstałe rysy były stosunkowo krótkie i przy danym poziomie obciążenia F_1 , najczęściej nie przechodziły od jednej do drugiej krawędzi. Odmienny był również rozstaw rys, gdzie w tarczy DB II-0.5 (1) odnotowano mniejsze odległości pomiędzy rysami, aniżeli w przypadku tarczy DB I-0.5 (1).

Na rysunku 4.75 przedstawiono zależności szerokości rys w tarczach wspornikowych układów DB-0.5 względem poziomu obciążenia $F_1/F_{1,u}$ pomierzone za pomocą mikroskopu.



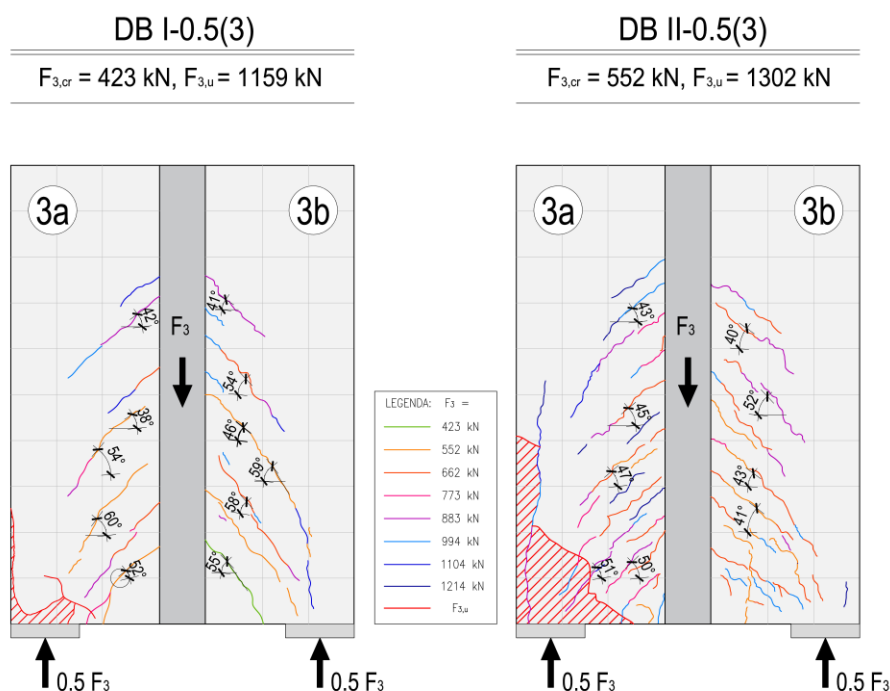


Rys. 4.75 Szerokość rys w tarczy wspornikowej: a) DB I-0.5 (1) zbrojonej ortogonalnie i b) DB II-0.5 (1) zbrojonej w sposób mieszany.

W tarczy wspornikowej DB I-0.5 (1) zbrojonej ortogonalnie (rys. 4.75 a) pierwsze rysy ukośne pojawiły się przy sile równej $F_1 = 202 \text{ kN}$ ($0.38 F_{1,u}$). Ich rozwarcie, na poziomie obciążenia eksploatacyjnego (ok. $0.6 F_{1,u}$) wynosiło $w_{1, \text{serv}} = 0.16 - 0.18 \text{ mm}$, natomiast w momencie zniszczeniu całego układu DB I-0.5, maksymalna szerokość rys przy obciążeniu wspornika siłą $F_{1,u} = 529 \text{ kN}$, była równa $w_{1, \text{max}} = 0.24 \text{ mm}$.

We wsporniku DB II-0.5 (1) z prętami ukośnymi (rys. 4.75 b), zarysowanie ukośne odnotowano przy nieco większej sile $F_1 = 252 \text{ kN}$, stanowiącej $0.42 F_{1,u}$. Zarejestrowano również wyraźne zmniejszenie szerokości rys w porównaniu ze wspornikiem DB I-0.5 (1). Przy obciążeniu użytkowym równym ok. $0.6 F_{1,u}$, wielkość rozwarcia $w_{1, \text{serv}}$ mieściła się w zakresie $0.10 - 0.12 \text{ mm}$. Z kolei przy zniszczeniu, dla którego siła przekazywana na wspornik wynosiła $F_{1,u} = 594.3 \text{ kN}$, maksymalna szerokość rys osiągnęła wartość $w_{1, \text{max}} = 0.14 \text{ mm}$, czyli prawie dwukrotnie mniejszą w porównaniu z tarczą zbrojoną ortogonalnie DB I-0.5 (1).

– tarcze poprzeczne DB I-0.5 (3) i DB II-0.5 (3)

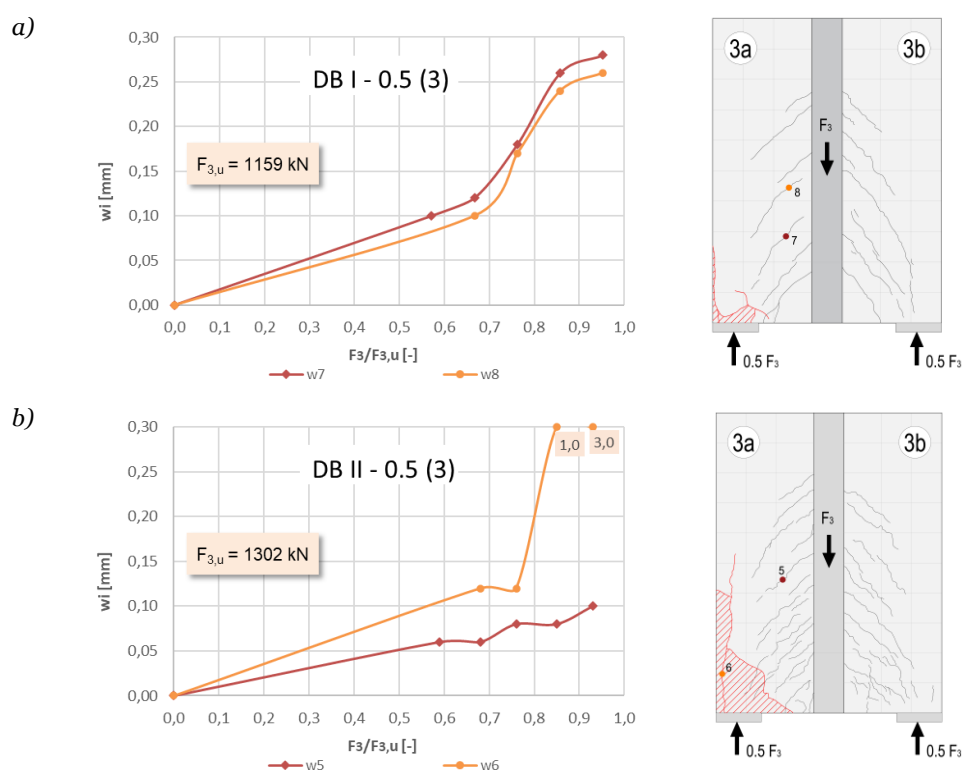


Rys. 4.76 Porównanie obrazu zarysowania tarcz poprzecznych (3) układu DB I-0.5 i DB II-0.5.

W przypadku badanych tarcz poprzecznych, pierwsze rysy kształtowały się jako ukośne (rys. 4.76). Zarysowanie tarczy zbrojonej ortogonalnie DB I-0.5 (3) nastąpiło przy sile $F_{3,cr} = 423 \text{ kN}$, co stanowiło ok. $0.36F_{3,u}$ i była to rysa ukośna znajdująca się przy dolnej krawędzi. Natomiast w tarczy poprzecznej z prętami ukośnymi DB II-0.5 (3), zarysowanie pojawiło się nieco później, pod działaniem siły $F_{3,cr} = 552 \text{ kN}$, czyli równej ok. $0.42 F_{3,u}$. Stanowiły je rysy ukośne, rozmieszczone w obszarze od krawędzi dolnej do środkowej części wysokości tarczy poprzecznej.

Porównując obrazy zarysowań tarcz poprzecznych obu układów (DB I-0.5 i DB II-0.5), podobnie jak dla tarcz wspornikowych, obserwujemy powstanie większości rys do obciążenia równego ok. $0.5 F_{3,u}$ (rys. 4.76). Zastosowanie prętów ukośnych w tarczach poprzecznych również wpłynęło na zmiany w charakterze zarysowania – rysy krótszej długości i o mniejszym rozstawie.

Na rysunku 4.77 przedstawiono zależności szerokości rys w tarczach poprzecznych układów DB-0.5 względem poziomu obciążenia $F_3/F_{3,u}$ pomierzone za pomocą mikroskopu. W tarczy poprzecznej zbrojonej ortogonalnie DB I-0.5 (3) (rys. 4.77 a), szerokość rys od działania obciążenia użytkowego, równego ok. $0.6F_{3,u}$ wynosiła $w_{3,serw} = 0.10 \text{ mm}$, a maksymalne rozwarście rys ukośnych dochodziło do wartości $w_{3,max} = 0.28 \text{ mm}$. Przed zniszczeniem, przy sile $F_3 = 1104 \text{ kN}$ ($0.95 F_{3,u}$), pojawiła się rysa biegnąca od podpory tarczy poprzecznej ku górze, bardzo szybko zwiększająca swoją szerokość, która w ostateczności zadecydowała o nośności całego układu tarczowego DB I-0.5.



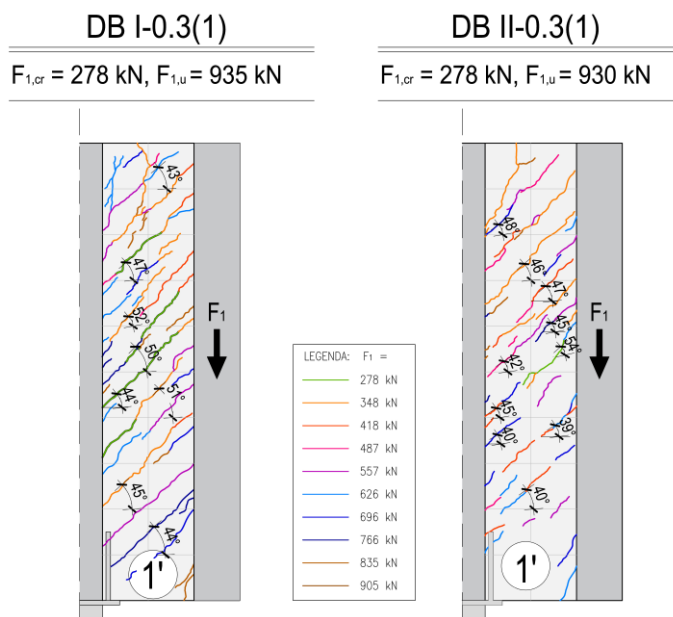
Rys. 4.77 Szerokość rys w tarczy poprzecznej: a) DB I-0.5 (3) zbrojonej ortogonalnie i b) DB II-0.5 (3) zbrojonej w sposób mieszany.

W przypadku tarczy poprzecznej DB II-0.5 (3) z prętami ukośnymi (rys. 4.77 b), szerokość rys ukośnych była zdecydowanie mniejsza i przy wielkości obciążenia użytkowego (rysa nr 5) wynosiła $w_{3, \text{serv}} = 0.06 \text{ mm}$, natomiast przy obciążeniu niszczącym $F_{3,u} = 1302 \text{ kN}$, $w_{3, \text{max}} = 0.10 \text{ mm}$, czyli prawie trzykrotnie mniejszej wartości niż maksymalna szerokość w tarczy DB I-0.5 (3). O wyczerpaniu nośności tarczy DB II-0.5 (3) również zadecydowało lokalne zniszczenie struktury betonu nad lewą podporą (od strony płaszczyzny 3a) tarczy poprzecznej, które poprzedzone było pojawieniem się prostopadłej rysy (nr 6), przy obciążeniu równym $F_{3,u} = 883 \text{ kN}$ ($0.68 F_{3,u}$).

▪ Seria II – układ tarcz DB-0.3

a) tarcze wspornikowe DB I-0.3 (1) i DB II-0.3 (1)

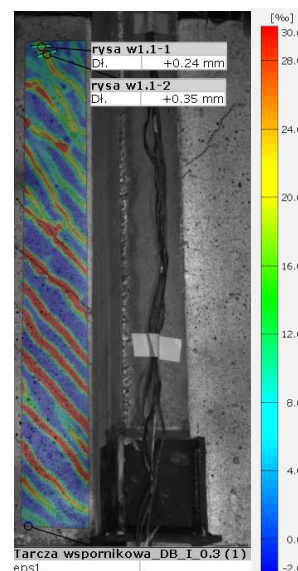
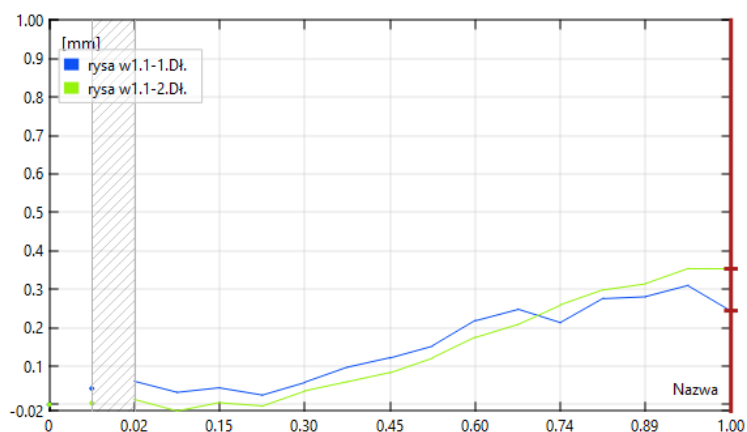
Analizując zarysowanie w obu badanych tarczach wspornikowych o smukłości 0.3 z odmiennie przyjętym kształtem zbrojenia, obserwujemy różny obszar intensywności pojawiania się rys (patrz rys. 4.78). Zastosowanie zbrojenia ukośnego we wsporniku spowodowało zmniejszenie ilości rys w dolnym obszarze tarczy oraz zmniejszenie ich długości, czyli podobnie jak miało to miejsce w I serii badań. Jednakże w II serii badań w tarczach wspornikowych, zarysowanie kształtowało się na każdym etapie obciążania i pojawiało się z podobną intensywnością aż do momentu zniszczenia, czyli odmiennie od tarcz wspornikowych z I serii badań (o smukłości 0.5), w których ilość pojawiających się rys dominowała w początkowej fazie obciążenia. W przypadku wsporników układów DB-0.3 nie zaobserwowano również większego rozstawu pomiędzy rysami w tarczy zbrojonej ortogonalnie, jak miało to miejsce we wsporniku tarczowym układu DB I-0.5.

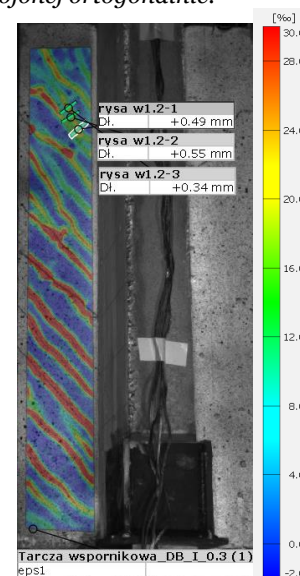
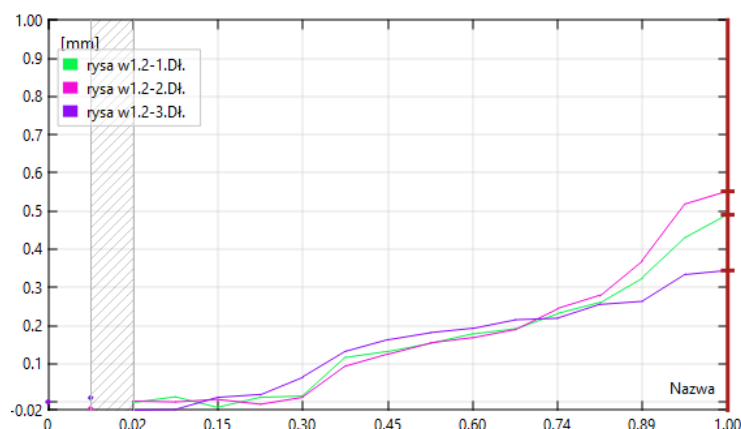


Rys. 4.78 Porównanie obrazu zarysowania w tarczy wspornikowej (1) układu DB I-0.3 i DB II-0.3.

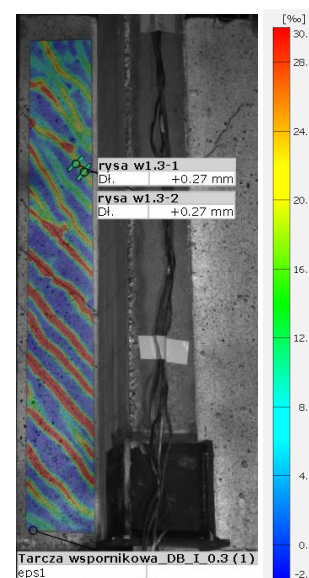
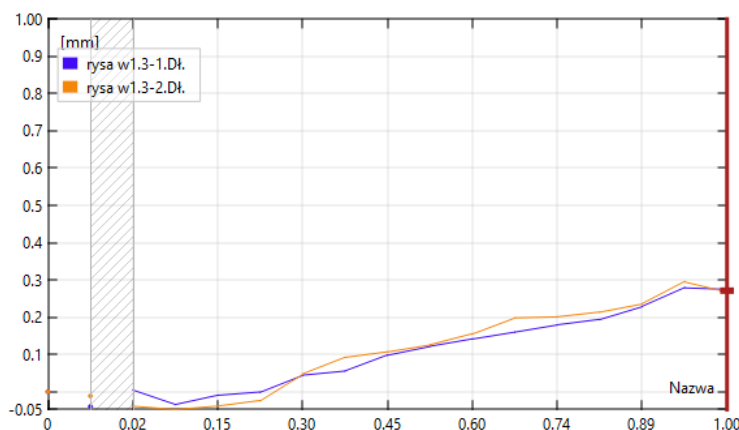
W tarczach wspornikowych o smukłości równej 0.3 pierwsze zarysowanie, jak już wspomniano wcześniej, stanowiły rysy ukośne (rys. 4.78). Zarówno w tarczy DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie, jak i tarczy DB II-0.3 (1) z prętami ukośnymi, siła powodująca powstanie pierwszej rysy wynosiła $F_{1,cr} = 278$ kN, co stanowiło 0.30 $F_{1,u}$. Zarysowanie się wspornika przy tym poziomie obciążenia potwierdzają również wykresy z pomiaru optycznego (rys. 4.79, 4.83-86) i przyjęcie określenia rysy jako lokalnego odkształcenia na poziomie 0.05 mm [33]. Rysy prostopadłe przy górnej krawędzi wspornika, pojawiły się przy obciążeniu $F_1 = 348$ kN, tj. ok. 0.37 $F_{1,u}$. Zwiększanie obciążenia równomiernie rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej, skutkowało pojawianiem się kolejnych rys ukośnych.

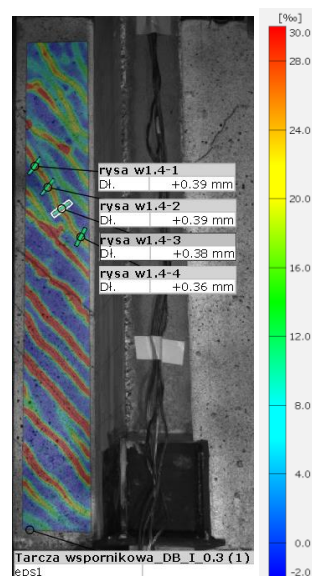
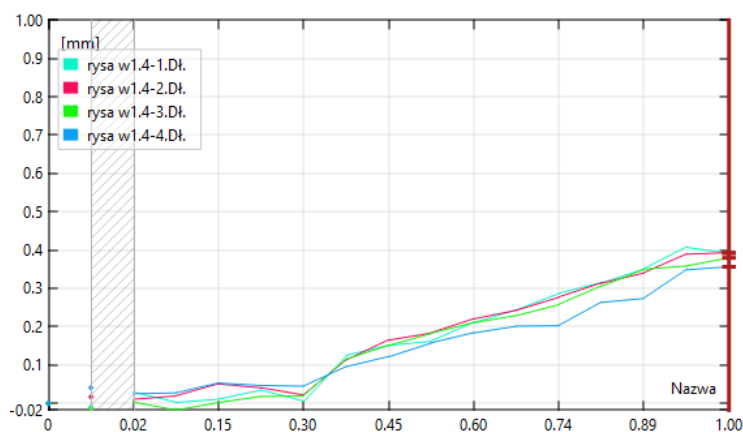
Z uwagi na trudny dostęp do badanych powierzchni tarcz wspornikowych o smukłości 0.3 pomiary szerokości rys nie mogły być dokonywane przy użyciu mikroskopu. Wyznaczenie szerokości rys wykonano dzięki pomiarom uzyskanym przy zastosowaniu systemu Aramis. Szerokości wybranych rys zostały przedstawione na wykresach względem przykładanej siły F z prasy i oznaczone na mapie głównych odkształceń rozciąganych w tarczy DB I-0.3 (1) (rys. 4.79-4.86) i tarczy DB II-0.3 (1) (rys. 4.87-4.93).



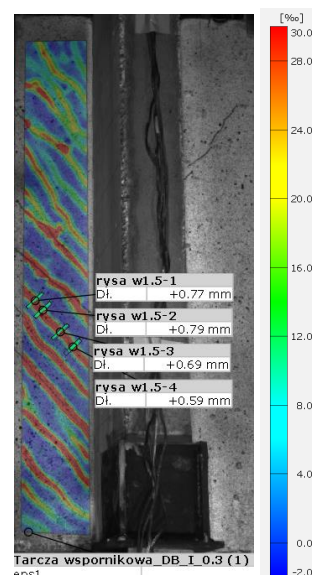
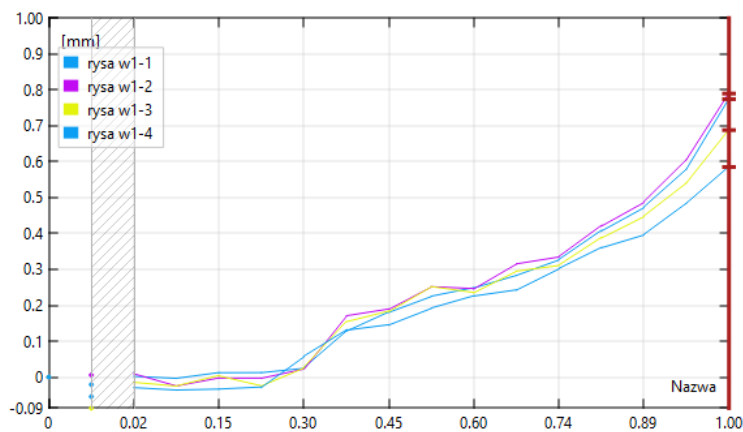
Rys. 4.79 Szerokość rysy $w_{1,1}$ w tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.Rys. 4.80 Szerokość rysy $w_{1,2}$ w tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.

W tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie największe szerokości rys odnotowano w obszarze mieszczącym się w dolnej połowie wysokości wspornika, co potwierdza obraz głównych odkształceń rozciągających (rys. 4.83-86). Szerokość rys na poziomie obciążenia eksploatacyjnego (ok. $0.6 F_{1,u}$) mieściła się w granicach $w_{1,serw} = 0.20 - 0.40$ mm. Natomiast w momencie zniszczenia, przy obciążeniu wspornika siłą $F_{1,u} = 935$ kN, maksymalną szerokość rys odnotowano w dolnym obszarze wspornika (rys. 4.85 - rysa $w_{1,7}$), i była ona równa $w_{1,max} = 0.98$ mm.

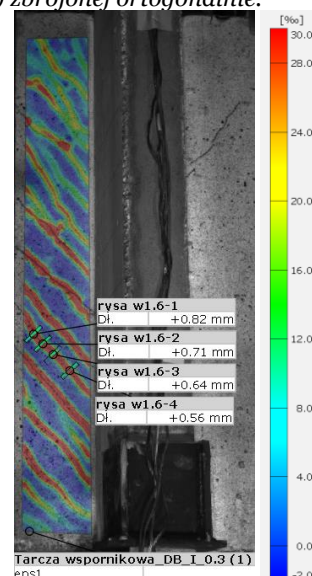
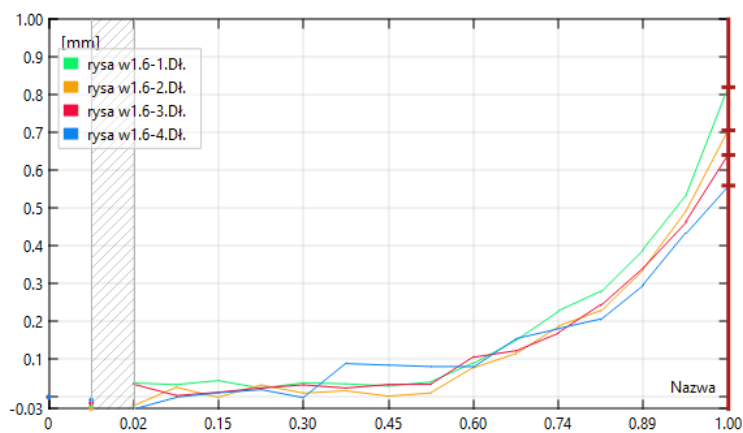
Rys. 4.81 Szerokość rysy $w_{1,3}$ w tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.



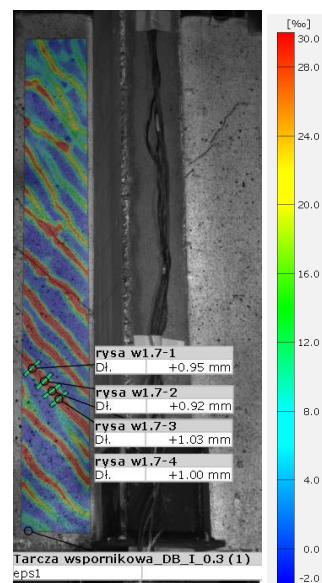
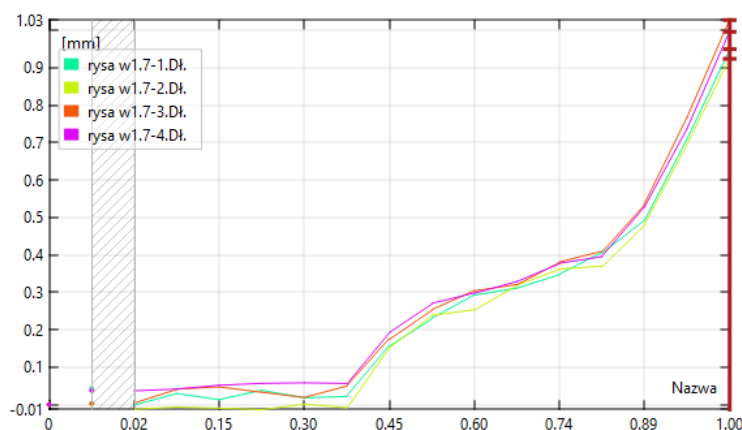
Rys. 4.82 Szerokość rysy $w_{1,4}$ w tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.



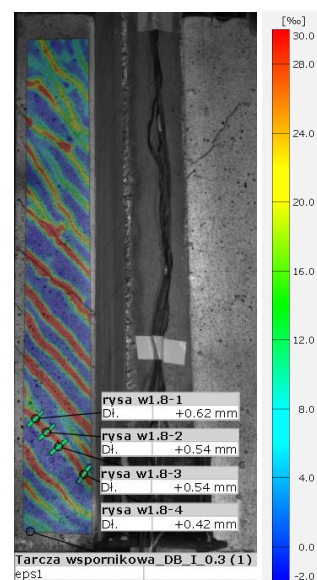
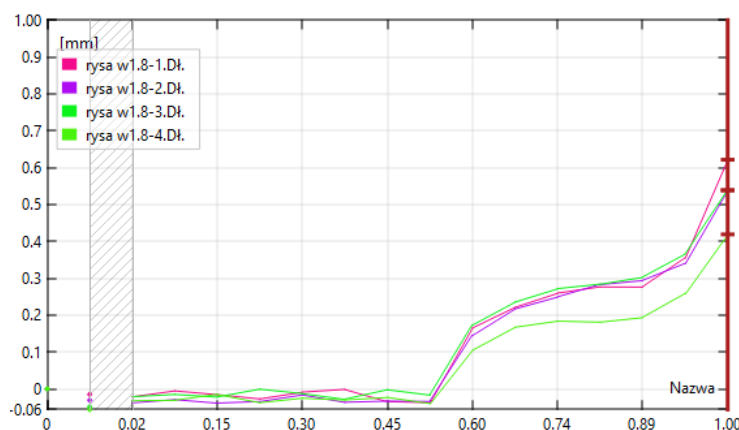
Rys. 4.83 Szerokość rysy $w_{1,5}$ w tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.



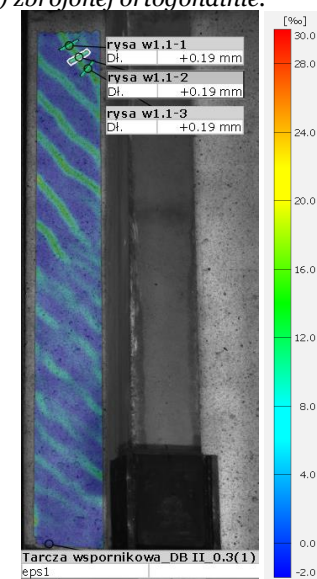
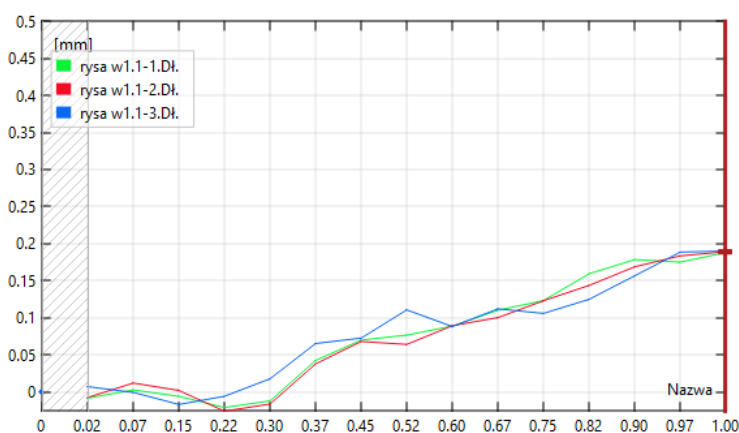
Rys. 4.84 Szerokość rysy $w_{1,6}$ w tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.



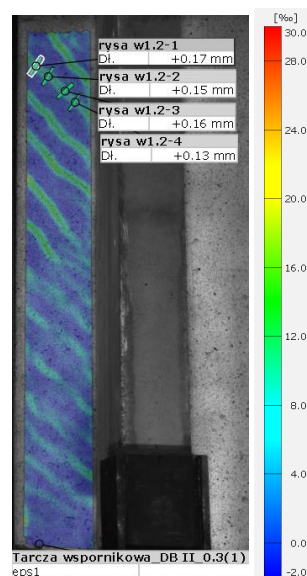
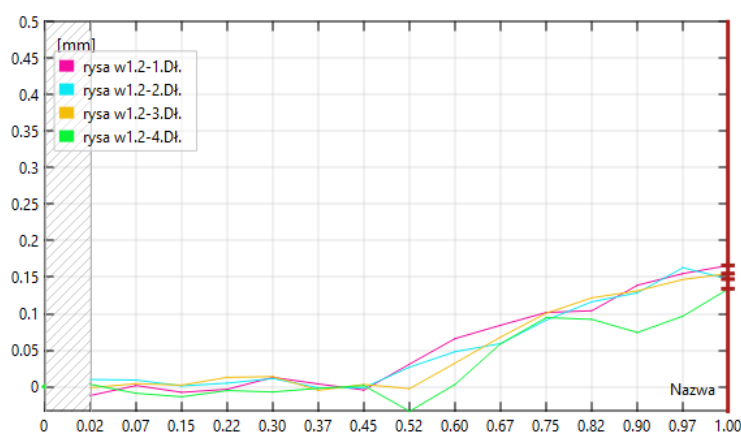
Rys. 4.85 Szerokość rysy $w_{1,7}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.



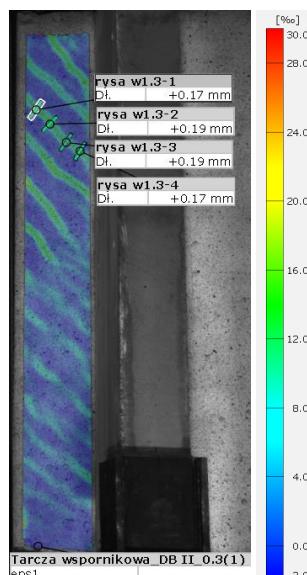
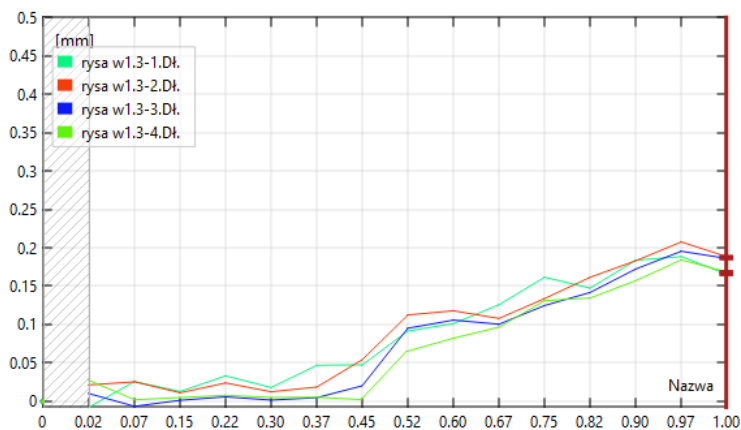
Rys. 4.86 Szerokość rysy $w_{1,8}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.



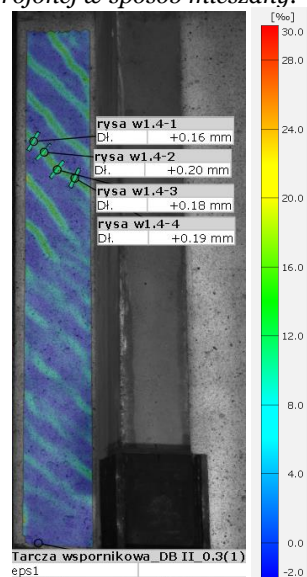
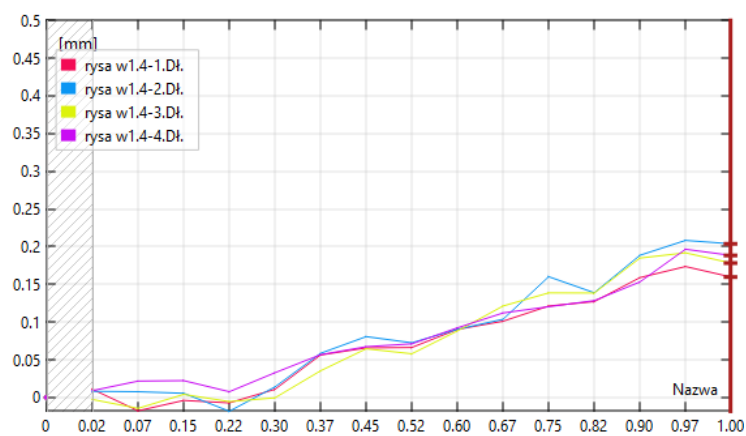
Rys. 4.87 Szerokość rysy $w_{1,i}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.



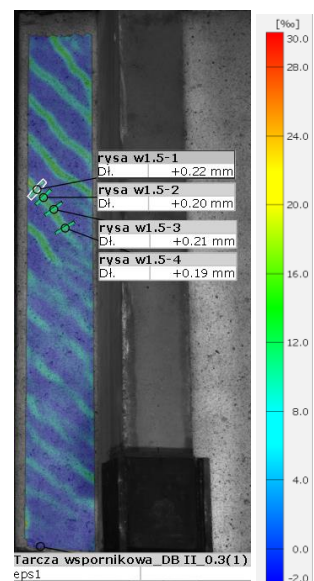
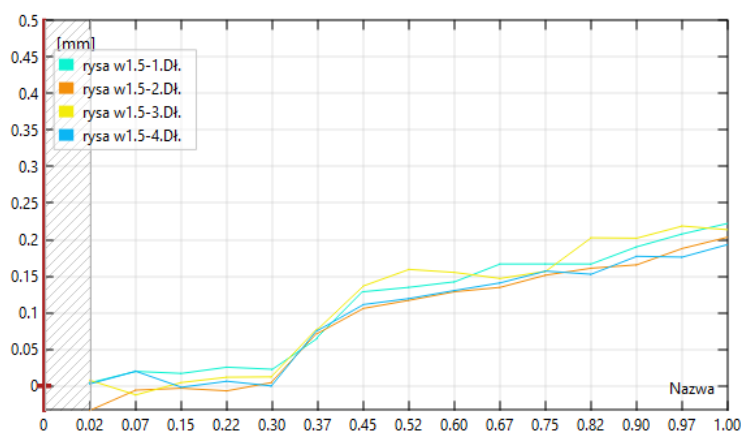
Rys. 4.88 Szerokość rysy $w_{1,2}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.



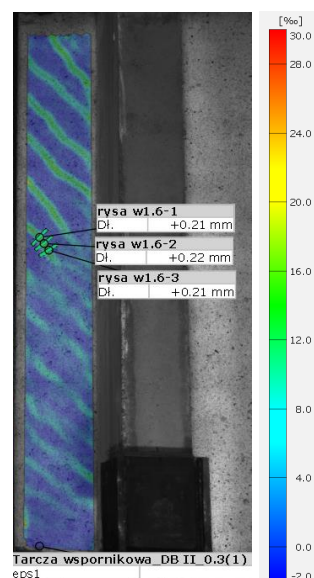
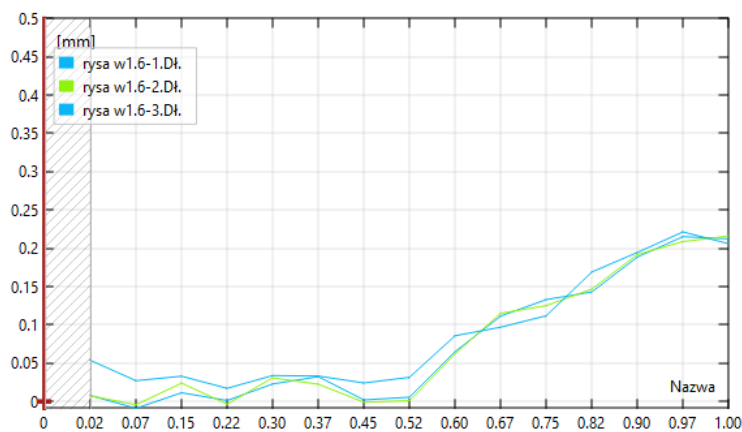
Rys. 4.89 Szerokość rysy $w_{1,3}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.



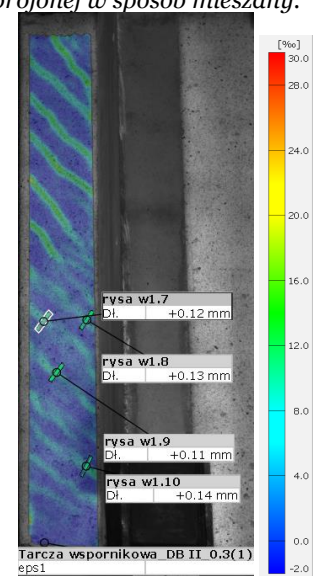
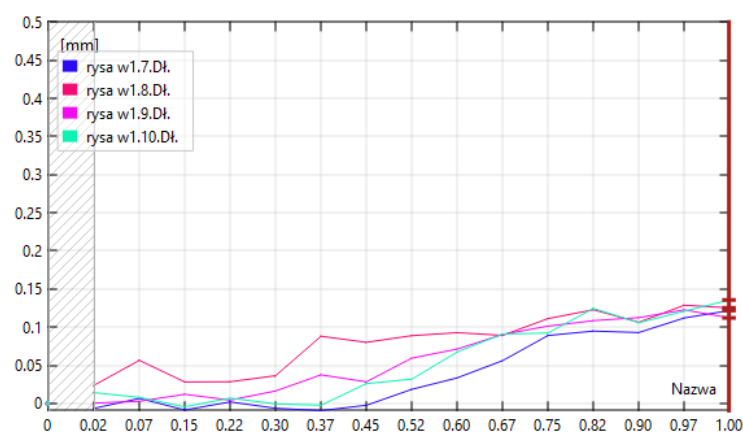
Rys. 4.90 Szerokość rysy $w_{1,4}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.



Rys. 4.91 Szerokość rysy $w_{1,5}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.



Rys. 4.92 Szerokość rysy $w_{1,6}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.



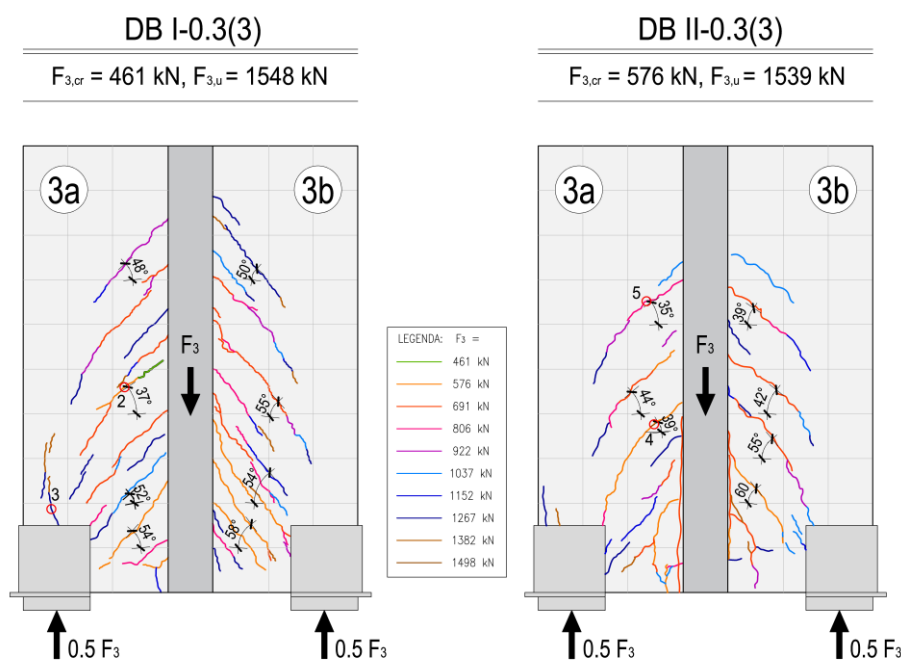
Rys. 4.93 Szerokość rysy $w_{1,6}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.

We wsporniku z *DB II-0.3 (1)* prętami ukośnymi, szerokość rys była zdecydowanie mniejsza w całym cyklu obciążenia. Pod działaniem obciążeń użytkowych $F_{1,serw}$ odnotowano szerokość rys w zakresie $w_{1,serw} = 0.09 - 0.17 \text{ mm}$, czyli o ponad dwukrotnie mniejszych wartości niż w tarczy *DB I-0.3 (1)*. Największą szerokość rys, odnotowano dla rys zlokalizowanych w środkowym obszarze wspornika, która w chwili zniszczenia osiągnęła wartość $w_{1,max} = 0.21 \text{ mm}$ (rys. 4.91-92 – rysa $w_{1,5}$ i $w_{1,6}$). Maksymalna szerokość rys w tarczy *DB II-0.3 (1)* ze zbrojeniem ukośnym zmniejszyła się o prawie 80% w stosunku do tarczy *DB I-0.3 (1)* ze zbrojeniem ortogonalnym, co potwierdza korzystny efekt zastosowania prętów ukośnych w tarczach wspornikowych obciążonych na wysokości, zaobserwowany również w I serii badań.

Zbrojenie ukośne wpłynęło również na rozkład odkształceń ε_1 we wsporniku tarczowym i tym samym zmiana uległa lokalizacja rys o największej szerokości. W tarczy *DB II-0.3 (1)* dolny obszar wspornika jest zdecydowanie mniej wyężony, co skutkowało pojawieniem się rys o mniejszych szerokościach (rys. 4.93), czyli przeciwnie do odkształceń i zarysowania tarczy *DB I-0.3 (1)* zbrojonej ortogonalnie.

a) tarcze poprzeczne *DB I-0.5 (3)* i *DB II-0.5 (3)*

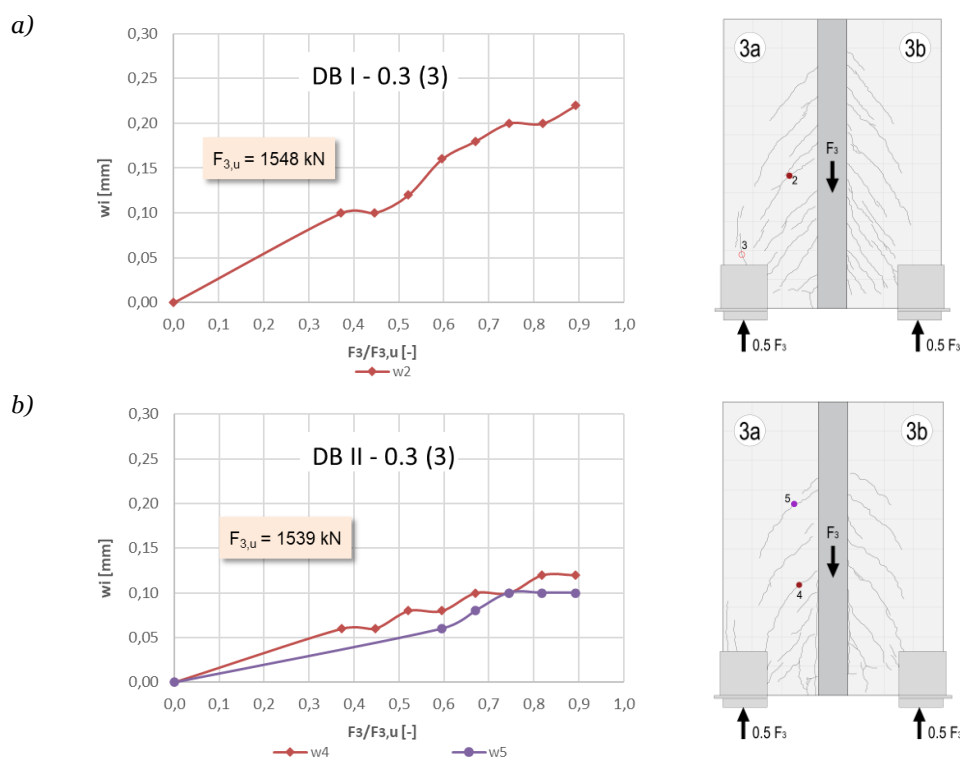
Pierwsze rysy w tarczach poprzecznych układów *DB-0.3*, podobnie jak miało to miejsce w przypadku tarcz w I serii badań, pojawiły się jako rysy ukośne – od przykładanego obciążenia w środkowej części tarczy do podpór zlokalizowanych po obu stronach przy krawędzi dolnej (rys. 4.94). Tarcza poprzeczna zbrojona ortogonalnie *DB I-0.3 (3)* zarysowała się przy sile $F_{3,cr} = 461 \text{ kN}$ ($0.3 F_{3,u}$) i była to rysa ukośna zlokalizowana w środkowej części tarczy. Zarysowanie tarczy poprzecznej z prętami ukośnymi *DB II-0.3 (3)* nastąpiło przy późniejszym etapie obciążania, $F_{3,cr} = 576 \text{ kN}$, tj. $0.38 F_{3,u}$ i stanowiły je rysy ukośne, rozmieszczone w obszarze od krawędzi dolnej do środkowej części wysokości tarczy, podobnie jak w przypadku tarczy poprzecznej *DB II-0.5 (3)* z I serii badań.



Rys. 4.94 Porównanie obrazu zarysowania tarczy poprzecznej (3) układu *DB I-0.3* i *DB II-0.3*.

Analizując obrazy zarysowań tarcz poprzecznych obu układów DB-o.3 z odmiennym kształtem zbrojenia (rys. 4.94), obserwujemy bardziej paraboliczny charakter przebiegu rys oraz większą odległość pomiędzy powstałymi rysami w tarczy DB II-o.3(3) z prętami ukośnymi.

Na rysunku 4.95 przedstawiono zależności szerokości rys w tarczach poprzecznych układów DB-o.3 względem poziomego obciążenia $F_3/F_{3,u}$, pomierzone za pomocą mikroskopu.



Rys. 4.95 Szerokość rys w tarczy poprzecznej: a) DB I-o.3 (3) zbrojonej ortogonalnie i b) DB II-o.3 (3) zbrojonej w sposób mieszany.

Szerokość rys w tarczy poprzecznej zbrojonej ortogonalnie DB I-o.3 (3) od obciążenia użytkowego $F_{i, \text{serv}} \approx 0.6 F_{3,u}$ wynosiła $w_{3, \text{serv}} = 0.16 \text{ mm}$. Natomiast maksymalne rozwarście rys ukośnych w chwili zniszczenia, dochodziło do wartości $w_{3, \text{max}} = 0.22 \text{ mm}$. Przy sile $F_3 = 1152 \text{ kN}$ ($0.74 F_{3,u}$) pojawiła się pionowa rysa odpajająca na połączeniu tarczy poprzecznej i przęsłowej, której szerokość przy sile $F_3 = 1560 \text{ kN}$ ($0.97 F_{3,u}$) wynosiła ok. 1.0 mm. Z kolei przy obciążeniu $F_3 = 1267 \text{ kN}$ ($0.82 F_{3,u}$) pojawiła się pionowa rysa nad lewą podporą tarczy poprzecznej, której szerokość przy sile $F_3 = 1267 \text{ kN}$ ($0.82 F_{3,u}$) wynosiła 0.30 mm. O wyczerpaniu nośności tarczy DB I-o.3 (3) zdecydowały jednak ostatecznie rysy tworzące się na powierzchni pilastra w tarczy wspornikowej od strony przykładanego obciążenia.

W przypadku tarczy poprzecznej DB II-o.3 (3) z prętami ukośnymi, podobnie jak zaobserwowano w I serii badań, szerokość rys była zdecydowanie mniejsza. Pod działaniem obciążenia użytkowego szerokość rys wynosiła $w_{3, \text{serv}} = 0.08 \text{ mm}$, natomiast przy obciążeniu niszczącym $F_{3,u} = 1302 \text{ kN}$, $w_{3, \text{max}} = 0.12 \text{ mm}$, czyli prawie dwukrotnie mniej niż maksymalna szerokość w tarczy poprzecznej DB I-o.3 (3).

Zestawienie szerokości rys w tarczach wspornikowych (1) i poprzecznych (3) zamieszczono w tabeli 4.13 i 4.14. Szerokości rys podano jako maksymalne wartości uzyskane pod działaniem obciążenia użytkowego $F_{i, \text{serv}}$ ($w_{i, \text{serv}}$) i niszczącego $F_{i,u}$ ($w_{i, \text{max}}$). W przypadku obciążenia użytkowego $F_{i, \text{serv}}$, przyjęto wartości mieszczące się w zakresie $0.57 \div 0.60$ obciążenia niszczącego $F_{i,u}$ dla każdej z analizowanych tarcz. Dodatkowo dla tarczy poprzecznej, obok wielkości szerokości rysy ukośnej, podano w nawiasie

wielkość rozwarcia rysy prostopadłej, która pojawiła się nad podporą i doprowadziła ostatecznie w I serii badań do zniszczenia badanych układów tarcz.

Tabela 4.13 Szerokości rys w tarczach wspornikowych.

Seria badawcza	Układ tarcz	tarcza wspornikowa (1)				
		$F_{1,cr}$	$F_{1,serw}$	$w_{1,serw}$	$F_{1,u}$	$w_{1,max}$
		[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
I seria	DB I -0.5	150	302	0.18	529	0.24
	DB II-0.5	193	351	0.12	594	0.12
II seria	DB I -0.3	278	557	0.40	935	0.98
	DB II-0.3	278	557	0.17	930	0.21

$w_{1,serw}$ oraz $w_{1,max}$ podano jako największe wartości szerokości rys odnotowane przy obciążeniu $F_{1,serw}$ oraz $F_{1,u}$

Tabela 4.14 Szerokości rys w tarczach poprzecznych.

Seria badawcza	Układ tarcz	tarcza poprzeczna (3)				
		$F_{3,cr}$	$F_{3,serw}$	$w_{3,serw}$	$F_{3,u}$	$w_{3,max}$
		[kN]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
I seria	DB I -0.5	423	662	0.10 (-)	529	0.28 (0.60)
	DB II-0.5	552	768	0.06 (0.12)	594	0.10 (3.00)
II seria	DB I -0.3	461	922	0.16	935	0.22
	DB II-0.3	576	922	0.08	930	0.12

$w_{3,serw}$ oraz $w_{3,max}$ podano jako największe wartości szerokości rys odnotowane przy obciążeniu $F_{3,serw}$ oraz $F_{3,u}$

Z powyższych zestawień (tab. 4.13-14) jednoznacznie wynika, iż zastosowanie zbrojenia ukośnego pozytywnie wpływa na ograniczenie szerokości rys, zarówno w tarczy wspornikowej, jak i poprzecznej niezależnie od badanej smukłości tarczy wspornikowej.

Wnioski dotyczące zarysowania i nośności:

- **wpływ ukształtowania zbrojenia**
 - sposób ukształtowania zbrojenia wpłynął na charakter zarysowania badanych tarcz wspornikowych. W tarczach zbrojonych ortogonalnie, niezależnie od analizowanej smukłości, rysy ukośne były stosunkowo długie i przechodziły w większości przez całą rozpiętość wspornika. Natomiast w tarczach z prętami ukośnymi, rysy były zdecydowanie krótsze i przy danym poziomie obciążenia F , najczęściej nie przechodziły od jednej do drugiej krawędzi wspornika,
 - odmienny z uwagi na kształt zastosowanego zbrojenia był również rozstaw rys, który różnił się z uwagi na wielkość analizowanej smukłości wspornika. Tarcza o smukłości $l/H=0.5$ ze zbrojeniem ukośnym wykazywała mniejsze odległości pomiędzy rysami, aniżeli w przypadku tarczy zbrojonej ortogonalnie. Z kolei przy mniejszej smukłości wspornika, $l/H=0.3$ zbrojonego



w sposób mieszany (z prętami ukośnymi) rys powstawało stosunkowo i rozstaw ich był w większości przypadków większy niż w tarczach ze zbrojeniem ortogonalnym,

- obszar zarysowania badanych wsporników tarczowych również zależał od przyjętego rodzaju zbrojenia. W tarczach ortogonalnie zbrojonych zarysowanie objęło swym zakresem niemalże całą płaszczyznę, natomiast przy zastosowaniu prętów ukośnych tarcze rysowały się do ok. 0.8 wysokości wspornika, mierząc od górnej krawędzi,
- znaczenie sposobu ukształtowania zbrojenia było istotne w ograniczeniu szerokości powstających rys, niezależnie od badanej smukłości wspornika. W tarczach o większym wysięgu (smukłość równa 0.5) zmniejszenie szerokości rys wynosiło ponad 60% przy zastosowaniu prętów ukośnych. Natomiast w przypadku krótszych tarcz (smukłość równa 0.3) ograniczenie szerokości rys było jeszcze bardziej wyraźne i zmniejszało się o prawie 80% na korzyść tarczy ze zbrojeniem ukośnym,
- jak wynika z pomiarów, sposób zbrojenia nie wpłynął istotnie na wartość siły rysującej. Pierwsze rysy powstały przy tym samym bądź zbliżonym poziomie obciążenia, podobnie jak zaobserwowano w badaniach tarcz wspornikowych z obciążeniem zadany na górnej krawędzi [11],

▪ *wpływ smukłości*

- pierwsze zarysowanie tarcz wspornikowych w układach DB-0.5 pojawiło się w górnym rozciągającym narożu tarczy w formie prostokątnych rys od zginania, niezależnie od sposobu ukształtowania zbrojenia. W tarczach wspornikowych obu badanych układów DB-0.3, pierwsze rysy zostały odnotowane w centralnym obszarze wspornika i były to rysy ukośne,
- smukłość tarczy wspornikowej wpływała również na siły rysujące. Zmniejszenie smukłości wspornika skutkowało opóźnieniem w pojawieniu się pierwszego zarysowania,
- przy większej smukłości tarczy, rysy tworzyły się głównie do poziomego obciążenia równego 50% siły niszczącej. Natomiast przy krótszym wsporniku intensywność pojawiania się rys, obserwowana była na każdym poziomie obciążenia. W analizowanych tarczach dla mniejszej smukłości wspornika zaobserwowano również większą wartość siły rysującej, niezależnie od przyjętego ukształtowania zbrojenia.
- przy zmniejszonym wysięgu wspornika następował wzrost siły niszczącej w stanie granicznym przestrzennego układu tarcz. W tarczach zbrojonych ortogonalnie wzrost nośności wynosił 77%, a w przypadku tarcz wspornikowych ze zbrojeniem ukośnym nośność wzrosła o 57%.

Tarcza poprzeczna

▪ *wpływ ukształtowania zbrojenia*

- w badanych tarczach poprzecznych, swobodnie podpartych z obciążeniem liniowym w postaci podwieszenia do niej innych tarcz, zastosowanie zbrojenia ukośnego również pozytywnie wpłynęło na stan graniczny zarysowania,
- zastosowanie zbrojenia ukośnego wpływało na opóźnienie się pojawienia pierwszej rysy w każdej serii badawczej, czyli odmiennie od tarcz wspornikowych,
- zbrojenie ukośne korzystnie wpływało na ograniczenie szerokości powstających rys,

- zastosowanie odmiennego sposobu zbrojenia nie powodowało znaczących różnic w przebiegu morfologii rys,
- podobnie jak w tarczach wspornikowych, zmiana zastosowanego ukształtowania zbrojenia nie przekładała się w sposób znaczący na podniesienie nośności.

5 ANALIZA TEORETYCZNA TARCZY WSPORNIKOWEJ

Jak już wspomniano na początku niniejszej rozprawy w rozdziale 2, tarcze żelbetowe charakteryzują się niejednorodnym rozkładem naprężeń (ang. *discontinuity regions*) i należą do obszarów typu *D* w konstrukcji. Zgodnie z PN-EN:2008 [N8] tego typu elementy mogą być projektowane na podstawie analizy plastycznej za pomocą modeli *ST* lub też wymiarowane na podstawie naprężeń według Załącznika *F* do normy. W konstrukcjach, w których występują obszary nieciągłości, projektant musi mieć również na uwadze spełnienie pewnych kryteriów i zasad konstruowania zbrojenia, dostarczanych przede wszystkim na drodze doświadczeń eksperymentalnych.

Obliczanie zbrojenia tarcz na podstawie naprężeń opiera się najczęściej na analizie metodą elementów skończonych (*MES*) i dobraniu zbrojenia do odpowiednich pól naprężeń. W praktyce powszechnie stosowane jest obliczanie naprężeń za pomocą programów obliczeniowych przy założeniu liniowej sprężystości i izotropii materiału, które nie do końca odpowiada rzeczywistym wynikom pracy elementu zarysowanego.

Wyznaczanie naprężeń może odbywać się również za pomocą analizy nieliniowej. Taką analizę umożliwiają metody numeryczne, na podstawie których oblicza się ekstremalne naprężenia w poszczególnych punktach tarczy z uwzględnieniem wpływu zarysowania i nieliniowych parametrów materiałowych. W przypadku zastosowania modelu materiałowego betonu z uwzględnieniem pracy w złożonym stanie naprężenia, wyniki mogą być uzyskiwane z dość dużą dokładnością. Nie należy jednak zapominać, iż otrzymane w ten sposób wielkości naprężeń wymagają sporego doświadczenia w ich weryfikacji. Wdrożenie ich do celów projektowych okazuje się często zbyt mało praktyczne.

Metoda analogii kratownicowej, zwana również analizą *Strut and Tie (ST)* należy do analizy plastycznej konstrukcji i oparta jest na twierdzeniu o dolnej granicy nośności (metoda statyczna), zgodnie z którym otrzymuje się nośności graniczne mniejsze lub równe rzeczywistym nośnościom. Podstawą tej metody jest znajomość przebiegu trajektorii naprężeń z uwzględnieniem zarysowania lub znajomość tzw. ścieżek obciążenia. Projektowanie w oparciu o metodę kratownicową polega na wyznaczeniu sił w wyodrębnionych elementach modelu *ST* i tym samym sprowadza się do rozwiązywania warunków równowagi sił i obciążeń w stanie granicznym nośności. W dotychczasowej literaturze istnieje wiele prac odnoszących się do analizy nośności żelbetowych tarcz jedno lub dwuprzęsłowych z wykorzystaniem modelu kratowniczowego i teorii pól naprężeń (*Stress Fields*) Hwang i Lee [34], Matamoros, Wong [35], Park J, Kuchma [36], Amini Najafian i Vollum 2013 [37], Muttoni i Ruiz [38], Mustafa M. Raheem, [39], Leung Su i Wee Looi [40]. Jednym z trudniejszych aspektów w przyjęciu odpowiedniego schematu *ST* jest założenie modelu materiałowego zarysowanego betonu, uwzględniającego zmniejszoną wytrzymałość na ściskanie [41].

W niniejszej pracy zdecydowano się na przeprowadzenie analizy nośności granicznej tarcz wspornikowych o smukłości ścinania $l/H = 0.5$ i 0.3 , obciążonych po wysokości i stanowiących jeden z kluczowych elementów w badanych przestrzennych układach tarczowych. Do określenia obliczeniowej

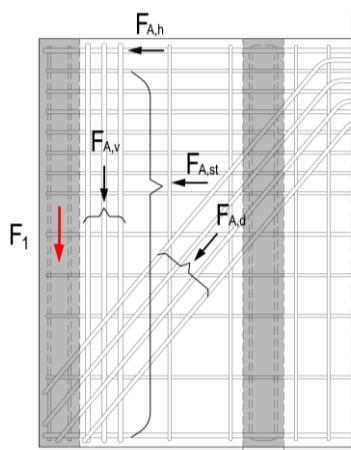
nośności przyjęto modele kratownicowe, na podstawie których można wyznaczyć graniczne siły w zbrojeniu, jak również graniczną nośność zarysowanego betonu.

Analizę teoretyczną tarczy wspornikowej podzielono na cztery odrębne podrozdziały:

- 5.1. *Weryfikacja dotychczasowych zaleceń* - zweryfikowano poprawność zaleceń przyjętych przez Leonhardta [1] oraz Schrödera [2] z wynikami własnych badań eksperymentalnych. Wyniki badań porównano również z założeniami normy PN- B- 03264:2002 [N7] jakie przyjęto do wymiarowania krótkich wsporników żelbetowych obciążonych na wysokości, w oparciu o wyznaczenie granicznych sił w zbrojeniu.
- 5.2. *Analiza stanu wyężenia i zarysowania* – przedstawiono analizę rozkładu naprężeń żelbetowej tarczy wspornikowej w fazie przed i po zarysowaniu z uwzględnieniem morfologii zarysowania.
- 5.3. *Analiza nośności granicznej* – opierając się na wynikach uzyskanych z własnych badań, dokonano analizy nośności żelbetowych tarcz wspornikowych wraz z propozycją modeli *ST* opierających się na granicznym wyężeniu stali oraz ściskanego betonowego krzyżulca z uwzględnieniem efektywności współczynnika *softening coefficient*.
- 5.4. *Propozycja projektowania* - na podstawie przyjętych *schematów ST* podano propozycję wymiarowania tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości z uwzględnieniem warunku ograniczającego minimalne wymiary tarczy wspornikowej z uwagi na zarysowany beton.

Wprowadzone oznaczenie sił w zbrojeniu tarczy wspornikowej

W celu ujednolicenia oznaczeń dla poszczególnych sił w zbrojeniu tarczy wspornikowej przyjętych w zaleceniach literaturowych i normowych wraz z wielkościami otrzymanymi z własnych badań eksperymentalnych, wprowadzono jednakowe symbole sił dla wszystkich analizowanych przypadków, podane na *rysunku 5.1*



- F_1 – siła niszcząca tarczę wspornikową,
- F_{Av} – siła w zbrojeniu pionowym (*vertical*) podwieszającym,
- F_{Ad} – siła w zbrojeniu ukośnym (*diagonal*),
- F_{Ah} – siła w zbrojeniu górnym poziomym (*horizontal*),
- F_{Ast} – siła w strzemionach (*stirrups*) poziomych (rozłożonych na wysokości tarczy).

Rys. 5.1 Oznaczenia sił w prętach zbrojeniowych analizowanej tarczy wspornikowej.

5.1 Weryfikacja dotychczasowych zaleceń

5.1.1 Zalecenia Leonhardta

W programie badawczym, zbrojenie tarcz wspornikowych z prętami ukośnymi DB II- 0.5 (1) i DB II-0.3 (1) przyjęto zgodnie z zaleceniami projektowymi Leonhardta [1] (patrz podrozdział 3.1.1). Według wytycznych [1], tarcze wspornikowe z obciążeniem działającym na wysokości powinny być projektowane z uwzględnieniem zbrojenia ukośnego, jak również pionowych prętów podwieszających. Udział tego zbrojenia (dla tarcz o smukłości ścinania równej ok. 1.0) w przenoszeniu siły F_I , został zaproponowany w taki sposób aby pręty pionowe, skoncentrowane przy krawędzi wspornika, przenosiły siłę $F_{Av}=0.6F_I$. Natomiast pręty ukośne, nachylone do poziomu pod kątem α , miały przenosić siłę $F_{Ad}=0.4F_I/\sin\alpha$.

W celu weryfikacji tych założeń [1], przeanalizowano wielkości granicznych sił w prętach ukośnych (F_{Ad}) i pionowych (F_{Av}) badanych wsporników tarczowych o mniejszej smukłości (0.5 i 0.3) i zestawiono w odniesieniu do obciążenia niszczącego $F_{I,u}$ (tabela 5.1). Wielkość siły w zbrojeniu ukośnym F_{Ad} sprowadzono do składowej pionowej równej $F_{Ad}\cdot\sin 50^\circ$. Siły w zbrojeniu wyznaczono na podstawie wyników uzyskanych z pomiarów odkształceń prętów zbrojeniowych.

Wartość siły niszczącej $F_{I,u}$ rozważano dla dwóch wariantów:

- I. Siła $F_{I,u}^I$ równa wielkości obciążenia granicznego uzyskanego z badań eksperymentalnych ($F_{I,u,exp}$).

$$F_{I,u}^I = F_{I,u,exp} \quad (5.1)$$

- II. Siła $F_{I,u}^{II}$ równa sumarycznej wielkości sił jaką mają przenieść pręty pionowe (podwieszające) i ukośne, co odpowiadało przyjętym założeniom przy projektowaniu na podstawie zaleceń [1].

$$F_{I,u}^{II} = F_{Av} + F_{Ad}\cdot\sin\alpha \quad (5.2)$$

Tabela 5.1 Udział zbrojenia pionowego F_{Av} i ukośnego F_{Ad} w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej DB II-0.5 (1) i DB II-0.3 (1) z uwzględnieniem zaleceń [1].

Tarcza	Siły w zbrojeniu z badań eksperymentalnych, przy $F_{I,u,exp}$			wariant I			wariant II		
	F_{Av}	F_{Ad}	$F_{Ad}\cdot\sin 50^\circ$	$F_{I,u}^I = F_{I,u,exp}$	$F_{Av}/F_{I,u}^I$	$F_{Ad}\cdot\sin 50^\circ / F_{I,u}^I$	$F_{I,u}^{II} = F_{Av} + F_{Ad}\cdot\sin\alpha$	$F_{Av}/F_{I,u}^{II}$	$F_{Ad}\cdot\sin 50^\circ / F_{I,u}^{II}$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[-]	[-]
DB II-0.5 (1)	125.2	191.5	146.7	594	0.21	0.25	271.9	0.46	0.54
DB II-0.3(1)	182.4	291.3	223.1	930	0.20	0.24	405.5	0.45	0.55
według [1]	-	-	-	-	0.60	0.40	-	0.60	0.40

Dla obu rozpatrywanych przypadków obciążenia $F_{I,u}$ (wariant I lub wariant II), analiza rozkładu siły w zbrojeniu tarcz wspornikowych, niezależnie od badanej smukłości ścinania (0.5 lub 0.3) wykazała, iż większą część obciążenia działającego po wysokości wspornika przejęły pręty odgięte [27],

[29]. Uzyskano zależności odmienne od sugerowanych przez *Leonhardta* [1], zgodnie z którymi większy udział w przekazywaniu obciążenia pośredniego F_1 miały stanowić pionowe strzemiona podwieszające.

Analizując wyniki badanych tarcz wspornikowych, należy również zwrócić uwagę, iż zbrojenie ukośne i pionowe nie przejęło całkowitego obciążenia $F_{1,u,exp}$ przypadającego na tarczę wspornikową (patrz *wariant I*), jak sugerowano w wytycznych do projektowania [1]. Co więcej, pręty ukośne i pionowe przeniosły sumarycznie nie więcej niż połowę całkowitego obciążenia przypadającego na wspornik. W tarczy *DB II-0.5 (1)* zbrojenie to przeniosło $0.46 F_{1,u,exp}$, a w przypadku tarczy o krótszym wysięgu *DB II-0.3 (1)* sumaryczny udział prętów pionowych i ukośnych stanowił $0.44 F_{1,u,exp}$.

5.1.2 Zalecenia Schrödera

Odmienne zalecenia do wymiarowania wspornikowych tarcz obciążonych na wysokości zasugerował *Schröder* [2] (*podrozdział 4.1.1*) proponując aby pręty odgięte zostały zwymiarowane na siłę $F_{Ad} = F_1$ działającą na wspornik (przenosząc tym samym $1.0 \cdot \sin \alpha$ pionowego obciążenia F_1), a dodatkowo oprócz nich umieszczone zostały strzemiona pionowe przenoszące siłę $F_{Av} = 0.4F_1$.

Zestawienie zalecanych wielkości [2], przy rozkładzie obciążenia uwzględniającym pręty pionowe i ukośne wraz z wartościami eksperymentalnymi przedstawiono poniżej w tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Udział zbrojenia pionowego F_{Av} i ukośnego F_{Ad} w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej *DB II-0.5 (1)* i *DB II-0.3 (1)* z uwzględnieniem zaleceń [2].

Tarcza	Siły w zbrojeniu z badań eksperymentalnych, przy $F_{1,u,exp}$			$F_{1,u} = F_{1,u,exp}$ [kN]	$F_{Av} / F_{1,u}$ [-]	$F_{Ad} \cdot \sin 50^\circ / F_{1,u}$ [-]
	F_{Av}	F_{Ad}	$F_{Ad} \cdot \sin 50^\circ$			
	[kN]	[kN]	[kN]			
DB II-0.5 (1)	125.2	191.5	146.7	594	0.21	0.25
DB II-0.3 (1)	182.4	291.3	223.1	930	0.20	0.24
według [2]				-	0.40	$1.0 \cdot \sin 50^\circ = 0.77$

Wyniki własnych badań eksperymentalnych również nie potwierdziły zgodności rozdziału obciążenia ze wskazaniem *Schrödera*. Udział prętów pionowych jak i odgiętych w przenoszeniu obciążenia rozłożonego na wysokości wspornika, według proponowanych wytycznych [2] został stosunkowo mocno zawyżony. Niezależnie od badanej smukłości tarczy wspornikowej pręty pionowe przenosiły obciążenie dwukrotnie mniejsze, natomiast pręty ukośne ponad trzykrotnie mniejsze.

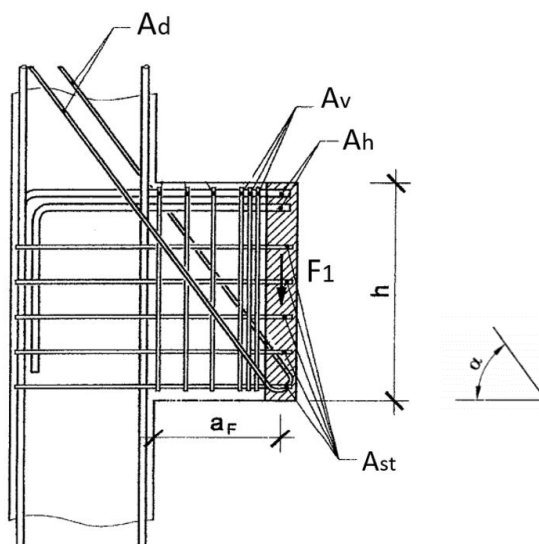
5.1.3 Zalecenia normowe

Jak wspomniano już w niniejszej pracy (*podrozdział 3.2*), współczesne normy, m.in. *PN-EN:2008* [N8], *MC2010* [N6], *ACI 318-19* [N4] zawierają jedynie ogólne wytyczne do projektowania tarcz. Zasady modelowania *metodą ST* nie są podane w sposób wyczerpujący i jednoznaczny, zwłaszcza przy analizie nietypowych przypadków konstrukcyjnych, do jakich niewątpliwie należą tarcze wspornikowe obciążone w sposób pośredni na wysokości.



PN-B-03264:2002 [N7]

Zalecenia projektowe [N7], dotyczące wymiarowania wsporników słupa z obciążeniem działającym po wysokości F_1 zostały zamieszczone i opisane w podrozdziale 3.2.1 niniejszej dysertacji. Z uwagi na wprowadzenie nowych oznaczeń sił (rys. 5.1) na potrzeby analizy teoretycznej, na rysunku 5.2 przedstawiono raz jeszcze układ zbrojenia wspornika o $a_F/h \leq 0.6$:



Rys. 5.2 Zbrojenie wspornika słupa obciążonego na wysokości [N7].

W zaleceniach normowych uwzględniono zbrojenie ukośne ($F_{Ad} \geq \frac{1}{f_{yd}} \left(\frac{0.5F_1}{\sin \alpha} \right)$), zbrojenie pionowe podwieszające ($F_{Av} \geq \frac{0.5F_1}{f_{yd}}$), górne pręty poziome ($F_{Ah} \geq \frac{1}{f_{yd}} \left(F_1 \frac{a}{z} + H_{sd} \right)$), jak również rozłożone po wysokości wspornika strzemiona poziome ($F_{Ast} = \frac{0.5F_1}{f_{yd}}$).

Wobec tak przyjętego schematu obciążenia oraz mając na uwadze, iż krótkie wsporniki analizowane są najczęściej w płaskim stanie naprężenia, autorka podjęła próbę weryfikacji przytoczonych wyżej normowych zaleceń [N7] z wynikami własnych badań eksperymentalnych wsporników tarczowych DB II-0.5 (1) i DB II-0.3 (1). Poniżej w tabeli 5.3 przedstawiono porównanie wielkości sił w poszczególnym zbrojeniu w odniesieniu do siły F_1 działającej na wspornik. Siły w zbrojeniu ukośnym F_{Ad} i górnym poziomym F_{Ah} sprowadzono do składowych pionowych $F_{Ad} \cdot \sin 50^\circ$ i $F_{Ah} \cdot \frac{a}{z}$.

Tabela 5.3 Udział zbrojenia w przenoszeniu obciążenia rozłożonego po wysokości wspornika z uwzględnieniem zaleceń [N7].

Rodzaj tarczy	Rodzaj analizy	F_{Av}/F_1	$F_{Ad} \cdot \sin 50^\circ / F_1$	$(F_{Ah} \cdot \frac{a}{z}) / F_1$	F_{Ast}/F_1
		[-]	[-]	[-]	[-]
DB II-0.5 (1)	PN-B-03264	0.50	0.50	0.56	0.50
	$F_1 = F_{1,u,exp}$	0.21	0.25	0.31	0.47
DB II-0.3 (1)	PN-B-03264	0.50	0.50	0.39	0.50
	$F_1 = F_{1,u,exp}$	0.20	0.24	0.23	0.47

Stosując zalecenia dotyczące wspornika słupa do wsporników tarcz uzyskujemy mocno przeszacowane wartości sił. Najlepszą zgodność między teoretycznym a eksperymentalnym udziałem

zbrojenia w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości, niezależnie od badanej smukłości tarczy, uzyskano dla strzemion poziomych (F_{Ah}); różnice wynosiły 4-6%.

Porównując wyniki własnych badań z wytycznymi *PN-B-03264:2002* należy mieć na uwadze, iż zalecenia normowe dotyczą wsporników słupa a nie wsporników tarczowych, w których rozkład obciążenia jak i wyteżenie w granicznym stanie nośności może być odmienne. We wspornikach słupa kąt θ zmienia się wraz ze smukłością słupa, natomiast w badanych tarczach kąt nachylenia ściskanych krzyżulców mieścił się w granicach $40^\circ \div 50^\circ$ niezależnie od rozpatrywanej smukłości, czy sposobu ukształtowania zbrojenia wspornika.

5.1.4 Podsumowanie

Przedstawiona weryfikacja istniejących zaleceń projektowych [1], [2], [N7] z wynikami własnych badań tarcz wspornikowych, potwierdza odmienny udział zbrojenia w przenoszeniu obciążenia F_t rozłożonego po wysokości [27], [42].

W badaniach eksperymentalnych największy udział w przekazywaniu obciążenia zaobserwowano w zbrojeniu poziomym (F_{Ah} , F_{Ast}) i ukośnym (F_{Ad}). Wyniki badań nie potwierdzają zatem zgodności z zaleceniami projektowymi *Leonhardta* [1], w których największą rolę w przenoszeniu obciążenia rozłożonego po wysokości przypisano podwieszającemu zbrojeniu pionowemu (F_{Av}). Zbieżności wyników nie uzyskano również z wytycznymi *Schröder'a* [2], w których udział prętów ukośnych (F_{Ad}) i pionowych (F_{Av}) jest znacząco zawyżony.

Porównanie wartości sił w zbrojeniu obliczonych według założeń *PN-B-03264:2002* [N7] i eksperymentalnych nie potwierdza możliwości bezpośredniej adaptacji do wsporników tarczowych o smukłości mniejszej od 1.0.

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji wyników eksperymentalnych z dostępnymi wytycznymi, można wnioskować, iż konieczna jest propozycja korekty do wytycznych projektowania tarcz wspornikowych o smukłości mniejszej niż 1.0, uwzględniająca udział zbrojenia poziomego w przenoszeniu obciążenia rozłożonego po wysokości.

5.2 Analiza stanu wyteżenia i zarysowania

5.2.1 Stan przed zarysowaniem

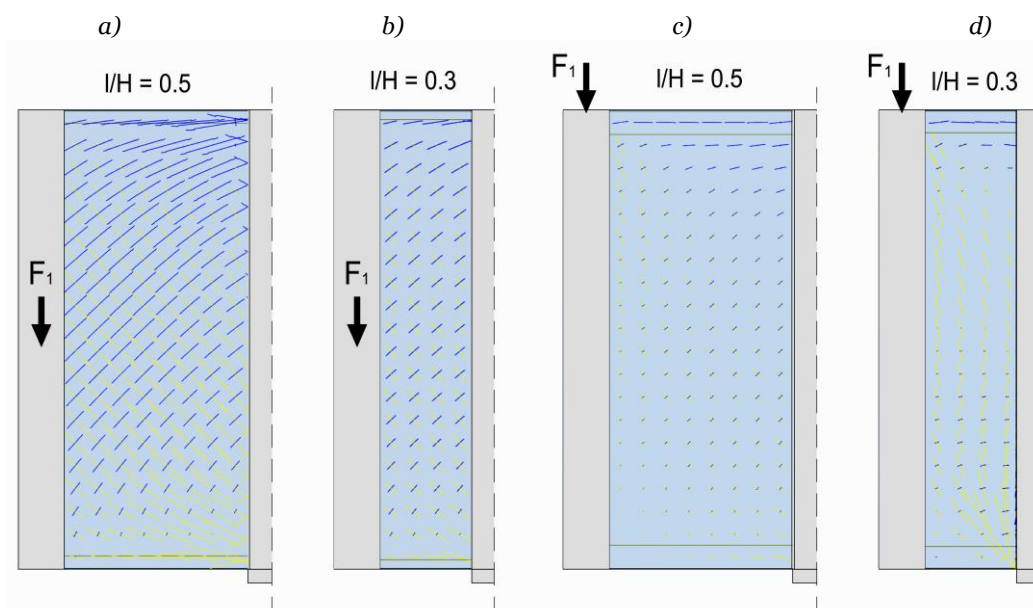
Przy projektowaniu elementów tarczowych znajomość przebiegu naprężeń jest konieczna do określenia obszarów, w których występują naprężenia rozciągające (ściskane zbrojenie w belkach-ścianach jest przeważnie zbędne), w celu zwymiarowania zbrojenia na siły wewnętrzne, wyznaczone na ich podstawie. Do momentu zarysowania przekroju, rozkład naprężeń możemy uzyskać na podstawie sprężystej analizy konstrukcji posługując się np. metodą elementów skończonych.

W niniejszej pracy do analizy badanych tarcz wspornikowych w *fazie I*, przy zadanej smukłości ($l/H = 0.3$ lub 0.5) wykorzystano program *Robot Structural Analysis Professional*. Na *rysunku 5.3* dla założonego schematu statycznego i obciążeń uzyskano następujące trajektorie naprężeń głównych σ_1 (kolor żółty) i σ_2 (kolor niebieski).

W pierwszych dwóch tarczach (*rys. 5.3 a*) i *b*)) analizowano obciążenie F_t rozłożone na wysokości wspornika, jak miało to miejsce w badaniach doświadczalnych. Dla porównania na *rysunku 5.3 c*) i *d*)



przedstawiono przebieg trajektorii naprężeń głównych w przypadku tarcz wspornikowych obciążonych siłą F_1 na krawędzi górnej przy założeniu tych samych smukłości ścinania jak poprzednio.



Rys. 5.3 Porównanie trajektorii naprężeń głównych w stanie sprężystym w tarczy wspornikowej z obciążeniem rozłożonym po wysokości: a) $l/H = 0.5$, b) $l/H = 0.3$ i z obciążeniem przyłożonym na krawędzi górnej: c) $l/H = 0.5$, d) $l/H = 0.3$.

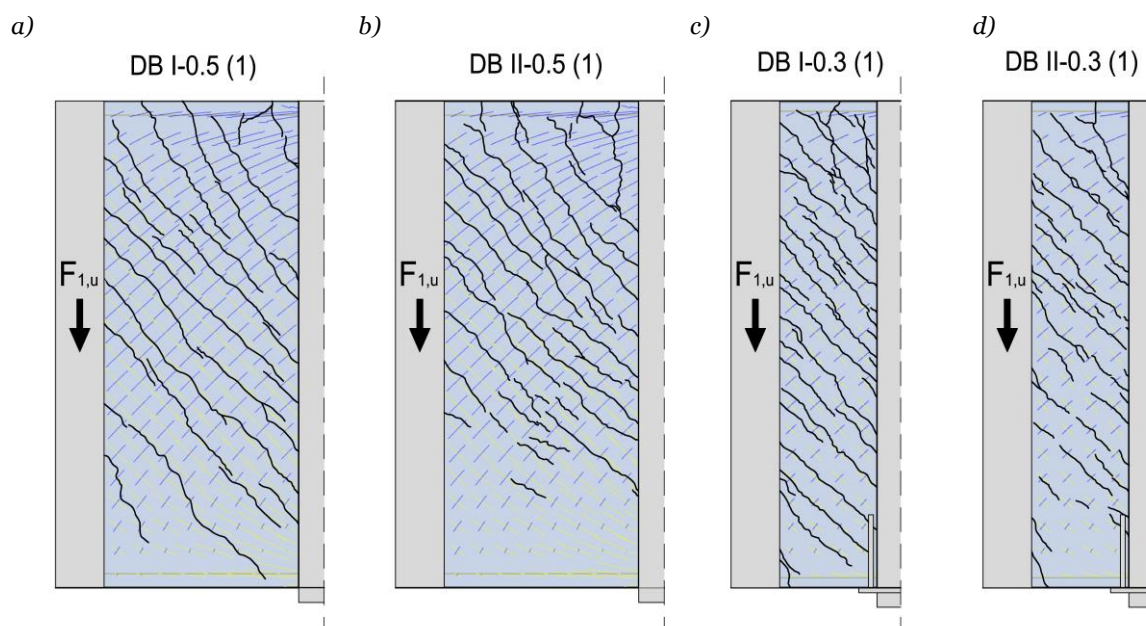
Jak wynika z przedstawionych kierunków naprężeń dla niezarysowanych żelbetowych tarcz, smukłość ścinania wpływa w niewielkim stopniu na zmianę trajektorii naprężeń głównych w przypadku tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości. Wartości kątów nachylenia ściskanych krzyżulców mieściły się w większości przypadków w zakresie $40^\circ \div 50^\circ$, a w środkowym obszarze płaszczyzny tarczy wspornikowej wyniosły ok. 45° niezależnie od stosunku l/H . W sytuacji gdy obciążenie działa na górną krawędź, trajektorie naprężeń głównych w istotny sposób zależą od smukłości tarczy, co potwierdzone zostało badaniami eksperymentalnymi wsporników tarczowych obciążonych na górnej krawędzi [11], jak i wsporników słupa [43], [44] w których zaobserwowano zmianę kąta θ nachylenia krzyżulca ściskanego.

5.2.2 Stan po zarysowaniu

W tarczach żelbetowych zarysowanie pojawia się stosunkowo wcześniej - w badaniach własnych, tarcze wspornikowe zarysowały się już przy obciążeniu równym 30% siły niszczącej. Po zarysowaniu, zwłaszcza w stanie granicznym nośności, rozkład sił wewnętrznych zmienia się i kształtuje w zależności od rodzaju i intensywności zarysowania, a także od przyjętego sposobu ukształtowania zbrojenia. Wczesne zarysowanie oraz duża rola tarcz żelbetowych, przenoszących znaczne obciążenia w konstrukcjach, mogą powodować stosowanie zbyt dużej ilości zbrojenia. Jego nadmiar i związany z tym brak możliwości odpowiedniego ukształtowania jak i zakotwienia prętów prowadzą do zaniżenia nośności tych elementów. Ważne jest zatem rozpoznanie charakteru pracy tarcz w *fazie II*, co niewątpliwie umożliwiają badania eksperymentalne.

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych, wraz ze zwiększającym się obciążeniem F_1 , we wspornikach tarczowych pojawiały się rysy ukośne powodujące wydzielanie ściskanych krzyżulców betonowych. Jak możemy zaobserwować (rys. 5.4), kierunek rys w przybliżeniu pokrywał się z kierunkiem trajektorii głównych naprężeń ściskających wyznaczonych w *fazie I* (oznaczonych kolorem

żółtym). Ten stan rzeczy jest związany przede wszystkim z zapewnieniem poprawnie skonstruowanego zbrojenia, przyjętego na podstawie przebiegu naprężeń obliczonych w zakresie sprężystym.



Rys. 5.4 Zarysowanie tarcz wspornikowych w chwili zniszczenia na tle trajektorii naprężeń głównych w stanie sprężystym: a) DB I-0.5 (1), b) DB II-0.5 (1), c) DB I-0.3 (1), d) DB II-0.3 (1).

Zarysowanie ukośne w obszarze działania strumieni sił ściskających, zlokalizowane w przeważającej części obszaru tarczy wspornikowej, może powodować nie tylko pogorszenie warunków użytkowania (np. nadmierna szerokość rys) ale także, a nawet przede wszystkim, może stanowić zagrożenie dla stanu bezpieczeństwa związanego z lokalnym wyczerpaniem nośności. Z tego względu przy projektowaniu istotne jest, oprócz określenia nośności granicznej stali, analityczne wyznaczenie wyężenia betonu w złożonym stanie naprężenia.

5.2.3 Podsumowanie

Analiza zachowania tarcz po zarysowaniu pozwoliła na rzeczywistą ocenę pracy elementu w stanie granicznym nośności. W przypadku analizy sprężystej i przyjęciu materiału jednorodnego dla tarczy wspornikowej, nie było możliwe zaobserwowanie skutków wynikających z gwałtownej zmiany sztywności wraz z pojawiającym się zarysowaniem. Z uwagi na zarysowanie tarcz wspornikowych już we wczesnym etapie obciążeń, istotna jest analiza wyężenia betonu w *fazie II*.

Jak wykazano, przebieg trajektorii naprężeń w fazie sprężystej (*MES*) ściśle nawiązywał do obrazów zarysowania i przebiegu naprężeń głównych w stanie granicznym nośności.

5.3 Analiza nośności granicznej

Opierając się na wynikach własnych badań eksperymentalnych, autorka dokonała analizy nośności tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości wraz z propozycją przyjęcia *modeli ST* uwzględniających zastosowanie różnego sposobu ukształtowania zbrojenia (ortogonalnego lub mieszanego) oraz zmiennej smukłości wspornika ($l_t/H = 0.3$ lub 0.5). Podstawą przyjęcia odpowiednich modeli kratownicowych i schematów niszczenia był obraz zarysowania oraz pomiary odkształceń stali i betonu, bez których określenie rzeczywistego przebiegu strumieni sił wewnętrznych byłoby niemożliwe.

Analizę nośności granicznej przeprowadzono z uwagi na stan graniczny wyężenia stali oraz wyężenia betonu.

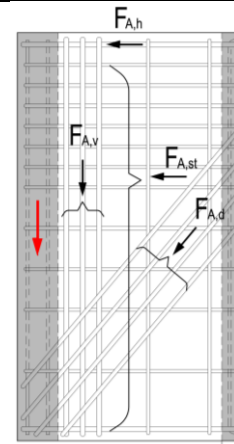
W modelach kratownicowych przyjęto następujące założenia:

- kąt θ nachylenia ściskanych krzyżulców do poziomu odpowiada średniemu kątowi nachylenia głównych rys ukośnych uzyskanych z analizy morfologii rys,
- przyjęty w modelach środek ciężkości prętów rozciąganych pokrywa się ze środkiem ciężkości zbrojenia,
- strzemiąca poziome, mające odzwierciedlać pręty rozciągane w założonym modelu, przyjęto z obszaru stanowiącego 90% wysokości tarczy.

Wielkości eksperymentalne potrzebne do obliczenia granicznych sił w prętach założonych modeli *ST* podano w tabeli 5.4. Dane z badań wyznaczono na podstawie wyężenia stali i obrazów zarysowań odnotowanych tuż przed zniszczeniem.

Tabela 5.4 Wielkości eksperymentalne potrzebne do wyznaczenia granicznych sił w założonych modelach *ST*.

Tarcza	θ [°]	α [°]	F_{Ah} [kN]	F_{Ast}^* [kN]	F_{Ad} [kN]	F_{Av} [kN]	$F_{1,u,exp}^*$ [kN]
DB I-0.5 (1)	45	-	116.7	339.2	-	123.3	504
DB II- 0.5 (1)	45	50	111.3	276.3	191.5	125.2	553
DB I-0.3 (1)	45	-	155.6**	649.3**	-	182.2	835
DB II-0.3 (1)	45	50	106.8	441.2	291.3	182.4	837



* wielkość siły niszczącej z badań $F_{1,u,exp}$ przyjęto równoważną wielkość siły dla której został dokonany ostatni odczyt z pomiarów tensometrycznych,

** w strzemiach poziomych dla których nie był dokonywany pomiar tensometryczny, przyjęto uśrednioną wartość siły uzyskaną z najbliższej sąsiadujących prętów poziomych.

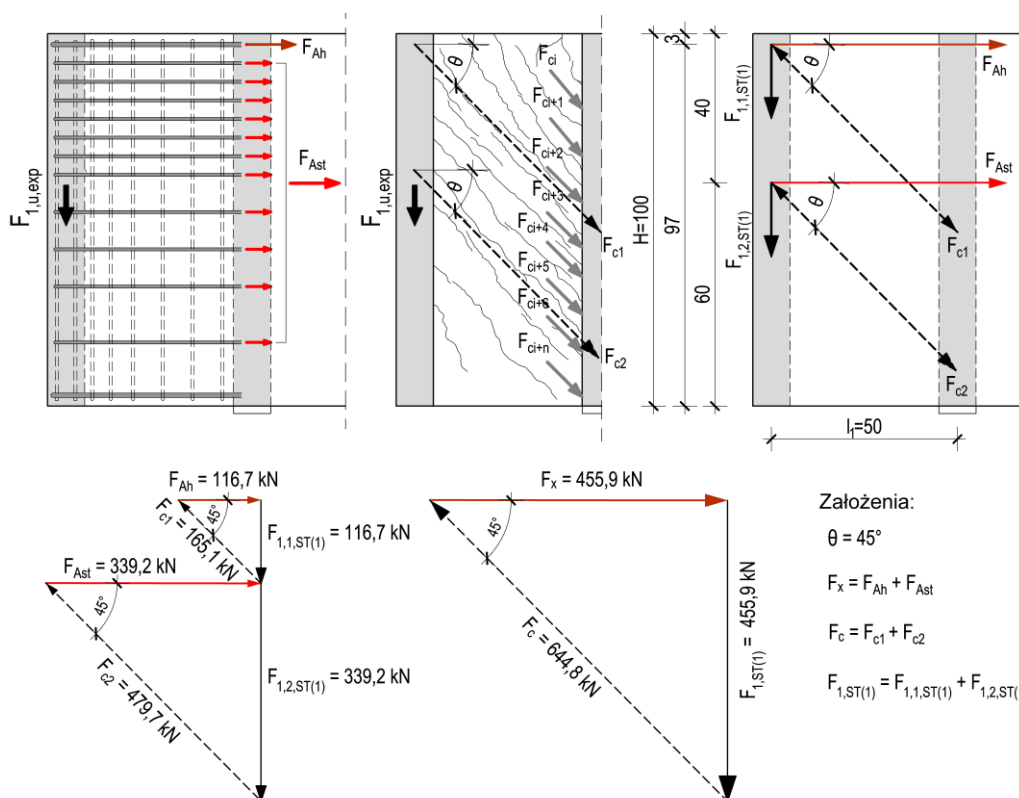
5.3.1 Stan graniczny wyężenia stali

Do określenia obliczeniowej nośności tarcz z uwagi na graniczny stan wyężenia stali przyjęto modele *ST(1)* składające się z dwóch lub trzech statycznie wyznaczalnych kratownic w zależności od rodzaju zbrojenia wspornika. Przyjęcie superpozycji modeli statycznie wyznaczalnych zastępujących kratownicę statycznie niewyznaczalną, miało na celu ułatwienie wyznaczania granicznych sił w prętach przy projektowaniu bez konieczności wyznaczania rzeczywistej sztywności elementów [45].

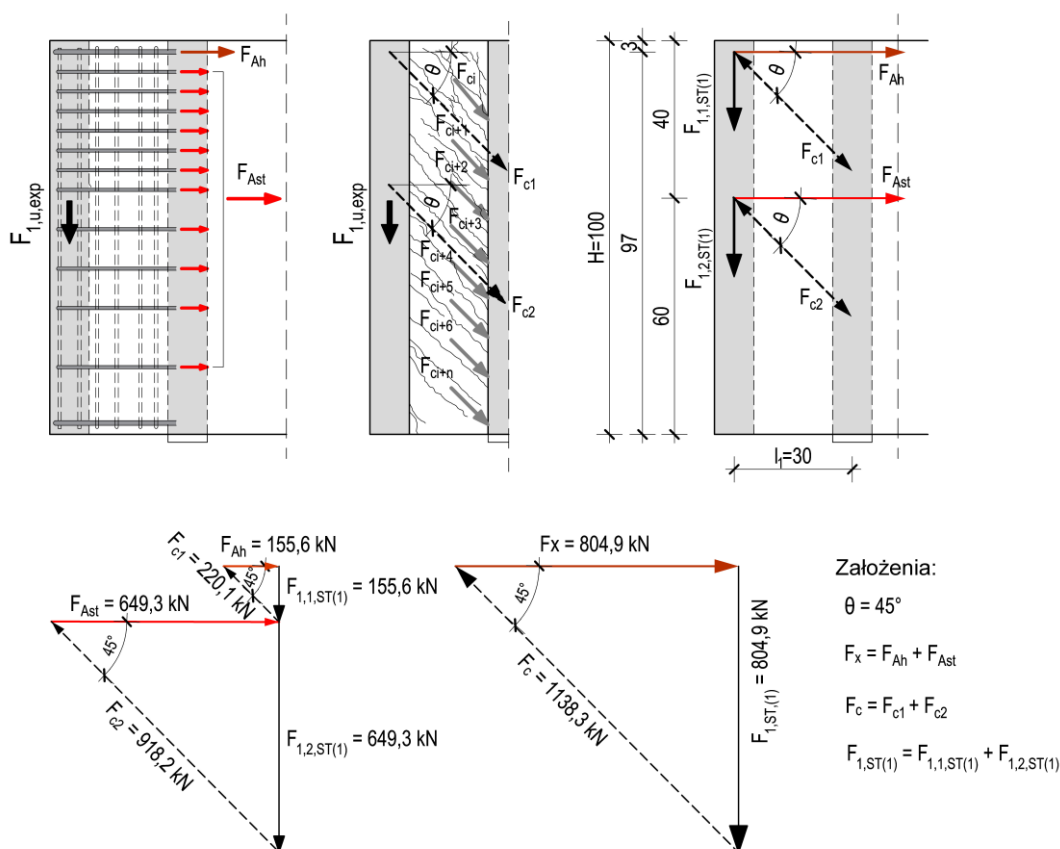
Założony w modelach *ST(1)* układ prętów odpowiada uproszczonemu rozkładowi naprężeń w tarczy wspornikowej obciążonej wzdłuż całej wysokości. Schematy obliczeniowe przyjęto odrębnie dla tarcz *DB I - 0.5 (1)* i *DB I-0.3 (1)* ze zbrojeniem ortogonalnym oraz dla tarcz *DB II- 0.5 (1)* i *DB II-0.3 (1)* zbrojonych ortogonalnie z prętami ukośnymi.

W schematach *ST(1)* opartych na granicznym wyężeniu stali, obliczeniową siłę niszczącą tarcze wspornikowe oznaczono jako $F_{1,ST(1)}$. Wprowadzono również oznaczenie F_x dla sumarycznej siły we wszystkich prętach poziomych - górnego zbrojenia poziomego i strzemiach rozłożonych na wysokości ($F_x = F_{Ah} + F_{Ast}$).

- tarcze wspornikowe zbrojone ortogonalnie DB I-o.5 (1) i DB I-o.3 (1)



Rys. 5.5 Schemat modelu ST(1) tarczy wspornikowej DB I-o.5 (1) ze zbrojeniem ortogonalnym.



Rys. 5.6 Schemat modelu ST(1) tarczy wspornikowej DB I-o.3 (1) ze zbrojeniem ortogonalnym.

Uwzględniając rzeczywiste wyężenie zbrojenia jak i morfologię zarysowania, modele Strut and Tie wsporników tarczowych ze zbrojeniem ortogonalnym przyjęto w formie dwóch pojedynczych

kratownic. Założenia oraz schematy modeli obliczeniowych zostały przedstawione na *rysunkach 5.5 i 5.6*.

W tabeli 5.5 na podstawie przyjętych modeli $ST(1)$ zamieszczono obliczone wartości sił niszczących $F_{1,1,ST}$ i $F_{1,2,ST}$ w poszczególnych kratownicach oraz sumaryczną siłę niszczącą $F_{1,ST}$ w odniesieniu do nośności $F_{1,u,exp}$ uzyskanej z badań.

Tabela 5.5 Analiza nośności tarcz wspornikowych zbrojonych ortogonalnie według zaproponowanego modelu $ST(1)$.

Tarcza	$F_{1,u,exp}^*$	$F_{1,1,ST(1)}$	$F_{1,2,ST(1)}$	$F_{1,ST(1)} = F_{1,1,ST(1)} + F_{1,2,ST(1)}$	$F_{1,1,ST(1)} / F_{1,ST(1)}$	$F_{1,2,ST(1)} / F_{1,ST(1)}$	$F_{1,u,exp}^* / F_{1,ST(1)}$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]
DB I-0.5 (1)	504	116.7	339.2	455.9	0.26	0.74	1.11
DB I-0.3 (1)	835	157.6	649.3	804.9	0.19	0.81	1.04

* wielkość siły niszczącej z badań $F_{1,u,exp}$ przyjęto równoważną wielkość siły dla której został dokonany ostatni odczyt z pomiarów tensometrycznych

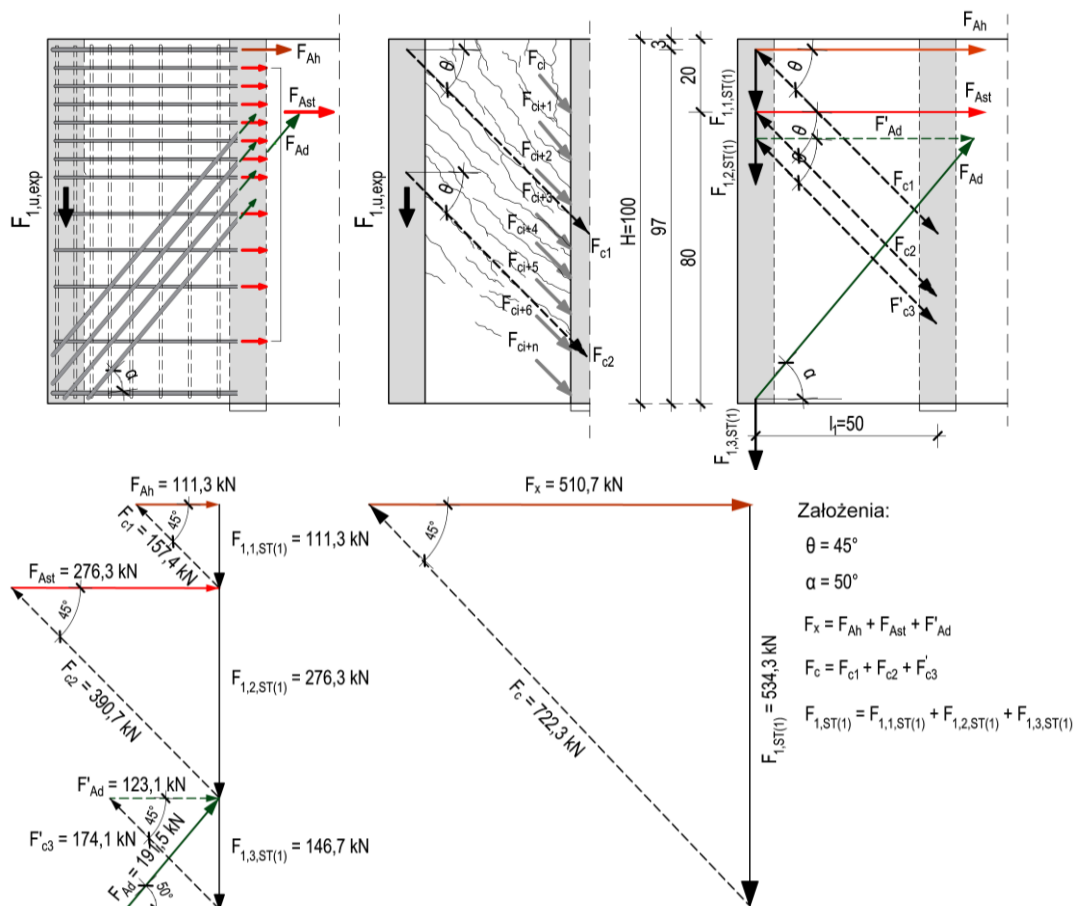
Badania eksperymentalne wsporników tarczowych ze zbrojeniem ortogonalnym, wykazały, iż najbardziej skuteczne w przenoszeniu obciążenia działającego po wysokości są strzemiona poziome ($F_{1,2,ST} / F_{1,ST} > 0.7$) rozmieszczone na całej wysokości tarczy. Potwierdzenie znaczącej roli zbrojenia poziomego wskazywał również Godycki-Ćwirko [4], który na podstawie przeprowadzonych badań zauważył relację, iż zwiększenie ilości zbrojenia poziomego w przypadku tarcz wysokich $H/L > 1.0$ opartych na słupach podwyższa ich nośność. Natomiast istotne znaczenie zbrojenia poziomego z uwagi na zarysowanie i nośność w przypadku wsporników słupa potwierdzili w swoich badaniach m.in. Nagrodzka-Godycka [44] i Robinson [46], [47].

Zgodnie z przyjętym własnym modelem $ST(1)$ siłę niszczącą $F_{1,ST}$ dla ortogonalnie zbrojonych tarcz wspornikowych można wyznaczyć z zadawalającą dokładnością, średnia wartość $F_{1,u,exp} / F_{1,ST(1)} = 1.08$.

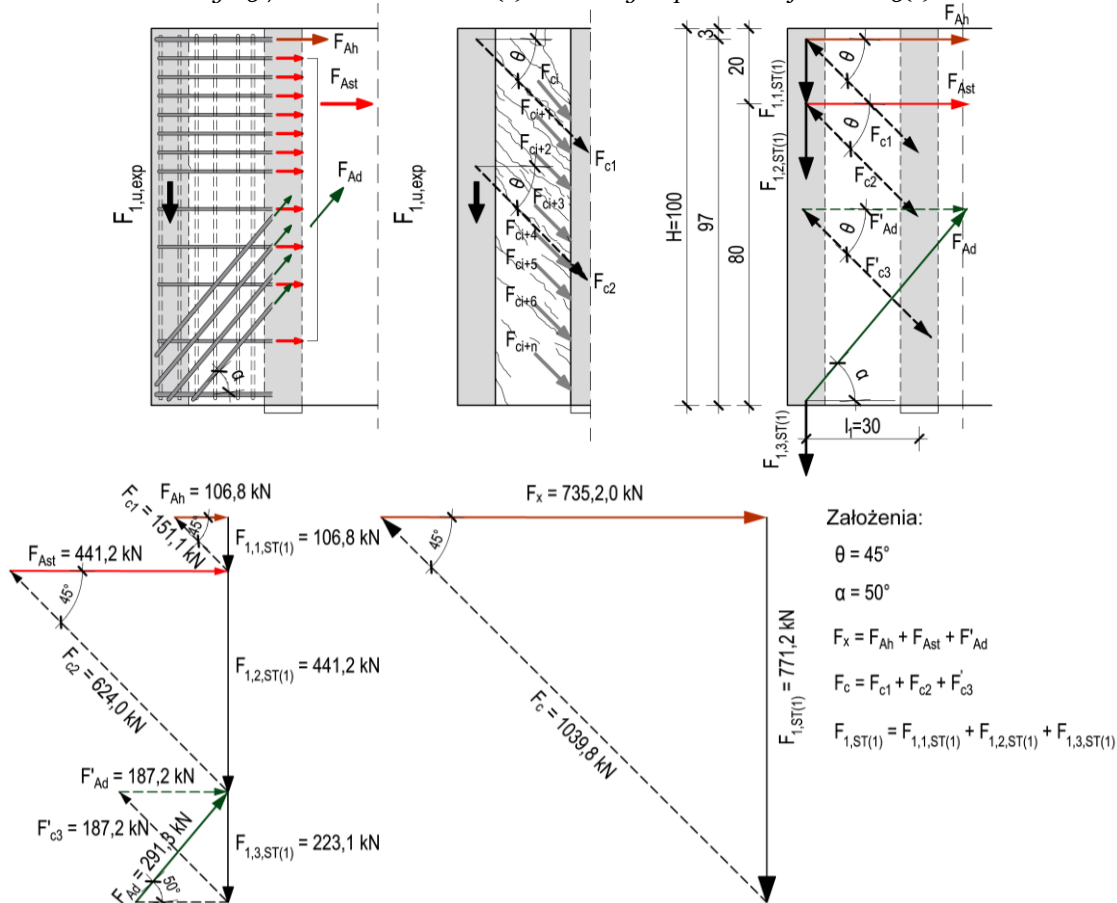
▪ *tarcze wspornikowe zbrojone w sposób mieszany DB II-0.5 (1) i DB II-0.3 (1)*

W przypadku zbrojenia tarcz z prętami ukośnymi, schemat zastępczy tworzą trzy pojedyncze kratownice. Dwie kratownice uwzględniają rozkład sił pochodzący od naprężeń uzyskanych w zbrojeniu poziomym, natomiast trzecia kratownica uwzględnia naprężenia w zbrojeniu ukośnym. W porównaniu z tarczami zbrojonymi ortogonalnie, zmianie uległo również położenie środka ciężkości strzemion poziomych. Przesunięcie środka ciężkości bliżej górnej krawędzi, spowodowane było zastosowaniem prętów ukośnych i przejściu przez nie części obciążenia działającego w dolnym obszarze wspornika.

Modele obliczeniowe zostały przedstawione na *rysunkach 5.7 i 5.8*. Wartości sił niszczących dla pojedynczych kratownic $F_{1,1,ST}$, $F_{1,2,ST}$, $F_{1,3,ST}$, jak i całkowitą siłę $F_{1,ST}$ w odniesieniu do uzyskanej z badań siły $F_{1,u,exp}$ zamieszczono w tabeli 5.6.



Rys. 5.7 Schemat modelu ST(1) dla tarczy wspornikowej DB II-o.5(1)



Rys. 5.8 Schemat modelu ST(1) dla tarczy wspornikowej DB II-o.3(1)

W tarczach wspornikowych zbrojonych dodatkowymi prętami ukośnymi udział poziomych strzemion (F_{Ah}) rozłożonych po wysokości był również największy w przenoszeniu obciążenia ($F_{1,2}/F_{1,ST} > 0.5$). Nie bez znaczenia w przekazywaniu siły działającej po wysokości było także umiejscowienie górnego zbrojenia poziomego (F_{Ah}). Badania eksperymentalne wykazały, że w przypadku wymiarowania tarcz wspornikowych o smukłości 0.5 i 0.3 istotne jest uwzględnienie zbrojenia poziomego - czego nie obejmowały zalecenia Leonhardta [1] w przypadku tarcz o smukłości $l/H \approx 1.0$. Natomiast zbrojenie ukośne ($F_{Ad} \cdot \sin \alpha$), niezależnie od analizowanej smukłości wspornika, przenosiło ok. $0.3F_{1,ST}$.

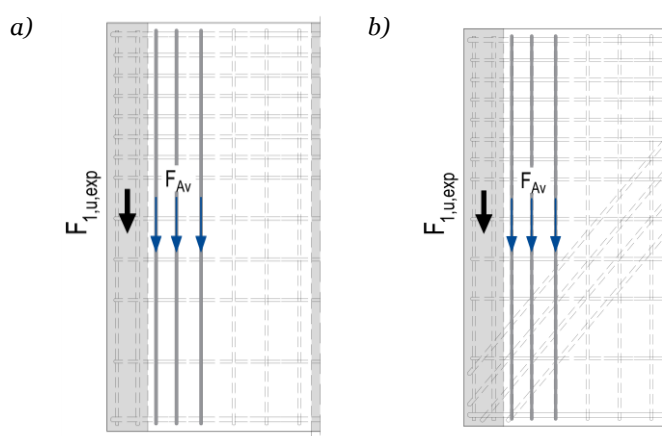
Tabela 5.6 Analiza nośności tarcz wspornikowych zbrojonych w sposób mieszany według zaproponowanego modelu $ST(1)$.

Tarcza	$F_{1,1}$	$F_{1,2}$	$F_{1,3}$	$F_{1,ST(1)} =$ $F_{1,1(1)} +$ $F_{1,2(1)} +$ $F_{1,3(1)}$	$F_{1,1} /$ $F_{1,ST(1)}$	$F_{1,2} /$ $F_{1,ST(1)}$	$F_{1,3} /$ $F_{1,ST(1)}$	$F_{1,u,exp}^* /$ $F_{1,ST(1)}$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]
DB II-0.5 (1)	111.3	276.3	146.7	534.3	0.21	0.52	0.27	1.03
DB II-0.3 (1)	106.8	441.2	223.1	771.2	0.14	0.57	0.29	1.09

* wielkość siły niszczącej z badań $F_{1,u,exp}$ przyjęto równoważną wielkości siły dla której został dokonany ostatni odczyt z pomiarów tensometrycznych

Dla tarcz wspornikowych DB II-0.5 (1) i DB II-0.3 (1) z prętami ukośnymi zgodność siły niszczącej $F_{1,u,exp}$ z badań doświadczalnych i wyznaczonej teoretycznie $F_{1,ST}$ na podstawie autorskiego modelu $ST(1)$ również była na wysokim poziomie, gdyż średni stosunek $F_{1,u,exp}/F_{1,ST}$ wynosił 1.06.

Ze względu na założone w badaniach obciążenie rozłożone po wysokości tarczy wspornikowej, niezbędne jest również umiejscowienie dodatkowego zbrojenia podwieszającego F_{Av} (rys. 5.9), dzięki któremu działająca siła F_1 zostanie przekazana na krawędź górną.



Rys. 5.9 Pionowe zbrojenie podwieszające w badanych tarczach wspornikowych: a) zbrojonych ortogonalnie DB I-0.5(1) i DBI-0.3(1), b) zbrojonych w sposób mieszany DB II-0.5(1) i DBII-0.3(1).

Udział tego zbrojenia w przenoszeniu obciążenia badanych tarcz wspornikowych przedstawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7 Udział zbrojenia pionowego F_{Av} w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej.

Tarcza wspornikowa	F_{Av}	$F_{1,u,exp}^*$	$F_{Av} / F_{1,u,exp}^*$
	[kN]	[kN]	[-]
DB I-0.5 (1)	123.3	529	0.23
DB II-0.5 (1)	125.2	594	0.21
DB I-0.3 (1)	182.2	935	0.19
DB II-0.3 (1)	182.4	930	0.20

Na podstawie pomiarów tensometrycznych stwierdzono, iż siła F_{Av} w pionowym zbrojeniu podwieszającym stanowi 20% siły niszczącej, niezależnie od kształtu zbrojenia, jak i smukłości badanej tarczy wspornikowej.

5.3.2 Stan graniczny wyężenia betonu

Stan graniczny nośności żelbetowych belek-ścian ograniczony jest nie tylko zbrojeniem, lecz również wyężeniem ściskanych krzyżulców, w których wartość wytrzymałości na ściskanie $f_{c,red}$ jest mniejsza od wytrzymałości f_c uzyskiwanej w próbie jednoosiowego ściskania. Przy uwzględnieniu pracy betonu w złożonym stanie naprężenia, zredukowana wytrzymałość na ściskanie $f_{c,red}$ wyrażona jest zależnością $f_{c,red} = \beta \cdot f_c$, gdzie β określany jest współczynnikiem zmiękczenia betonu ściskanego, tzw. *softening coefficient*.

Zagadnieniu zmniejszonej wytrzymałości zarysowanego betonu w ściskanych krzyżulcu poprzecznie rozciąganych poświęconych jest wiele prac naukowych, w których odnajdujemy różne podejścia przyjmowania współczynnika β . W pierwszych pracach poświęconych redukcji naprężeń ściskających w betonie, Nielsen [48] zalecał przyjmowanie wartości współczynnika β od jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie betonu f_c . Na podobnej zależności oparta jest również redukcja wytrzymałości $f_{c,red}$ przyjęta przez PN-EN:2008 [N8] oraz Hwanga i Lee [49]. Rogowsky i MacGregor [49] oraz Marti [50] początkowo zaproponowali stałą wartość współczynnika zmiękczenia zarysowanego betonu. W późniejszym etapie przyjęcie modeli materiałowych Rogowsky i MacGregor [51] oraz Schlaich i inni [52] uzależniali od położenia i stopnia nachylenia rys ukośnych. Badania przeprowadzone na żelbetowych panelach przez Vecchio i Collinsa [43], [53] były początkiem powstania zmodyfikowanej teorii pól naprężeń ściskanych (MCFT), która zakładała że zmiękczenie betonu związane jest nie tylko ze zmniejszeniem wytrzymałości ($\beta \cdot f_c$) lecz również z obniżeniem jego sztywności ($\beta \cdot \epsilon_{cl}$). Zgodnie z założeniami MCFT (Modified Compression Field Theory) [43] zarysowany beton stanowi nowy materiał z własną zależnością $\sigma_c - \epsilon_c$. Bardziej rozbudowany sposób wyznaczania współczynnika β uwzględniający, m.in. nachylenie ukośnych rys (θ), smukłość ścinania (a/d), wytrzymałość na ściskanie (f_c) czy główne odkształcenia rozciągające (ϵ_{cl}), wprowadzili Warwick i Foster [54], Foster i Gilbert [55], Zhang i Hsu [56] czy Matamaros i Wong [35]. W kolejnych modyfikacjach, zgodnie z założeniami SMCFT (Simplified Modified Compression Field Theory) do wyznaczania współczynnika zmiękczenia Bentz wraz z Vecchio i Collins'em [57] uwzględnili również szerokość rys i średnicę kruszywa. Także aktualne normy PN-EN:2008 [N8] oraz MC:2020 [N6] odnosząc się do wytycznych modelowania ST określają wpływ zmniejszenia wytrzymałości betonu na ściskanie w dwuosiowym stanie naprężeń.



Wyznaczenie współczynnika β redukującego wytrzymałość jednoosiowego ściskania ($f_{c,red} = \beta \cdot f_c$) w dalszych rozważaniach niniejszej rozprawy przyjęto na podstawie własnych wyników eksperymentalnych bazując na pomiarach odkształceń betonu, a także na podstawie wybranych zaleceń literaturowych i normowych.

Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika β_{exp} uwzględniało założenie, że zmiękczeniu ulegają zarówno naprężenia jak i odkształcenia betonu:

$$\beta_{exp} = \frac{\varepsilon_{c,exp}}{\varepsilon_{c1,exp}} \quad (5.3)$$

gdzie:

$\varepsilon_{c,exp}$ – główne odkształcenia ściskane z uwzględnieniem poprzecznych naprężeń rozciągających (dwuosiowy stan naprężeń),

$\varepsilon_{c1,exp}$ – główne odkształcenia ściskane w jednoosiowym stanie naprężeń.

Do dalszych rozważań zostaną przyjęte następujące propozycje wyznaczania współczynnika zmiękczenia β :

- 1) według *Nielsena* [48] jako bezpieczną wartość należy przyjmować:

$$\beta_N = 0.7 - \frac{f_c}{200} \quad (5.4)$$

- 2) *Rogowsky i MacGregor* [51] dla obszaru zarysowanego z kątem nachylenia krzyżulców $\theta = 45^\circ$ zakładali:

$$\beta_{R-MG} = 0.45 \quad (5.5)$$

- 3) według *Schlaicha i innych* [52] w obszar z ukośnymi rysami o dużej szerokości:

$$\beta_{Sch} = 0.34 \quad (5.6)$$

- 4) według *Zhanga i Hsu* [56]:

$$\beta_{Z-H} = \frac{5.8}{\sqrt{f_c}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 400 \cdot \varepsilon_{ct}}} \leq \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400 \cdot \varepsilon_{ct}}} \quad (5.7)$$

gdzie:

ε_{ct} – główne odkształcenia rozciągane z uwzględnieniem zarysowania,

- 5) według *PN-EN:2008* [N8]:

$$\beta_{PN-EN} = 0.6 \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \quad (5.8)$$

- 6) według *MC:2010* [N6] przy drugim poziomie aproksymacji:

$$\beta_{MC} = k_c = k_\varepsilon \cdot \eta_{f_c} \quad (5.9)$$

gdzie:

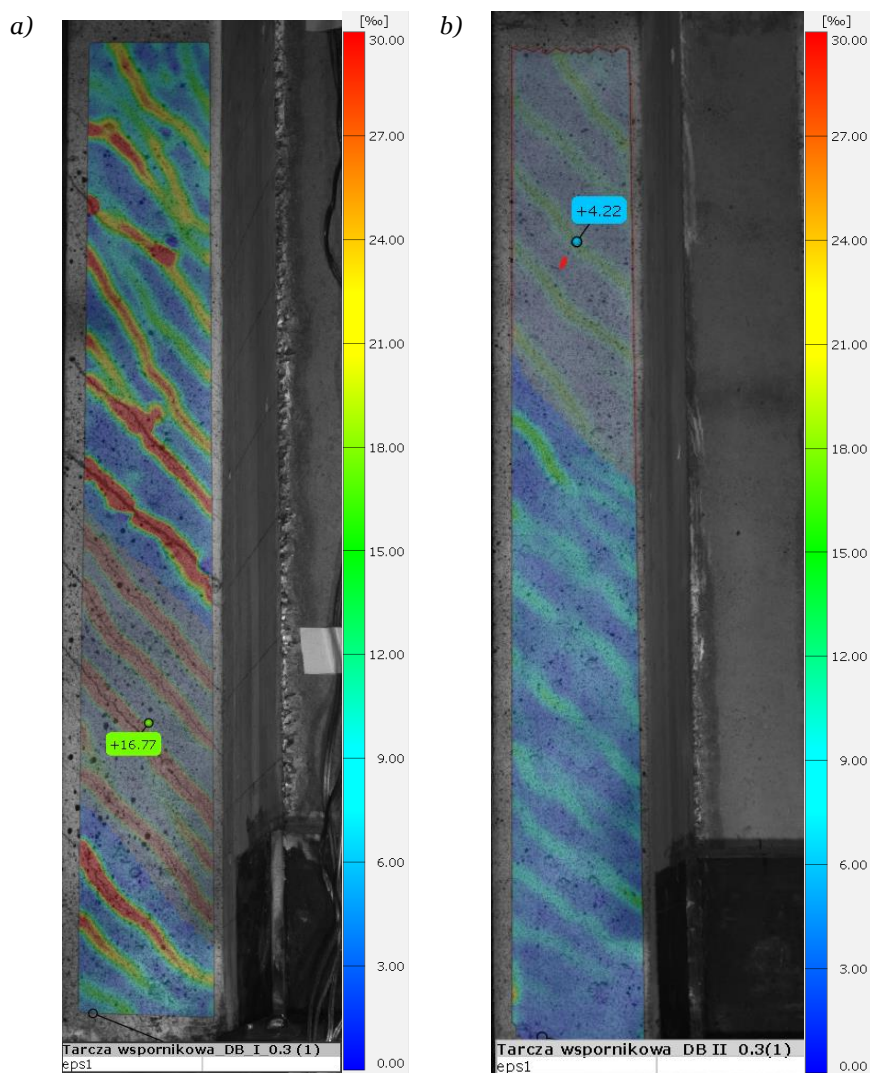
k_ε – współczynnik redukcji odkształceń

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1.2 + 55\varepsilon_{ct}}$$

$$\eta_{f_c} = \left(\frac{30}{f_c}\right)^{\frac{1}{3}}$$



Wartości eksperymentalne głównych odkształceń ściskających $\varepsilon_{c,exp}$ oraz rozciągających $\varepsilon_{ct,exp}$ w stanie granicznym nośności przyjęto dla najbardziej wyężonych obszarów wsporników tarczowych. Wartości odkształceń $\varepsilon_{c,exp}$ podano w p. 4.3.2, rys. 4.52 i 4.53. Wartości głównych odkształceń rozciągających ε_{ct} uzyskano na podstawie pomiarów systemem *Aramis* w tarczach DB I-0.3(1) i DB II-0.3(1) z II serii badań i przedstawiono na poniższym rysunku 5.10 (kolorem szarym oznaczono obszar najbardziej wyężony).



Rys. 5.10 Wartości głównych odkształceń rozciągających ε_{ct} z uwzględnieniem zarysowania w tarczy wspornikowej: a) DB I-0.3(1), b) DB II-0.3(2).

W tabeli 5.8 przedstawiono wyznaczone wartości obliczeniowe współczynnika zmęczenia β na podstawie powyższych zaleceń literaturowych i normowych, a następnie odniesiono je do wartości eksperymentalnych β_{max} . wartości głównych odkształceń ściskających ε_c patrz rozdział 4.3.2). Za wartość f_{ck} przyjęto wytrzymałość jednoosiową z badań na próbkach walcowych $f_{cm,cyl}$ (patrz tab. 4.2).

Najlepszą zgodność pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i analitycznymi uzyskano dla tarcz wspornikowych o smukłości równej 0.3. W obu przypadkach współczynnik zmęczenia był zbliżony do wyznaczonego według Rogowsky'iego i MacGregor'a [51] oraz Schlaich'a i innych [52].

W przypadku tarczy DB I-0.3(1) zbrojonej ortogonalnie najbliższy wartości eksperymentalnej był obliczeniowy współczynnik β określony na podstawie wytycznych projektowych według MC 2010 [N6], przy założeniu teorii pól naprężeń ściskanych i przyjęciu współczynnika redukcyjnego dla drugiego poziomu aproksymacji ($\beta_{exp} / \beta_{MC} = 0.98$). Jakkolwiek pozostałe propozycje wyznaczania β , nie różniły się w każdym z przypadków więcej niż o 20%.

Tabela 5.8 Współczynnik zmiękczenia β .

Tarcza			DB I-0.5(1)	DB II-0.5(1)	DB I-0.3(1)	DB II-0.3(1)
Wielkości eksperymentalne	$f_{ck} \rightarrow f_{cm, cyl}$	[MPa]	50	50	43	43
	$\varepsilon_{ci, exp}$	[‰]	2.7	2.7	2.2	2.2
	$\varepsilon_{c, exp}$	[‰]	0.58	0.48	0.89	0.76
	$\varepsilon_{ct, exp}$	[‰]	-	-	16.77	4.22
Wielkości obliczeniowe	β_{exp}	[-]	0.21	0.18	0.41	0.35
	β_N [48]	[-]	0.45	0.45	0.49	0.49
	β_{R-MG} [51]	[-]	0.45	0.45	0.45	0.45
	β_{Sch} [52]	[-]	0.34	0.34	0.34	0.34
	β_{Z-H} [56]	[-]	-	-	0.32	0.54
	β_{PN-EN} [N8]	[-]	0.48	0.48	0.50	0.50
	k_ε	[-]	-	-	0.47	0.70
	η_{fc}	[-]	-	-	0.89	0.89
Porównanie	β_{MC} [N6]	[-]	-	-	0.42	0.62
	β_{exp} / β_N	[-]	0.49	0.40	0.84	0.71
	$\beta_{exp} / \beta_{R-MG}$	[-]	0.49	0.40	0.91	0.78
	$\beta_{exp} / \beta_{Sch}$	[-]	0.65	0.53	1.21	1.03
	$\beta_{exp} / \beta_{Z-H}$	[-]	-	-	1.28	0.65
	$\beta_{exp} / \beta_{PN-EN}$	[-]	0.46	0.38	0.82	0.70
	β_{exp} / β_{MC}	[-]	-	-	0.98	0.56

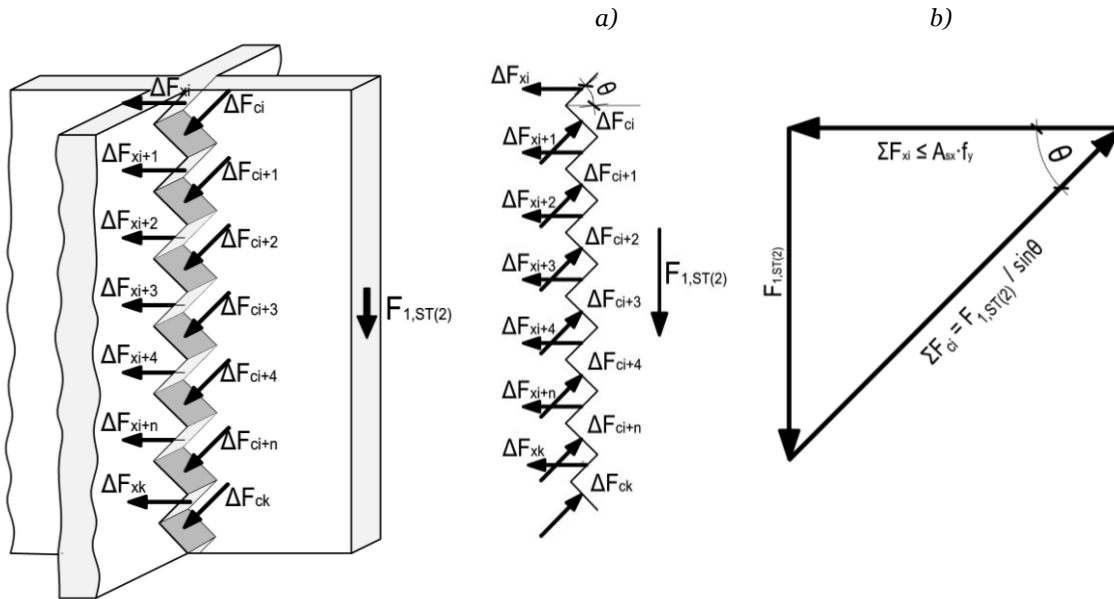
Spore różnice wartości współczynnika redukcyjnego β wyznaczonego obliczeniowo i eksperymentalnie dla tarcz smukłości równej 0.5 mogą wynikać z faktu, iż tarcze wspornikowe nie osiągnęły granicznego stanu nośności, a jedynie maksymalne wyężenie jakie odnotowano przy wyczerpaniu nośności układów przestrzennych w obszarze podporowym tarczy poprzecznej.

Na podstawie analizy wyników eksperymentalnych otrzymano stosunkowo niskie wartości współczynnika redukcyjnego β . Może być to związane z intensywnie zarysowanym obszarem badanych wsporników, czego potwierdzeniem jest również analiza numeryczna wykonana przez Muttoniego i Argirova [58]. W przeprowadzonej analizie sztywno-plastycznej metodą pól ściskanych RPSF, w obszarach największych zarysowań wsporników uzyskano wartość współczynnika redukcyjnego na poziomie 0.3.

W badanych tarczach wspornikowych z obciążeniem działającym po wysokości, morfologia rys jednoznacznie potwierdza wydzielanie ściskanych zastrzałów betonowych ukośnymi rysami wzdłuż całej wysokości przekroju podporowego tarczy, nachylonych do poziomu pod odpowiednim kątem θ . Obraz zarysowania jest zbliżony do przecinania, który występuje również w strefie przypodporowej tarcz ze słupami co potwierdzają badania Godyckiego-Ćwirko [4]. Przebieg zarysowania jest również podobny

do badanych bardzo krótkich wsporników słupa $a_F/d \leq 0,3$ z obciążeniem zadaniem na górnej krawędzi [44], [59]. Przy niszczeniu wsporników słupa zauważono, że powstające rysy ukośne przecinały płaszczyznę styku wspornika ze słupem na niemalże całej wysokości. W związku z tym do analizy granicznego wyężenia betonu wsporników tarczowych zdecydowano się zaaplikować model krótkiego wspornika ($a_F/d \leq 0,3$) zaproponowany przez Nagrodzką-Godycką [44]. Założony model obliczeniowy $ST(2)$ został przedstawiony na rysunku 5.11.

W analizie nośności tarcz wspornikowych opartych na granicznym wyężeniu betonu, obliczeniową siłę niszczącą wyznaczoną na podstawie założonego modelu $ST(2)$ oznaczono jako $F_{1,ST(2)}$.



Rys. 5.11 Mechanizm niszczenia tarczy wspornikowej (na podstawie modelu wspornika o $a_F/d \leq 0,3$ wg Nagrodzkiej-Godyckiej [44]: a) rozkład sił w betonowych krzyżulcach, b) obliczeniowy model $ST(2)$.

Całkowita powierzchnia ściskanych krzyżulców jest wyrażona zależnością:

$$A_c = \sum \Delta A_c(\theta) = b \cdot d \cdot \sin(90^\circ - \theta) = b \cdot d \cdot \cos\theta \quad (5.10)$$

gdzie:

θ – kąt nachylenia ściskanych krzyżulców do poziomu

Całkowitą siłę ściskającą, która przypada na betonowe krzyżulce można wyznaczyć ze wzoru:

$$F_c = \sum \Delta F_{ci} = \frac{F_{1,ST(2)}}{\sin\theta} \quad (5.11)$$

Naprężenia w stanie granicznym nośności można wyznaczyć na podstawie:

$$\sigma_c = \frac{\sum \Delta F_{ci}}{\sum \Delta A_c(\theta)} = \frac{F_{1,ST(2)}}{b \cdot d \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta} \leq f_{c,red} \quad (5.12)$$

Na podstawie zaproponowanego schematu niszczenia zarysowanych wsporników tarczowych (rys. 5.10), wyczerpanie nośności ze względu na przekroczenie naprężeń ściskających w betonowych krzyżulcach można określić według następującej zależności:

$$F_{1,ST(2)} = f_{c,red} \cdot A_c \cdot \sin\theta = f_{c,red} \cdot b \cdot d \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \quad (5.13)$$

Eksperymentalne $F_{1,u,exp}$ i obliczeniowe $F_{1,ST(2)}$ wartości granicznych sił poprzecznych przedstawiono w tabeli 5.9. Kąt θ nachylenia ściskanych krzyżulców przyjęto na podstawie średnich wartości nachylenia rys ukośnych do poziomu w przekroju podporowym, jakie odnotowano przy zniszczeniu.

Tabela 5.9 Analiza nośności tarcz wspornikowych na podstawie przyjętego modelu $ST(2)$ z uwagi na graniczne wyężenie betonu zarysowanego.

Tarcza	β	$f_{c,red}$	A_c	$F_{1,ST(2)}$	$F_{1,u,exp}$	$F_{1,u,exp}/F_{1,ST(2)}$
	[-]	[MPa]	[cm ²]	[kN]	[kN]	[kN]
DB I-0.5 (1)	0.21	10.70	686.6	521.5	504*	0.97
DB II-0.5 (1)	0.18	8.90	686.6	431.6	553*	1.28
DB I-0.3 (1)	0.41	17.40	686.6	844.6	935	1.11
DB II-0.3 (1)	0.35	14.85	686.6	721.2	930	1.29

* wielkość siły niszczącej z badań $F_{1,u,exp}$ przyjęto równoważną wielkości siły dla której został dokonany ostatni odczyt z pomiarów odkształceń ekstensometrem

Uzyskane wyniki granicznych sił poprzecznych tarcz wspornikowych z przyjętego schematu zniszczenia wykorzystującego zredukowaną wytrzymałość betonu są zbieżne z wielkościami otrzymanymi z badań eksperymentalnych, średnia wartość $F_{1,u,exp}/F_{1,ST(2)} = 1.16$. Zgodność wyników pokazuje, jak ważne przy wyznaczaniu granicznego wyężenia betonu jest uwzględnienie efektu zmiękczenia z uwagi na istniejące w tym obszarze zarysowanie.

Analizując stan wyężenia ściskanych krzyżulców, trzeba mieć zatem na uwadze, że ich zdolność nośna jest znacznie mniejsza w porównaniu z jednoosiowo ściskany elementem niezarysowanym. Zagadnienie nośności granicznej z uwagi na wyężenie betonu zarysowanego jest szczególnie istotne w przypadku tarcz w których nie osiągnięto granicy plastyczności w zbrojeniu w momencie wyczerpania nośności. W tarczach wspornikowych **DB I-0.5 (1)** i **DB II-0.5 (1)** w I serii badań nie doszło do uplastycznienia zbrojenia, jednak do zniszczenia doszło od strony podpory tarczy poprzecznej w chwili wyczerpania nośności przestrzennego układu. Natomiast w II serii badań, gdzie w obydwu przestrzennych układach wyczerpanie nośności nastąpiło od strony wspornika, w przypadku tarczy ze zbrojeniem mieszanym **DB II-0.3 (1)** tylko w jednym z prętów ukośnych naprężenia przekroczyły f_y . Dla tej tarczy wspornikowej obliczeniowa nośność z uwagi na graniczne wyężenie betonu $F_{1,ST(2)}$ jest mniejsza niż nośność obliczona na podstawie granicznego wyężenia stali $F_{1,ST(1)}$ (tab. 5.10). To potwierdza, jak istotny przy projektowaniu tarcz wspornikowych obciążonych wzdłuż wysokości jest dobór odpowiedniego przekroju poprzecznego z uwagi na wyężenie krzyżulca betonowego w stanie granicznym nośności.

W tabeli 5.10 zweryfikowano przyjęte modele obliczeniowe i tarcz wspornikowych z obciążeniem zadany na wysokości z uwagi na graniczne wyężenie stali – model $ST(1)$ i betonu – model $ST(2)$.

Tabela 5.10 Porównanie wielkości granicznych sił otrzymanych na podstawie założonych modeli $ST(1)$ i $ST(2)$ stanu granicznego wyężenia stali i betonu.

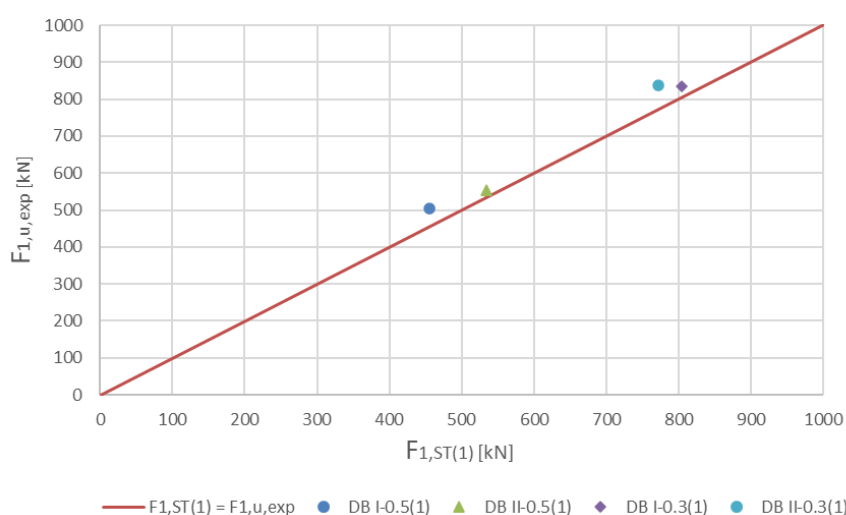
Tarcza	$F_{1,u,exp}$	$F_{1,ST(1)}$	$F_{1,ST(2)}$	$F_{1,ST(1)} / F_{1,ST(2)}$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
DB I-0.5 (1)	504*	455.9*	521.5*	0.87
DB II-0.5 (1)	553*	534.3*	431.6*	1.20
DB I-0.3 (1)	935	804.9	844.6	0.95
DB II-0.3 (1)	930	771.2	721.2	1.07

* wielkość siły niszczącej z badań $F_{1,u,exp}$ przyjęto równoważną wielkość siły dla której został dokonany ostatni odczyt z pomiarów odkształceń ekstensometrem

Na podstawie przeprowadzonej analizy obliczeniowej, można stwierdzić, że nośność tarczy wspornikowej w przyjętych modelach kratownicowych jest zdeterminowana osiągnięciem granicy plastyczności f_y zbrojenia lub granicznych zredukowanych naprężeń ściskających $f_{c,red}$ w krzyżulcu betonowym, zwłaszcza w tarczach silnie zbrojonych, do których należały tarcze ze zbrojeniem ukośnym.

5.3.3 Podsumowanie

Jak wykazały badania własne wsporników tarczowych, najbardziej skuteczne w przenoszeniu obciążenia działającego po wysokości, niezależnie od sposobu ukształtowania zbrojenia są strzemiona poziome (F_{Ast}) rozmieszczone na całej wysokości tarczy. Istotny udział w przekazywaniu siły działającej po wysokości ma również górne zbrojenie poziome (F_{Ah}). To potwierdza konieczność uwzględnienia prętów poziomych przy wymiarowaniu tarcz wspornikowych o smukłości ≤ 0.5 , czego nie obejmowały dotychczasowe zalecenia Leonhardta [1]. Zbrojenie ukośne (F_{Ad}) dla obydwu przypadków analizowanych smukłości tarcz (0.5 i 0.3) przejęło $0.3F_{1,ST}$.



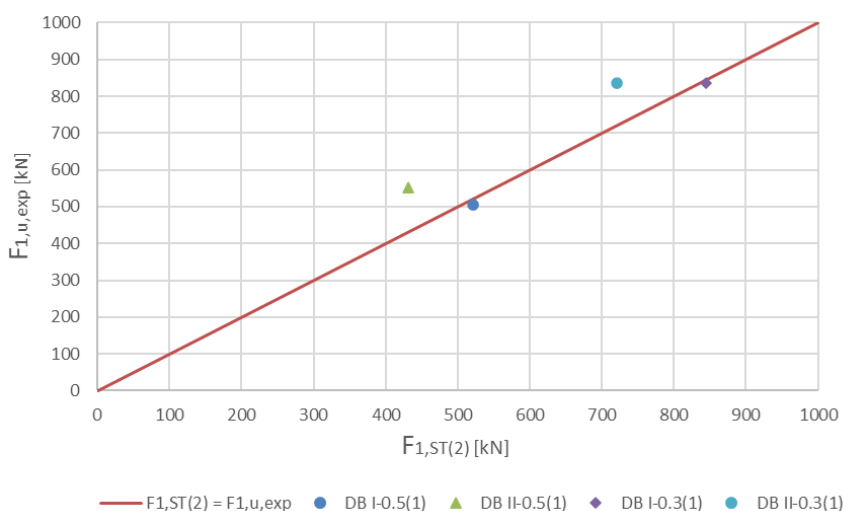
Rys. 5.11 Weryfikacja przyjętych modeli $ST(1)$ z uwagi na stan graniczny wyężenia stali ($F_{1,ST(1)}$) z wynikami badań eksperymentalnych ($F_{1,u,exp}$).

Z powyższych rozważań można stwierdzić, iż zaproponowane własne modele kratownicowe $ST(1)$ tarcz wspornikowych z obciążeniem działającym wzdłuż wysokości, zbrojonych ortogonalnie jak i z dodatkowymi prętami ukośnymi, pozwalają na wyznaczenie obciążenia niszczącego $F_{1,ST(1)}$ z dobrą

dokładnością (rys. 5.11). Dla wszystkich analizowanych tarcz średnia wartość $F_{1,u,exp}/F_{1,ST(1)} = 1.07$, natomiast odchylenie standardowe $\sigma = 0.03$.

Analiza nośności granicznej pokazała również, że do wyczerpania nośności tarcz wspornikowych może dojść z uwagi na stan graniczny wyężenia betonu, który związany jest bezpośrednio ze zredukowaną wytrzymałością betonu ($f_{c,red} = \beta \cdot f_c$) pracującego w złożonym stanie naprężeń. Przy wyznaczaniu granicznego wyężenia betonu istotne zatem było uwzględnienie efektu zmiękczenia z uwagi na istniejące w analizowanym obszarze zarysowanie. Na podstawie własnych wyników eksperymentalnych, a także przy założeniu, że zmiękczenie betonu związane jest nie tylko ze zmniejszeniem wytrzymałości, ale również z obniżeniem jego sztywności, wyznaczono współczynnik β_{exp} . W przypadku badanych tarcz w II serii o smukłości równej 0.3, dla których został osiągnięty stan graniczny nośności przy zniszczeniu układów przestrzennych, współczynnik ten mieścił się w granicach $0.35 \div 0.41$. Zbliżone wartości w obu analizowanych tarczach zostały uzyskane przy obliczeniu współczynnika redukującego β zgodnie z założeniami według Rogowsky'ego i MacGregor'a [51] oraz Schlaich'a i innych [52], natomiast w przypadku tarczy zbrojonej ortogonalnie najbliższy wartości eksperymentalnej był współczynnik β obliczeniowy na podstawie wytycznych projektowych według MC 2010 [N6]. Otrzymana wielkość redukcji wytrzymałości na ściskanie betonu jest spójna z wynikami badań na przecinanie betonu zbrojonego Ulańskiej i Romanowskiej [14] dla których autorki zaproponowały górne ograniczenie naprężeń w betonie na poziomie $0.35f_c$.

Z przedstawionej zależności na rysunku 5.12, wynika że obliczeniowe siły niszczące $F_{1,ST(2)}$ wyznaczone na podstawie założonego schematu zniszczenia i modelu ST(2) z uwagi na beton z dostateczną zgodnością pokrywają się z wartościami eksperymentalnymi $F_{1,u,exp}$. Średnia wartość $F_{1,u,exp}/F_{1,ST(2)} = 1.16$ dla wszystkich tarcz wspornikowych, natomiast odchylenie standardowe wynosiło $\sigma = 0.13$.



Rys. 5.12 Weryfikacja założonego modelu ST(2) z uwagi na stan graniczny wyężenia betonu ($F_{1,ST(2)}$) z wynikami badań eksperymentalnych ($F_{1,u,exp}$).

5.4 Propozycja projektowania

5.4.1 Wyznaczenie zbrojenia

Na podstawie przeprowadzonej analizy granicznego wyężenia zbrojenia bazującej na własnych wynikach eksperymentalnych oraz przyjętych *schematach* $ST(1)$, można wyznaczyć zależności potrzebne do określenia przekroju zbrojenia tarcz wspornikowych z obciążeniem $F_{1,ST(1)}$ działającym po wysokości. Podane zasady projektowania dotyczą tarcz wspornikowych spełniających warunek smukłości $l/H \leq 0.5$.

W zaproponowanych modelach kratownicowych przyjęto następujące założenia:

- kąt nachylenia ściskanych krzyżulców do poziomu: $\theta = 45^\circ$,
 - kąt nachylenia ukośnych prętów do poziomu: $\alpha = 50^\circ$,
 - graniczne naprężenia w stali zbrojeniowej nie przekraczają granicy plastyczności stali: $\sigma_s \leq f_y$,
 - środek ciężkości prętów rozciąganych pokrywa się ze środkiem ciężkości zbrojenia,
 - strzemiona poziome, mające odzwierciedlać pręty rozciągane w założonym modelu, przyjęto z obszaru stanowiącego 90% wysokości tarczy.
- *Tarcze wspornikowe ze zbrojeniem ortogonalnym*

Zbrojenie można wyznaczyć na podstawie modelu $ST(1)$ (rys. 5.13) i następujących zależności:

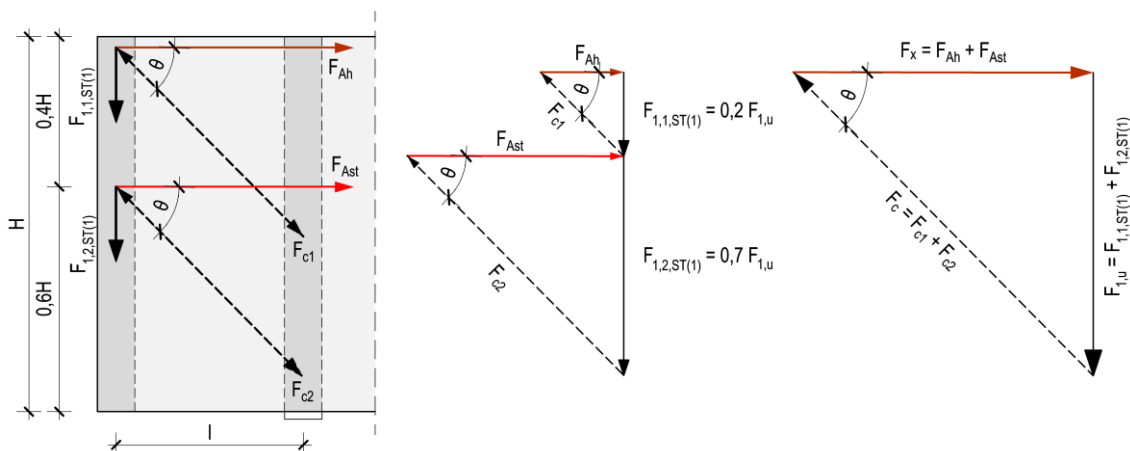
- 1) górne zbrojenie poziome

$$A_h = \frac{F_{1,1,ST(1)} \cdot \cot \theta}{f_y} = \frac{0.2 \cdot F_{1,u} \cdot \cot \theta}{f_y} \quad (5.14)$$

- 2) strzemiona poziome

$$A_{st} = \frac{F_{1,2,ST(1)} \cdot \cot \theta}{f_y} = \frac{0.7 \cdot F_{1,u} \cdot \cot \theta}{f_y} \quad (5.15)$$

Położenie środka ciężkości strzemion poziomych zaleca się przyjmować w odległości $0.4H$ od krawędzi górnej.

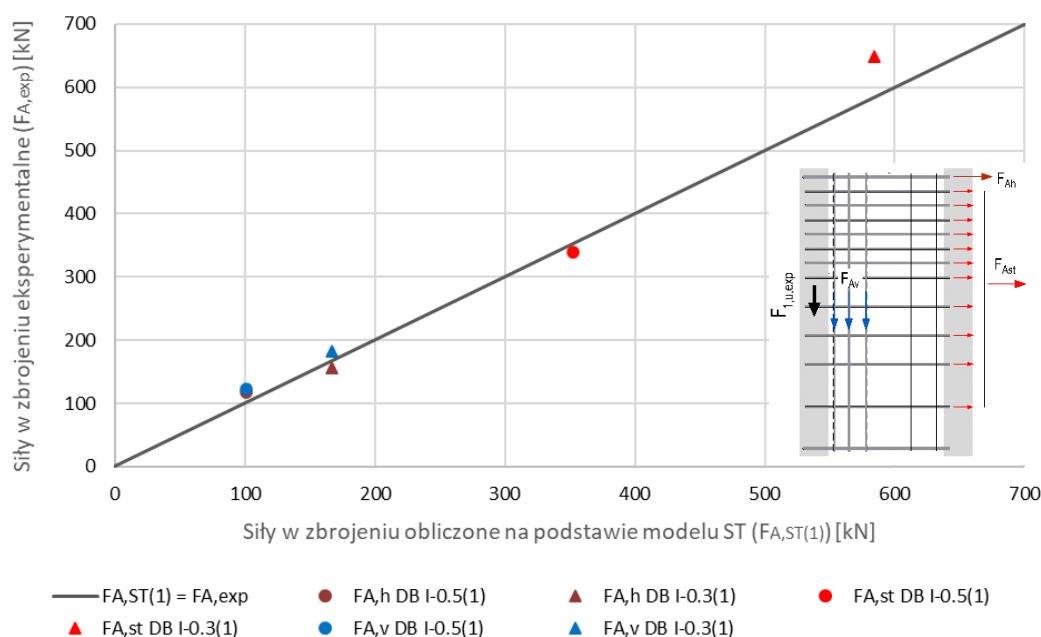


Rys. 5.13 Schemat modelu $ST(1)$ do wyznaczania zbrojenia tarcz wspornikowych zbrojonych ortogonalnie o smukłości $l/H \leq 0.5$.

Dodatkowo we wsporniku tarczowym należy zaprojektować strzemiona pionowe podwieszające zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi na którą przekazywane jest obciążenie:

$$A_v = \frac{0.2 \cdot F_{1,u}}{f_y} \quad (5.16)$$

Na podstawie powyższych zaleceń projektowych wyznaczono obliczeniowe wartości sił $F_{A,ST(1)}$ w poszczególnym zbrojeniu tarcz przy założeniu wielkości siły niszczącej z własnych badań doświadczalnych wsporników tarczowych ortogonalnie zbrojonych DB I-0.5(1) i DB I-0.3(1), $F_{1,u} = F_{1,u,exp}$. Uzyskane wyniki porównano z wartościami eksperymentalnymi sił w zbrojeniu $F_{A,exp}$, jakie otrzymano z pomiarów odkształceń stali i przedstawiono na poniższym rysunku 5.14.



Rys. 5.14 Weryfikacja sił w zbrojeniu obliczonych na podstawie modelu ST(1) ($F_{A,ST(1)}$) dla tarcz wspornikowych ze zbrojeniem ortogonalnym z wartościami eksperymentalnymi ($F_{A,exp}$).

Obliczeniowe wartości sił ($F_{A,ST(1)}$) w górnych przętach poziomych (F_{Ah}), a także strzemionach poziomych (F_{Ast}) i pionowych podwieszających (F_{Av}) z dość dobrą zgodnością pokrywają się z wartościami eksperymentalnymi ($F_{A,exp}$). Z przedstawionych wielkości sił możemy również zauważyć, że w przypadku tarcz wspornikowych ze zbrojeniem ortogonalnym (łatwiejszym w wykonawstwie) wiąże się spora różnica pomiędzy wielkością sił w poziomych strzemionach rozłożonych na wysokości a pozostałymi przętami zbrojeniowymi. To pokazuje z jaką mamy do czynienia redystrybucją sił wewnętrznych w zarysowanych tarczach wspornikowych oraz jak istotne w przejmowaniu obciążenia rozłożonego po wysokości są przęty poziome.

▪ Tarcze wspornikowe ze zbrojeniem mieszanym

Zgodnie z propozycją przyjęcia modelu ST(1) (rys. 5.15) dla tarcz wspornikowych z przętami ukośnymi, niezbędne zbrojenie można wyznaczyć z przedstawionych niżej zależności:

- 1) górne zbrojenie poziome

$$A_h = \frac{F_{1,1,ST(1)} \cdot \cot \theta}{f_y} = \frac{(0.1 \div 0.2) F_{1,u} \cdot \cot \theta}{f_y} \quad (5.17)$$

gdzie dla tarcz o smukłości:

$l/H \approx 0.5$ zaleca się przyjmować wartość $0.2 F_{1,u}$

$l/H \approx 0.3$ zaleca się przyjmować wartość $0.1 F_{1,u}$

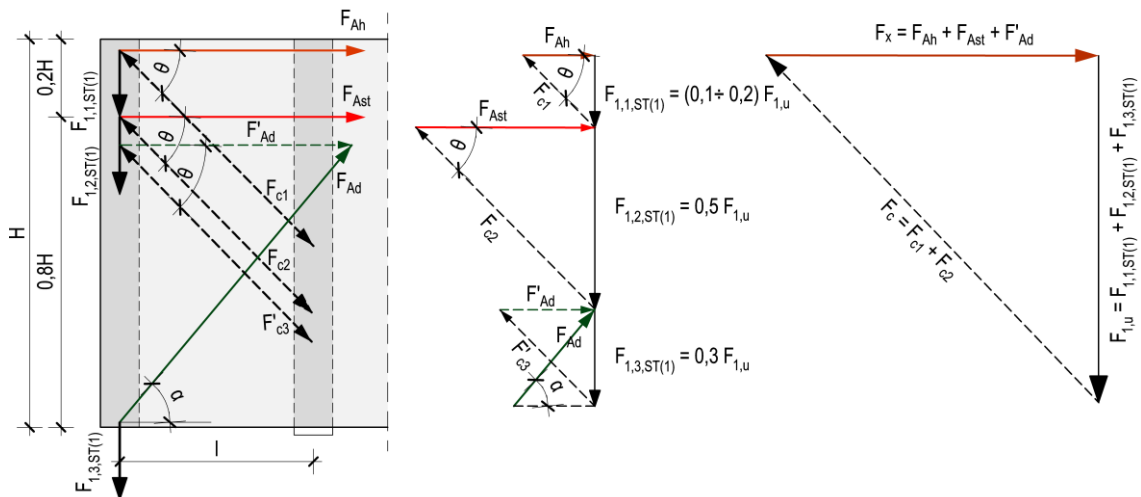
- 2) strzemiona poziome

$$A_{st} = \frac{F_{1,2,ST(1)} \cdot \cot \theta}{f_y} = \frac{0.5 \cdot F_{1,u} \cdot \cot \theta}{f_y} \quad (5.18)$$

Położenie środka ciężkości strzemion poziomych zaleca się przyjmować w odległości $0.4H$ od krawędzi górnej.

- 3) zbrojenie ukośne

$$A_d = \frac{F_{1,3,ST(1)}}{\sin \alpha \cdot f_y} = \frac{0.3 \cdot F_{1,u}}{\sin \alpha \cdot f_y} \quad (5.19)$$

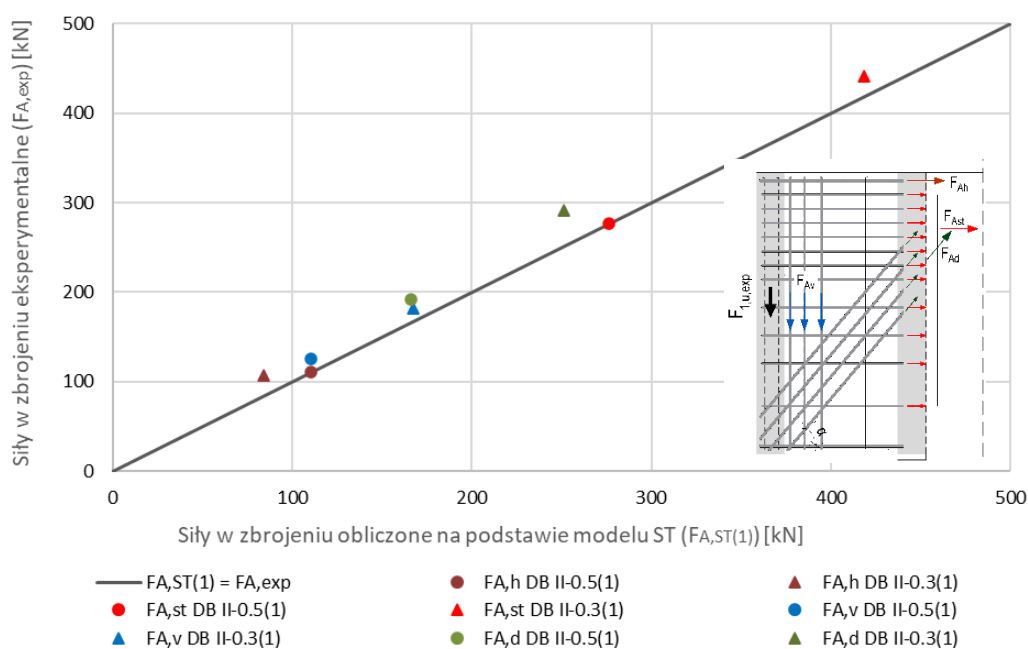


Rys. 5.15 Schemat modelu ST(1) do wyznaczania zbrojenia tarcz wspornikowych ze zbrojeniem ukośnym o smukłości $l/H \leq 0.5$.

Podobnie jak w tarczy zbrojonej ortogonalnie, należy zwymiarować strzemiona pionowe podwieszające zlokalizowane w bliskim sąsiedztwie obciążonej krawędzi, zgodnie ze wzorem 5.16 na siłę równą $0.2 F_{1,u}$.

Bazując na powyższych wytycznych projektowych wyznaczono obliczeniowe wartości sił $F_{A,ST(1)}$ w poszczególnym zbrojeniu badanych tarcz DB I-0.5(1) i DB I-0.3(1) ze zbrojeniem ukośnym przy założeniu $F_{1,u} = F_{1,u,exp}$. Uzyskane wyniki porównano z wartościami eksperymentalnymi sił w zbrojeniu $F_{A,exp}$ i przedstawiono na rysunku 5.16.

Obliczeniowe wartości sił ($F_{A,ST(1)}$) we wszystkich prętach zbrojeniowych są zbliżone do wartości sił eksperymentalnych ($F_{A,exp}$). W przypadku tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości ze zbrojeniem ukośnym również widoczny jest największy udział poziomych strzemion. Ich znaczenie jest jednak zdecydowanie zmniejszone dzięki zastosowaniu ukośnych prętów ukierunkowanych zgodnie z działaniem głównych naprężeń rozciągających. We wspornikach tarczowych obserwujemy zatem korzystny rozdział sił na poszczególne pręty zbrojeniowe.



Rys. 5.16 Weryfikacja sił w zbrojeniu obliczonych na podstawie modelu ST(1) dla tarcz wspornikowych ze zbrojeniem ukośnym ($F_{A,ST(1)}$) z wartościami eksperymentalnymi ($F_{A,exp}$).

5.4.2 Wyznaczenie przekroju betonowego

Opierając się na przeprowadzonej analizie granicznego wyężenia betonu, limitowanej wartością graniczną naprężeń zredukowanych $f_{c,red}$ oraz na mechanizmie zniszczenia podanym na rysunku 5.11 zaproponowano wyznaczenie granicznych wymiarów przekroju poprzecznego tarczy wspornikowej obciążonej na wysokości.

Zgodnie z przyjętym we wzorze (5.12) wyznaczaniem naprężeń ściskających w betonie i dla zadanego obciążenia granicznego $F_{1,u}$, sumaryczną powierzchnią ściskanych krzyżulców na którą przypada siła ściskająca można wyznaczyć ze wzoru:

$$A_c = \frac{F_c}{\sigma_c} = \frac{F_{1,u}}{\sin\theta \cdot \sigma_c} \quad (5.20)$$

Zakładając w granicznym stanie nośności naprężenia $\sigma_c = f_{c,red}$, otrzymujemy zależność:

$$A_c = \frac{F_{1,u}}{\sin\theta \cdot f_{c,red}} \quad (5.21)$$

Na podstawie powyższej zależności oraz zgodnie ze wzorem (5.10) graniczny przekrój tarczy wspornikowej można obliczyć według wzoru:

$$b \cdot d = \frac{F_{1,u}}{\cos\theta \cdot \sin\theta \cdot f_{c,red}} = \frac{F_{1,u}}{\cos\theta \cdot \sin\theta \cdot \beta \cdot f_c} \quad (5.22)$$

gdzie:

θ - kąt nachylenia ściskanych krzyżulców do poziomu, zaleca przyjmować się, $\theta = 45^\circ$,

β - współczynnik zmiękczenia, zaleca przyjmować się z zakresu 0.35 – 0.40

6 WNIOSKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE

Z uwagi na bardzo nieliczne badania tarcz przestrzennych i tarcz wspornikowych, a także wciąż brakujący stan wiedzy w rozpoznaniu zagadnienia zachowania się tych elementów konstrukcyjnych, przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań eksperymentalnych wraz z analizą teoretyczną i propozycją projektowania mogą stanowić istotny element poznawczy zarówno teoretyczny jak i praktyczny.

6.1 Wnioski z przeprowadzonych badań eksperymentalnych

Każdy z badanych przestrzennych układów tarczowych, w tym również analizowane tarcze wspornikowe i poprzeczne niezależnie od sposobu ukształtowania zbrojenia czy smukłości tarczy wspornikowej przeniosły obciążenie projektowe. Zatem ortogonalne zbrojenie, łatwiejsze w wykonawstwie, umożliwiło osiągnięcie projektowanej nośności.

Najbardziej efektywne pod względem zarysowania w tarczach wspornikowych, jak i poprzecznych było zbrojenie ukośne, którego zastosowanie skutkowało zmniejszeniem intensywności zarysowania oraz ograniczeniem szerokości rys.

Eksperymentalne pomiary odkształceń w tarczach wspornikowych obciążonych po wysokości pozwoliły na określenie roli górnego zbrojenia poziomego, jak również poziomych strzemion rozłożonych na wysokości, czego nie obejmowały dotychczasowe zalecenia [1], [2].

6.1.1 Wpływ ukształtowania zbrojenia

Tarcze wspornikowe

W badanych tarczach wspornikowych sposób ukształtowania zbrojenia miał istotne znaczenie na morfologię i szerokość rys. Zaobserwowano, że zbrojenie ukośne pozytywnie wpływa na stan zarysowania tarcz, niezależnie od badanej smukłości, co w bezpośredni sposób przekłada się na trwałość konstrukcji.

Przed wszystkim szerokość rys była zdecydowanie mniejsza niż w przypadku tarczy wspornikowej ze zbrojeniem ortogonalnym, zarówno pod działaniem obciążeń użytkowych jak i w chwili zniszczenia. W przypadku tarcz o smukłości równej 0.3 ze zbrojeniem ortogonalnym, przy obciążeniu użytkowym stanowiącym ok. 60% siły niszczącej maksymalna szerokość wynosiła $w_{l,serw} = 0.40 \text{ mm}$. W tej samej tarczy wspornikowej ale zbrojonej w sposób mieszany (z prętami ukośnymi) szerokość rys została zmniejszona do $w_{l,serw} = 0.17 \text{ mm}$. Pozytywny wpływ zmniejszenia szerokości rys obserwowany był również w tarczach o smukłości 0.5, choć odnotowane szerokości były zdecydowanie mniejsze.

Analizując obrazy zarysowania tarcz z różnym kształtem zbrojenia widoczny był również zróżnicowany charakter rys. W tarczach ze zbrojeniem ukośnym, powstałe rysy były krótsze i przy danym

poziomie obciążenia nie przechodziły najczęściej przez cały wysięg tarczy, co miało miejsce w tarczach zbrojonych ortogonalnie.

Zależny od rodzaju zbrojenia był również rozstaw rys, który kształtował się odmienne w zależności od smukłości badanej tarczy. W tarczach o większym wysięgu ($l/H=0.5$) zbrojenie ukośne skutkowało mniejszymi odległościami pomiędzy pojawiającymi się rysami, natomiast przy mniejszej smukłości ($l/H=0.3$) rys powstało stosunkowo mniej i rozstaw ich w większości przypadków był większy niż w tarczach ze zbrojeniem ortogonalnym.

Tarcze wspornikowe ze zbrojeniem ukośnym wykazywały również mniejszy obszar zarysowania. Rysy objęły swym zasięgiem ok. 0.8 wysokości wspornika (mierząc od górnej krawędzi) w odróżnieniu od badanej tarczy zbrojonej ortogonalnie, w której prawie cały obszar został zarysowany.

Sposób ukształtowania nie wpłynął znacząco na wartość sił rysujących tarcz wspornikowych. Pierwsze rysy powstały przy tym samym bądź zbliżonym poziomie obciążenia.

Dzięki pomiarom *systemu Aramis* możliwy był również do zaobserwowania wpływ zbrojenia ukośnego na rozkład odkształceń betonu i związana z nim zmiana lokalizacji rys o największej szerokości w stanie granicznym nośności tarcz wspornikowych. Badania stanów deformacji za pomocą *techniki DIC* całej powierzchni pozwoliły na zaawansowane analizy z uwagi na możliwość bezstykowego ciągłego pomiaru na wybranym obszarze badanego elementu i uzyskaniu rzeczywistego obrazu wyężenia betonu w stanie granicznym zarysowania i nośności.

Niezależnie od badanej smukłości wspornika tarczowego przy zastosowaniu zbrojenia ukośnego, obszar największych granicznych odkształceń betonu ε_{cu} występował w górnej części wspornika (powyżej zbrojenia ukośnego). Podczas gdy w tarczy ze zbrojeniem ortogonalnym, obszar maksymalnego wyężenia betonu był umiejscowiony w środkowej i dolnej części wspornika, a także charakteryzował się większymi wartościami odkształceń. W tarczach bez zbrojenia ukośnego odnotowano zarówno większe główne odkształcenia rozciągające ε_{ci} jak i ściskające ε_{cs} (niezależnie od smukłości tarczy) co wpłynęło w konsekwencji na wyężenie betonowych krzyżulców.

Zastosowanie zbrojenia ukośnego miało również swoje pozytywne przełożenie na wyężenie poszczególnych rodzajów prętów w stanie granicznym nośności. Najbardziej efektywną redystrybucję odkształceń i naprężeń w zbrojeniu zaobserwowano w tarczach wspornikowych o smukłości 0.3, w których pręty ukośne w znacznym stopniu zmniejszyły graniczne wartości odkształceń stali. W przypadku tarczy ze zbrojeniem ortogonalnym, zarówno w górnych prętach poziomych, jak i strzemionach poziomych rozmieszczonych na wysokości oraz we wszystkich pionowych strzemionach podwieszających doszło do uplastycznienia stali.

Zastosowanie prętów ukośnych i przejście przez nie części obciążenia (ok.30%), pozwoliło na zdecydowane obniżenie granicznych naprężeń w każdym z rodzajów zbrojenia.

Wykazano, że skuteczność działania prętów ukośnych związana jest z ich odpowiednim rozmieszczeniem w obszarze przekazywania obciążenia działającego po wysokości. Niezależnie od badanej smukłości wspornika (0.5 lub 0.3) pręty ukośne, które nie przechodziły poprzez pilaster przekazujący obciążenie po wysokości na wspornik, nie pracowały efektywnie, ich odkształcenia ε_s były znikome.

Pomimo iż zastosowanie zbrojenia ukośnego nie powodowało znaczących zmian w nośności badanych tarcz wspornikowych (zniszczenie z uwagi na beton), istotnie wpływało na stan wyężenia stali i betonu.

Tarcze poprzeczne

W badanych tarczach poprzecznych, swobodnie podpartych z charakterystycznym obciążeniem liniowym w postaci podwieszenia do niej innych tarcz, zastosowanie zbrojenia ukośnego również pozytywnie wpłynęło na stan graniczny zarysowania, opóźniając pojawienie się pierwszej rysy w każdej serii badawczej, jak również ograniczając szerokość powstających rys. Natomiast charakter zarysowania (przeważające ukośne rysy paraboliczne) był zbliżony do tarcz poprzecznych zbrojonych ortogonalnie.

W *I serii badań* nie zaobserwowano istotnych zmian w wartościach odkształceń betonu tarcz poprzecznych zbrojonych w odmienny sposób. W *II serii badań* odnotowano ograniczenie wyężenia ściskanych krzyżulców przy zastosowaniu prętów ukośnych.

Podobnie jak w tarczach wspornikowych, zmiana zastosowanego ukształtowania zbrojenia nie przekładała się na istotne podniesienie nośności.

Podsumowując, przeprowadzone badania doświadczalne jednoznacznie wykazały, iż zastosowanie zbrojenia ukośnego pozytywnie wpływa na ograniczenie szerokości i propagacji rys, zarówno w tarczy wspornikowej, jak i poprzecznej i nie zależy od badanej smukłości tarczy wspornikowej. Ten korzystny efekt ma swoje bezpośrednie przełożenie na trwałość konstrukcji, przez co nie pozostaje bez znaczenia przy projektowaniu.

6.1.2 Wpływ smukłości tarczy wspornikowej

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że wraz ze zmianą smukłości tarczy wspornikowej zmianie ulega morfologia rys oraz nośność.

W tarczach o smukłości $l/H=0.5$ pierwsze powstały rysy prostopadłe w górnym rozciągającym narożu. Z kolei w tarczach o smukłości $l/H=0.3$ do pierwszego zarysowania tarcz doszło w środkowym obszarze wsporników i były to rysy ukośne.

Smukłość tarczy wspornikowej wpływała również na siły rysujące. Zmniejszenie smukłości wspornika skutkowało opóźnieniem w pojawieniu się pierwszego zarysowania.

Przy większej smukłości tarczy, rysy tworzyły się głównie do poziomu obciążenia równego 50% siły niszczącej. Natomiast przy krótszym wsporniku intensywność pojawiania się rys, obserwowana była na każdym poziomie obciążenia. W analizowanych tarczach dla mniejszej smukłości wspornika zaobserwowano również większą wartość siły rysującej, niezależnie od przyjętego ukształtowania zbrojenia.

Wraz ze zmniejszeniem wysięgu wspornika uzyskano również większą siłę niszczącą w stanie granicznym przestrzennego układu tarcz. W tarczach zbrojonych ortogonalnie wzrost nośności wynosił 77%, a w przypadku tarcz wspornikowych ze zbrojeniem ukośnym nośność wzrosła o 57%.

Zmniejszenie smukłości wspornika, niezależnie od przyjętego kształtu zbrojenia spowodowało odmienny rozkład odkształceń prętów poziomych. We wspornikach o smukłości 0.5, największe maksymalne odkształcenia ε_s odnotowano dla poziomych prętów górnych. Natomiast w tarczy wspornikowej układu *DB-0.3* największe odkształcenia zbrojenia poziomego pojawiły się w obszarze środkowym tarczy.

6.2 Wnioski z analizy teoretycznej tarcz wspornikowych

Uzyskane wyniki z własnych badań eksperymentalnych wsporników tarczowych ze zbrojeniem ukośnym umożliwiły weryfikację istniejących zaleceń literaturowych [1], [2] oraz normowych wytycznych obejmujących krótkie wsporniki słupa obciążonych na wysokości [N7]. Analiza porównawcza wykazała odmienny udział zbrojenia w przenoszeniu obciążenia zadanego po wysokości wspornika tarczy.

Otrzymane wyniki doświadczalne dowiodły, że największy udział należał do prętów poziomych, jak również w znacznym stopniu prętów ukośnych. Nie bez znaczenia okazało się również zastosowanie górnych prętów poziomych. Nie potwierdzono zatem zgodności z przyjętymi dla tarcz o smukłości $l/H \approx 1.0$ wytycznymi *Leonhardta* [1], w których największą rolę w przenoszeniu tak zadanego obciążenia przypisano podwieszającemu zbrojeniu pionowemu. Zbieżności wyników nie uzyskano również z późniejszymi zaleceniami *Schrödera* [2], a także z założeniami *PN-B-03264:2002* [N7] dotyczącymi wymiarowania wsporników słupa pod obciążeniem działającym na wysokości. Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji stwierdzono, że konieczna jest propozycja korekty do wytycznych projektowych w zakresie wymiarowania tarcz wspornikowych o smukłości mniejszej niż 1.0, z uwzględnieniem udziału zbrojenia poziomego w przenoszeniu obciążenia rozłożonego po wysokości.

Przeprowadzona analiza rozkładu naprężeń wykazała, że w tarczach wspornikowych obciążonych wzdłuż wysokości, smukłość ścinania l/H w niewielkim stopniu wpływa na zmianę trajektorii naprężeń głównych zarówno w *fazie I*, jak i w *fazie II* kierunki naprężeń są do siebie bardzo zbliżone. Jest to sytuacja odmienna od przypadku obciążenia zadanego na górną krawędź. Przy tak zadanym obciążeniu trajektorie naprężeń głównych znacząco zależą od smukłości tarczy, co wykazano na podstawie analizy sprężystej, jak również zostało potwierdzone badaniami wsporników tarczowych [11], jak i wsporników słupa [60], [44].

Uzyskane z własnych badań eksperymentalnych obrazy zarysowań tarcz wspornikowych i związany z nimi przebieg naprężeń głównych w stanie granicznym nośności pozwoliły stwierdzić, że jest on bliski trajektorii naprężeń w fazie sprężystej, niezależnie od analizowanej smukłości czy sposobu ukształtowania zbrojenia. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i obserwacji zarysowania, które pojawia się już na wstępnym etapie obciążenia istotnym problemem staje się zagadnienie rozpoznania wyężenia betonu w wydzielonym rysami krzyżulcu, pracującym w złożonym stanie naprężeń.

Analizę nośności granicznej tarcz wspornikowych pracujących pod działaniem obciążenia rozłożonego na wysokości przedstawiono z uwagi na stan graniczny wyężenia stali oraz betonu. Podstawą do przyjęcia własnych *modeli ST* były uzyskane na drodze doświadczalnej obrazy zarysowania oraz pomiary odkształceń stali i betonu, które umożliwiły uzyskanie rzeczywistego udziału zbrojenia jak i przebiegu strumieni sił ściskających. Zaproponowane przez autorkę *modele ST(1)* pozwoliły na wyznaczenie nośności z uwagi na stal w przypadku zastosowania zbrojenia ortogonalnego, jak również z prętami ukośnymi. Natomiast z uwagi na beton zaproponowany schemat zniszczenia oraz *model ST(2)*, który uwzględniał zredukowaną wytrzymałość na ściskanie w złożonym stanie naprężeń.

Przeprowadzona *analiza Strut-and-Tie* potwierdziła istotny udział w przekazywaniu siły działającej po wysokości zarówno górnego zbrojenia poziomego, jak i poziomych strzemion rozmieszczonych na wysokości wspornika, niezależnie od badanej smukłości czy zastosowanego kształtu

zbrojenia. Tym samym w proponowanych zaleceniach do wymiarowania wsporników tarczowych o smukłości ≤ 0.5 , potwierdzono konieczność uwzględnienia prętów poziomych, czego nie obejmowały dotychczasowe zalecenia [1], [2]. Zgodność wyników obliczeń na podstawie założonych własnych modeli $ST(1)$ z wynikami badań eksperymentalnych tarcz wspornikowych zbrojonych ortogonalnie i w sposób mieszany była na wysokim poziomie i wyniosła $F_{1,u,exp}/F_{1,ST(1)} = 1.07$.

Analiza nośności granicznej wykazała również, że wyczerpanie nośności tarcz wspornikowych może być także związane ze stanem granicznym wyężenia betonu, w którym należy uwzględnić zjawisko zmiękczenia w zarysowanym polu ściskanim. Redukcję wytrzymałości betonu $f_{c,red}$ w stosunku do jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie f_c , wyznaczono przyjmując współczynnik zmiękczenia β na podstawie własnych pomiarów odkształceń betonu z badań eksperymentalnych jak i również według wybranych pozycji literaturowych i normowych.

Wartość współczynnika β_{exp} , w intensywnie zarysowanym diagonalnie obszarze wspornika, jest stosunkowo niska i w stanie granicznym nośności (tarcze wspornikowe o smukłości 0.3) osiąga wartość z zakresu $0.35 \div 0.41$. Podobne wartości uzyskano w przypadku przyjęcia współczynnika redukującego na podstawie założonych wartości według Rogowsky'iego i MacGregor'a [51] oraz Schlaich'a i innych [52], a także w oparciu o wytyczne projektowe według MC 2010 [N6]. Tak przyjęta zredukowana wytrzymałości betonu na ściskanie $f_{c,red}$ stanowi potwierdzenie wyników badań na przecinanie betonu zbrojonego [14], w których górne ograniczenie naprężeń w betonie przyjęto równe $0.35f_c$. Otrzymane obliczeniowe siły niszczące wyznaczone na podstawie założonego schematu zniszczenia i modelu $ST(2)$ z uwagi na beton, we wszystkich tarczach wspornikowych wykazały dobrą zgodność z wartościami eksperymentalnymi, $F_{1,u,exp}/F_{1,ST(2)} = 1.16$.

Na podstawie przyjętych schematów ST podano propozycję wymiarowania tarcz wspornikowych obciążonych po wysokości z uwzględnieniem warunku ograniczającego minimalne wymiary tarczy wspornikowej z uwagi na zarysowany beton i redukcję wytrzymałości betonu w ściskanim krzyżulcu.

Analizując wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych można stwierdzić, że nie wyczerpały całego zakresu wiedzy na temat pracy tarcz wspornikowych czy przestrzennych układów tarczowych. Z pewnością jednak dostarczyły one sporo cennych informacji, przede wszystkim w zakresie morfologii rys, wyężenia zbrojenia i betonu oraz charakteru zniszczenia.

Podsumowując, pomiary odkształceń betonu i stali, morfologia rys oraz graniczny stan wyężenia umożliwiły poznanie zachowania się tarcz wspornikowych obciążonych wzdłuż wysokości oraz ocenę wpływu ukształtowania zbrojenia w odniesieniu do zmiennej smukłości. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych badań doświadczalnych potwierdzają postawioną w pracy tezę, że *smukłość ścinania i kształt zbrojenia wpływają na zarysowanie i nośność żelbetowego węzła tarczowego*.

6.3 Kierunki dalszych badań i analiz

Zdaniem autorki zagadnienia które wymagają dalszej analizy i rozpoznania to m.in.:

- analiza stanów granicznych nośności poprzecznej tarczy swobodnie podpartej obciążonej liniowo po wysokości wskutek podwieszenia do niej innych tarcz, z wykorzystaniem badań własnych i obcych,
- badania eksperymentalne tarcz wspornikowych z obciążeniem zadanim od dołu przy uwzględnieniu zmiennej smukłości i sposobu ukształtowania zbrojenia,

- model numeryczny żelbetowej tarczy wspornikowej jako elementu przestrzennego układu tarcz z uwzględnieniem wpływu zmiennej smukłości, jak również różnego sposobu zadawanego obciążenia w analizie nieliniowej,
- rozpoznanie efektywności zastosowania betonu lekkiego w tarczach wspornikowych,
- rozpoznanie efektywności zbrojenia niemetalicznego w tarczach wspornikowych ze zmiennym ukształtowaniem zbrojenia,
- dalsze badania dotyczące wpływu w wpływu współczynnika zmiękczenia na redukcję wytrzymałości w ściskany betonowym krzyżulca, w tym z uwzględnieniem zbrojenia.

7 Spis rysunków

Rys. 2.1 Przykładowy rozkład naprężeń σ_x w: a) belce, b) tarczy (belce-ścianie).....	20
Rys. 2.2 Budynki mieszkalne „Horyzont” w Gdańsku [7]: a) widok ogólny na elewację, b) widok wykuszy kilkukondygnacyjnych wspartych na żelbetowych ramach z tarczowymi wspornikami (oznaczenie czerwonymi strzałkami).	22
Rys. 2.3 Zbrojenie żelbetowej ramy z tarczami wspornikowymi, do której został podwieszony 3-kondygnacyjny wykus budyńku Horyzont w Gdańsku [7].	22
Rys. 2.4 Budynek Interaktywnego Centrum Historii Ostrowa Tumskiego ICHOT „Brama Poznania” [8]:.....	23
Rys. 3.1 Geometria oraz schemat podparcia i obciążenia przestrzennego układu tarcz (IWT 1 i IWT 2) [3].	25
Rys. 3.2 Schemat zbrojenia tarczy IWT 1 i IWT 2 [3].	26
Rys. 3.3 Morfologia rys tarczy IWT 1 [3].	26
Rys. 3.4 Morfologia rys tarczy IWT 2 [3].	27
Rys. 3.5 Układ zbrojenia w tarczy wspornikowej obciążonej po wysokości zgodnie z zaleceniami Leonhardta [1]. ..	27
Rys. 3.6 Układ zbrojenia w tarczy poprzecznej w odniesieniu do prętów odgiętych [1].	28
Rys. 3.7 Układ zbrojenia w tarczy wspornikowej obciążonej po wysokości zgodnie z zaleceniami Schrödera [2]. ..	28
Rys. 3.8 Układ zbrojenia w tarczy poprzecznej w odniesieniu do strzemion pionowych [2].	29
Rys. 3.9 Geometria i schemat statyczny badanych tarcz TG-1 i TG-2 [10].	29
Rys. 3.10 Zbrojenie ortogonalne tarcz TG-1 o smukłości ścinania $l_k/H=1.0$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-1/Os, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-1/Of [10].	30
Rys. 3.11 Zbrojenie trajektoriale tarcz TG-1 o smukłości ścinania $l_k/H=1.0$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-1/ts, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-1/tf [10].	31
Rys. 3.12 Zbrojenie ortogonalne tarcz TG-2 o smukłości ścinania $l_k/H=0.5$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-2/Os, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-2/Of [10].	31
Rys. 3.13 Zbrojenie trajektoriale tarcz TG-2 o smukłości ścinania $l_k/H=0.5$ [7]: a) zgodne z naprężeniami według teorii sprężystości TG-2/ts, b) zgodne ze stanem naprężenia po zarysowaniu TG-2/tf [10].	32
Rys. 3.14 Morfologia rys tarcz TG-1 zbrojonych ortogonalnie [7]: a) tarcza TG-1/Os, b) tarcza TG-1/Of [10].	33
Rys. 3.15 Morfologia rys tarcz TG-1 zbrojonych trajektorialnie [7]: a) tarcza TG-1/ts, b) tarcza TG-1/tf [10].	33
Rys. 3.16 Morfologia rys tarcz TG-2 zbrojonych ortogonalnie [7]: a) tarcza TG-2/Os, b) tarcza TG-2/Of [10].	34
Rys. 3.17 Morfologia rys tarcz TG-2 zbrojonych trajektorialnie [7]: a) tarcza TG-2/ts, b) tarcza TG-2/tf [10].	34
Rys. 3.18 Zależność maksymalnej szerokości rys od siły obciążającej dla tarczy wspornikowej o smukłości ścinania $l_k/H=1.0$ TG-1 [10].	35



Rys. 3.19 Zależność maksymalnej szerokości rys od siły obciążającej dla tarczy wspornikowej o smukłości ścinania $l_k/H=0.5$ TG-2 [10].	35
Rys. 3.20 Geometria i schemat statyczny badanych tarcz TSP-1 i TSP-2 [12].	36
Rys. 3.21 Morfologia rys na tle przyjętego zbrojenia tarcz [8]: TSP-1/Os, b) TSP-1/Of [12].	37
Rys. 3.22 Morfologia rys na tle przyjętego zbrojenia tarcz TSP-2/Os [12].	37
Rys. 3.23 Morfologia rys na tle przyjętego zbrojenia tarcz TSP-2/Of [12].	38
Rys. 3.24 Morfologia rys na tle przyjętego zbrojenia tarcz [8]: a) TSP-2/ts, b) TSP-2/tf [12].	38
Rys. 3.25 Stanowisko badawcze [10], (1 in = 2.54 cm, 1 ft = 0.305 m) [14].	39
Rys. 3.26 Schemat zbrojenia tarczy wspornikowej [10], (1 in = 2.54 cm, 1 ft = 0.305 m) [14].	40
Rys. 3.27 Maksymalne odkształcenia główne w betonie tarczy [10]: a) tuż po pojawieniu się ukośnego zarysowania, b) przy 90% obciążenia niszczącego, c) przy zniszczeniu [14].	41
Rys. 3.28 Geometria i schemat statyczny tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej [4].	42
Rys. 3.29 Geometria i schemat statyczny tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi dolnej [4].	42
Rys. 3.30 Geometria i schemat statyczny tarcz dwuprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej [4].	43
Rys. 3.31 Morfologia rys tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej:	44
Rys. 3.32 Morfologia rys tarcz dwuprzęsłowych obciążonych na krawędzi górnej:	45
Rys. 3.33 Morfologia rys tarcz jednoprzęsłowych obciążonych na krawędzi dolnej:	46
Rys. 3.34 Typy zbrojenia i schemat statyczny tarcz swobodnie podpartych i ciągłych [16].	47
Rys. 3.35 Morfologia rys przy zniszczeniu: a) tarcza BM 5 ($\rho_{v,max}$), b) tarcza BM 6 ($\rho_{h,max}$) [16].	48
Rys. 3.36 Geometria i zbrojenie belek-ścian [17], [18], (1 in = 2.54 cm).	49
Rys. 3.37 Definicja stopnia zbrojenia strzemion pionowych i poziomych belek-ścian z zaznaczoną powierzchnią efektywną krzyżulca ściskanego [17].	49
Rys. 3.38 Przykładowe obszary zarysowania i zniszczenie dla wybranych belek ścian $a/d=1.2$ [18].	50
Rys. 3.39 Przykładowe obszary zarysowania i zniszczenie dla wybranych belek ścian $a/d=1.85$ [18].	51
Rys. 3.40 Przykładowe obszary zarysowania i zniszczenie dla wybranych belek ścian $a/d=2.5$ [18].	51
Rys. 3.41 Zależność eksperymentalnej wytrzymałości na ścinanie od wysokości użytecznej badanych belek-ścian [18], (1 in = 2.54 cm).	52
Rys. 3.42 Model dźwigara na stanowisku badawczym, wykonany w skali 1:5.	53
Rys. 3.43 Szczegóły modelu dźwigara żelbetowego [19] (1 in = 2.54 cm).	54
Rys. 3.44 Zbrojenie dodatkowych belek-ścian [19]: a) belki-ściany 1 i 2 (Deep Beam 1,2), b) belka-ściana 3 (Deep Beam 3) (1 in = 2.54 cm).	54
Rys. 3.45 Maksymalne naprężenia tnące w zależności od wytrzymałości betonu na ściskanie [19].	55
Rys. 3.46 Zbrojenie wspornika słupa obciążonego na wysokości [N7].	56
Rys. 4.1 Schemat statyczny badanych układów tarczowych wraz z numeracją tarcz płaskich (wymiar w [cm]).	61



Rys. 4.2 Geometria badanych układów tarczowych DB-0.5 (seria I) z tarczą wspornikową o smukłości $l_1/H = 0.5$ (wymiar w [cm]).	62
Rys. 4.3 Geometria badanych układów tarczowych DB-0.3 (seria II) z tarczą wspornikową o smukłości $l_1/H = 0.3$ (wymiar w [cm]).	63
Rys. 4.4 Zbrojenie przestrzennego układu tarcz DB I-0.5 (wymiar w [cm]).	65
Rys. 4.5 Zbrojenie przestrzennego układu tarcz DB II-0.5 (wymiar w [cm]).	66
Rys. 4.6 Zbrojenie układu tarczowego DB I-0.5.	67
Rys. 4.7 Zbrojenie układu tarczowego DB II-0.5.	67
Rys. 4.8 Zbrojenie przestrzennego układu tarcz DB I-0.3 (wymiar w [cm]).	68
Rys. 4.9 Zbrojenie przestrzennego układu tarcz DB II-0.3 (wymiar w [cm]).	69
Rys. 4.10 Zbrojenie przestrzennego układu tarczowego: a) DB I-0.3, b) DB II-0.3.	70
Rys. 4.11 Zależność naprężenie-odkształcenie betonu wyznaczona dla I serii badań.	71
Rys. 4.12 Zależność naprężenie-odkształcenie betonu wyznaczona dla II serii badań.	71
Rys. 4.13 Schemat stanowiska badawczego dla II serii badań (układ tarcz DB-0.3).	73
Rys. 4.14 Przekrój A-A schematu stanowiska badawczego dla II serii badań (układ tarcz DB-0.3).	74
Rys. 4.15 Widok stanowiska badawczego: a) I seria badań – układ tarcz DB I -0.5, b) II seria badań – układ tarcz DB II-0.3.	75
Rys. 4.16 Przygotowane tensometry na siatce zbrojeniowej z wyprowadzonymi przewodami w układzie tarczowym: a) DB II-0.5, b) DB I-0.3.	76
Rys. 4.17 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB I-0.5.	76
Rys. 4.18 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB II-0.5.	77
Rys. 4.19 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB I-0.3.	77
Rys. 4.20 Lokalizacja tensometrów w układzie tarczowym DB II-0.3.	77
Rys. 4.21 Ekstensometr do pomiaru odkształceń betonu z czujnikiem a) elektronicznym, b) zegarowym.	78
Rys. 4.22 Lokalizacja reperów do pomiaru odkształceń betonu dla tarcz układu DB-0.5 (I seria badań).	78
Rys. 4.23 Lokalizacja reperów do pomiaru odkształceń betonu dla tarcz układu DB-0.3 (II seria badań).	79
Rys. 4.24 Widok oznaczonej powierzchni badawczej tarczy DB I- 0.3 z naniesionym wzorem i przygotowanej do wykonania pomiaru odkształceń systemem Aramis.	79
Rys. 4.25 Widok wzorca kalibracyjnego oraz głowicy pomiarowej 3D (układ dwóch kamer).	80
Rys. 4.26 Rozmieszczenie czujników indukcyjnych dla tarcz układu DB-0.5 (I seria).	81
Rys. 4.27 Mikroskop optyczny i pomiar szerokości rys podczas badań.	81
Rys. 4.28 Przygotowany węzeł tarczowy DB I-0.3 do badań.	82
Rys. 4.29 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	83
Rys. 4.30 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	84
Rys. 4.31 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy poprzecznej układu DB I-0.5.	84



Rys. 4.32 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej układu DB I-0.5.	85
Rys. 4.33 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.	85
Rys. 4.34 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.	86
Rys. 4.35 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy poprzecznej układu DB II-0.5.	87
Rys. 4.36 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy wspornikowej układu DB I-0.3.	87
Rys. 4.37 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB I-0.3.	88
Rys. 4.38 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego tarczy poprzecznej układu DB I-0.3.	89
Rys. 4.39 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej układu DB I-0.3.	89
Rys. 4.40 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy wspornikowej układu DB II-0.3.	90
Rys. 4.41 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy wspornikowej układu DB II-0.3.	90
Rys. 4.42 Odkształcenia stali zbrojenia pionowego i ukośnego tarczy poprzecznej układu DB II-0.3.	91
Rys. 4.43 Odkształcenia stali zbrojenia poziomego tarczy poprzecznej układu DB II-0.3.	91
Rys. 4.44 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 1-4) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	94
Rys. 4.45 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 5-8) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	94
Rys. 4.46 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 9-12) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	95
Rys. 4.47 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 13-16) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	95
Rys. 4.48 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 1-4) tarczy wspornikowej układu DB I-0.5.	95
Rys. 4.49 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 5-8) tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.	96
Rys. 4.50 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 9-12) tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.	96
Rys. 4.51 Odkształcenia betonu na kierunku ściskanego krzyżulca (nr bazy 13-16) tarczy wspornikowej układu DB II-0.5.	96
Rys. 4.52 Odkształcenia ε_c ściskanych betonowych krzyżulców w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.	98
Rys. 4.53 Odkształcenia ε_c ściskanych betonowych krzyżulców w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.	98
Rys. 4.54 Średnie odkształcenia główne ε_1 (z uwzględnieniem zarysowania) z całego obszaru tarczy wspornikowej w fazie zniszczenia: a) DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie , b) DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.	99



Rys. 4.55 Średnie odkształcenia główne ε_2 tarczy wspornikowej: a) DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie, b) DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	100
Rys. 4.56 Lokalizacja punktów pomiarowych dla tarcz układu DB-0.5 (I seria badań).....	102
Rys. 4.57 Przemieszczenia pionowe dolnej krawędzi tarcz układów DB I-0.5 i DB II-0.5.	102
Rys. 4.58 Lokalizacja punktów pomiarowych dla tarcz układu DB-0.3 (II seria badań).	103
Rys. 4.59 Przemieszczenia pionowe dolnej krawędzi tarcz układów DB I-0.3 i DB II-0.3.	104
Rys. 4.60 Przemieszczenia pionowe u_1 dolnej krawędzi tarcz wspornikowych o smukłości 0.5 i 0.3 w odniesieniu do siły niszczącej $F_{1,u}$: a) zbrojonych ortogonalnie, b) zbrojonych ortogonalnie z prętami ukośnymi.	105
Rys. 4.61 Przemieszczenia pionowe u_3 dolnej krawędzi tarcz poprzecznych w I i II serii badań: a) zbrojonych ortogonalnie, b) zbrojonych ortogonalnie z prętami ukośnymi.	105
Rys. 4.62 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB I-0.5 w stanie nośności granicznej.	108
Rys. 4.63 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB II-0.5 w stanie nośności granicznej.	108
Rys. 4.64 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB I-0.5.	109
Rys. 4.65 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB II-0.5.	109
Rys. 4.66 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB I-0.3 w stanie nośności granicznej.	111
Rys. 4.67 Obraz zarysowania przestrzennego węzła tarczowego DB II-0.3 w stanie nośności granicznej.	111
Rys. 4.68 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB I-0.3.	112
Rys. 4.69 Obraz zarysowania tarcz w zależności od poziomu obciążenia F w układzie DB II-0.3.	112
Rys. 4.70 Układ tarczowy DB I-0.5 po zniszczeniu: a) obszar połączenia tarczy wspornikowej i podłużnej z tarczą poprzeczną, b) obszar podporowy tarczy poprzecznej	114
Rys. 4.71 Układ tarczowy DB II-0.5 po zniszczeniu: a) obszar połączenia tarczy wspornikowej i podłużnej z tarczą poprzeczną, b) obszar podporowy tarczy poprzecznej.	114
Rys. 4.72 Przestrzenny układ tarczowy DB I-0.3 po zniszczeniu: a) widok od strony frontowej – obszar przekazywania obciążenia na tarczę wspornikową, b) widok od strony powierzchni tarczy wspornikowej i podłużnej	115
Rys. 4.73 Przestrzenny układ tarczowy DB II-0.3 po zniszczeniu: a) widok od strony frontowej – obszar przekazywania obciążenia na tarczę wspornikową, b) widok od strony powierzchni tarczy wspornikowej i podłużnej	115
Rys. 4.74 Porównanie obrazu zarysowania tarczy wspornikowej (1) układu DB I-0.5 i DB II-0.5.	118
Rys. 4.75 Szerokość rys w tarczy wspornikowej: a) DB I-0.5 (1) zbrojonej ortogonalnie i b) DB II-0.5 (1) zbrojonej w sposób mieszany.	119
Rys. 4.76 Porównanie obrazu zarysowania tarcz poprzecznych (3) układu DB I-0.5 i DB II-0.5.	120
Rys. 4.77 Szerokość rys w tarczy poprzecznej: a) DB I-0.5 (3) zbrojonej ortogonalnie i b) DB II-0.5 (3) zbrojonej w sposób mieszany.	121
Rys. 4.78 Porównanie obrazu zarysowania w tarczy wspornikowej (1) układu DB I-0.3 i DB II-0.3.	122



Rys. 4.79 Szerokość rysy $w_{1,1}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	123
Rys. 4.80 Szerokość rysy $w_{1,2}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	123
Rys. 4.81 Szerokość rysy $w_{1,3}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.	123
Rys. 4.82 Szerokość rysy $w_{1,4}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	124
Rys. 4.83 Szerokość rysy $w_{1,5}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	124
Rys. 4.84 Szerokość rysy $w_{1,6}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	124
Rys. 4.85 Szerokość rysy $w_{1,7}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	125
Rys. 4.86 Szerokość rysy $w_{1,8}$ w tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) zbrojonej ortogonalnie.....	125
Rys. 4.87 Szerokość rysy $w_{1,1}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	125
Rys. 4.88 Szerokość rysy $w_{1,2}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	126
Rys. 4.89 Szerokość rysy $w_{1,3}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	126
Rys. 4.90 Szerokość rysy $w_{1,4}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	126
Rys. 4.91 Szerokość rysy $w_{1,5}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	127
Rys. 4.92 Szerokość rysy $w_{1,6}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	127
Rys. 4.93 Szerokość rysy $w_{1,6}$ w tarczy wspornikowej DB II-0.3 (1) zbrojonej w sposób mieszany.....	127
Rys. 4.94 Porównanie obrazu zarysowania tarczy poprzecznej (3) układu DB I-0.3 i DB II-0.3.....	128
Rys. 4.95 Szerokość rys w tarczy poprzecznej: a) DB I-0.3 (3) zbrojonej ortogonalnie i b) DB II-0.3 (3) zbrojonej w sposób mieszany.....	129
Rys. 5.1 Oznaczenia sił w prętach zbrojeniowych analizowanej tarczy wspornikowej.....	134
Rys. 5.2 Zbrojenie wspornika słupa obciążonego na wysokości [N7].....	137
Rys. 5.3 Porównanie trajektorii naprężeń głównych w stanie sprężystym w tarczy wspornikowej z obciążeniem rozłożonym po wysokości: a) $l/H = 0.5$, b) $l/H = 0.3$	139
Rys. 5.4 Zarysowanie tarcz wspornikowych w chwili zniszczenia na tle trajektorii naprężeń głównych w stanie sprężystym: a) DB I-0.5 (1), b) DB II-0.5 (1), c) DB I-0.3 (1), d) DB II-0.3 (1).....	140
Rys. 5.5 Schemat modelu ST(1) tarczy wspornikowej DB I-0.5 (1) ze zbrojeniem ortogonalnym.....	142
Rys. 5.6 Schemat modelu ST(1) tarczy wspornikowej DB I-0.3 (1) ze zbrojeniem ortogonalnym.....	142
Rys. 5.7 Schemat modelu ST(1) dla tarczy wspornikowej DB II-0.5(1).....	144
Rys. 5.8 Schemat modelu ST(1) dla tarczy wspornikowej DB II-0.3(1).....	144
Rys. 5.9 Pionowe zbrojenie podwieszające w badanych tarczach wspornikowych: a) zbrojonych ortogonalnie DB I-0.5(1) i DBI-0.3(1), b) zbrojonych w sposób mieszany DB II-0.5(1) i DBII-0.3(1).....	145
Rys. 5.10 Wartości głównych odkształceń rozciągających ε_{ct} z uwzględnieniem zarysowania w tarczy wspornikowej: a) DB I-0.3(1), b) DB II-0.3(2).....	148
Rys. 5.11 Mechanizm niszczenia tarczy wspornikowej (na podstawie modelu wspornika o $a_F/d \leq 0.3$ wg Nagrodzkiej-Godyckiej [40]: a) rozkład sił w betonowych krzyżulcach, b) obliczeniowy model ST(2)....	150



8 Spis tabel

Tabela 3.1 Oznaczenie badanych tarcz [11].....	30
Tabela 4.1 Zestawienie oznaczeń badanych tarcz.....	62
Tabela 4.2 Wytrzymałość betonu na ściskanie.	70
Tabela 4.3 Odkształcalność betonu.....	72
Tabela 4.4 Granica plastyczności f_y stali zbrojeniowej.....	72
Tabela 4.5 Średnie odkształcenia graniczne ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców tarczy wspornikowej dla serii I.	97
Tabela 4.6 Średnie odkształcenia graniczne ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców tarczy poprzecznej dla serii I.	97
Tabela 4.7 Średnie odkształcenia graniczne ε_{cu} na kierunku ściskanych krzyżulców tarczy poprzecznej dla serii II.	101
Tabela 4.8 Siły rysujące i niszczące badane układy tarczowe.	113
Tabela 4.9 Siły niszczące (maksymalne) $F_{i,u}$ tarcze w badanych układach.....	116
Tabela 4.10 Siły rysujące $F_{i,cr}$ tarcze w badanych układach	116
Tabela 4.11 Sprowadzone siły rysujące tarcz wspornikowych w badanych układach	117
Tabela 4.12 Sprowadzone siły rysujące tarcz poprzecznych w badanych układach	117
Tabela 4.13 Szerokości rys w tarczach wspornikowych.....	130
Tabela 4.14 Szerokości rys w tarczach poprzecznych.....	130
Tabela 5.1 Udział zbrojenia pionowego F_{Av} i ukośnego F_{Ad} w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej DB II-0.5 (1) i DB II-0.3 (1) z uwzględnieniem zaleceń [1].	135
Tabela 5.2 Udział zbrojenia pionowego F_{Av} i ukośnego F_{Ad} w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej DB II-0.5 (1) i DB II-0.3 (1) z uwzględnieniem zaleceń [2].	136
Tabela 5.3 Udział zbrojenia w przenoszeniu obciążenia rozłożonego po wysokości wspornika z uwzględnieniem zaleceń [N7].....	137
Tabela 5.4 Wielkości eksperymentalne potrzebne do wyznaczenia granicznych sił w założonych modelach ST....	141
Tabela 5.5 Analiza nośności tarcz wspornikowych zbrojonych ortogonalnie według zaproponowanego modelu ST(1).	143
Tabela 5.6 Analiza nośności tarcz wspornikowych zbrojonych w sposób mieszany według zaproponowanego modelu ST(1).....	145
Tabela 5.7 Udział zbrojenia pionowego F_{Av} w przekazywaniu obciążenia rozłożonego po wysokości tarczy wspornikowej.	146



9 Bibliografia

- NORMY i INSTRUKCJE -

- [N1] AASHTO, LRFD *Bridge Design Specifications and Commentary*, seventh edition, American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, DC, 2014.
- [N2] ACI Standard Code 318-83 *Building code requirements for structural concrete*, American Concrete Institute, 1983.
- [N3] ACI Standard Code 318-14M, *Building code requirements for structural concrete*, American Concrete Institute, 2015.
- [N4] ACI Standard Code 318-19, *Building code requirements for structural concrete*, American Concrete Institute, 2019.
- [N5] CSA A23.3-14, *Design of Concrete Structures*, Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 2014.
- [N6] Model Code 2010 - Final draft, Volume 2, *fib Bulletin No. 66*, 2012.
- [N7] PN-B-03264:2002, *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*, PKN, 2002.
- [N8] PN-EN 1992-1-1:2008, *Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, PKN, 2008.
- [N9] PN-EN 1992-1-1:2008/AC:2011, *Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*. PKN, 2011.
- [N10] PN-EN 206-1:2003: *Beton. Cz.1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, PKN, 2003.
- [N11] PN-EN 206:2014, *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, PKN, 2015.
- [N12] PN-EN 12390-3:2011 *Badanie betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*, PKN, 2011.
- [N13] PN-EN 12390-1:2013 *Badania betonu -- Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form*, PKN, 2013.
- [N14] ARAMIS v6 User Manual, GOM mbH, Mittelweg 7-8 D-38106 Braunschweig.

- PRACE NAUKOWE -

- [1] F. Leonhardt i E. Mönnig, *Vorlesungen über Massivbau, Dritter Teil*, Springer-Verlag, Berlin 1974, s. 175-180.
- [2] K. Schröder, *Berechnung und Konstruktion wandartiger Träger und Kragsscheiben im Stahlbetonbau*, *Bauplanung-Bautechnik*, 36 Jg., Heft 6 Juni 1982, 274 pp.
- [3] F. Leonhardt i R. Walther, *Wandartige Träger*, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, nr 178, 1966.
- [4] T. Godyski-Ćwirko, *Wymiarowanie żelbetowych belek-ścian w fazie II na tle analizy naprężeń, powstawania rys oraz nośności*, *Archiwum Inżynierii Lądowej*, nr 3, 1963.



- [5] K. Nagrodzka-Godycka i P. Piotrkowski, *Experimental Study of Dapped-End Beams Subjected to Inclined Load*. *ACI Struct J*, 2012; 109(1):11-20.
- [6] H. Niedenhoff, *Untersuchungen über das Tragverhalten von Konsolen und kurzen Kragarmen*, Karlsruhe 1961.
- [7] W. Starosolski, *Konstrukcje Żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych, t.4, wydanie I*, PWN 2012 Warszawa.
- [8] T. Godycki-Ćwirko i R. Wojdak, *Problemy konstrukcyjne projektowania i realizacji budynków wysokich na przykładzie trzech wieżowców w Gdańsku*. *Przegląd Budowlany* 4/2007, s. 38-42.
- [9] M. Matoga, *BRAMA POZNANIA - architektura i konstrukcja w symbiozie, cz. I, Builder*, marzec 2017, s. 94-97.
- [10] M. Matoga, *BRAMA POZNANIA - architektura i konstrukcja w symbiozie, cz. II, Builder*, kwiecień 2017, s. 78-82.
- [11] D. Ulańska, *Badania jednoprzęsłowych tarcz ze wspornikami. Badania doświadczalne elementów i konstrukcji betonowych*. Politechnika Łódzka: Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego, Zeszyt 1 (1991), Łódź, s.45-99.
- [12] D. Ulańska, *Stany graniczne użytkowania tarcz wspornikowych w świetle badań eksperymentalnych*, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 8, 1986.
- [13] D. Ulańska i A. Romanowska, *Nośność żelbetowych tarcz przewieszonych ze słupami*. XXXII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Kraków-Krynica, 1986, s.121-126.
- [14] D. Ulańska i A. Romanowska, *Wytrzymałość na przecinanie betonu zbrojonego*.
- [15] R. D. Devine, S. M. Barbachyn, A. P. Thrall, i Y. C. Kurama, *Experimental Evaluation of Deep Beams with High-Strength Concrete and High-Strength Reinforcing Bar*, *ACI Structural Journal*, V. 115, No. 4, July 2018, s.1023-1036.
- [16] T. Godycki-Ćwirko, *Wymiarowanie żelbetowych belek-ścian*, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 2, 1964.
- [17] D. M. Rogowsky, J. G. MacGregor, i S. Y. Ong, *Tests of Reinforced Concrete Deep Beams*, *ACI Journal, Proceedings*, V.83, No.4, July-August 1986, str. 614-623.
- [18] D. B. Birrcher, R. G. Tuchscherer, M. Huizinga, i O. Bayrak, *Minimum Web Reinforcement in Deep Beams*, *ACI Structural Journal*, V.110, No.2, March-April 2013, str.297-306.
- [19] D. B. Birrcher, R. G. Tuchscherer, M. Huizinga, i O. Bayrak, *Depth Effect in Deep Beams*, *ACI Structural Journal*, V.111, No.4, July-August 2014, str. 731-740.
- [20] J. Walraven i N. Lehwalter, *Size Effects in Short Beams Loaded in Shear*, *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 5, September-October, 1994. s. 585-593.
- [21] K. Tan i H. Lu, *Shear Behavior of Large Reinforced Concrete Deep Beams and Code Comparisons*, *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 5, September-October 1999, s. 836-845.
- [22] G. T. Proestos, E. C. Bentz, i M. P. Collins, *Maximum Shear Capacity of Reinforced Concrete Members*, *ACI Structural Journal*, V.115, No.5, September 2018, str. 1463-1474.
- [23] K. N. Smith i A. S. Vantsiotis, *Shear Strength of Deep Beams*, *ACI Journal*, May-June 1982, str. 201-208.



- [24] Yang, K.-H., Chung, H.-S., Lee, E.-T., i Eun, H.-C., *Shear Characteristics of High-Strength Concrete Deep Beams without Shear Reinforcements*, *Engineering Structures*, V. 25, No. 10, 2003, s. 1343-1352.
- [25] Sz. Woliński, *Kryterium wyboru modeli analogii kratownicowej ST w projektowaniu elementów żelbetowych*, *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 9/2012, s. 494-497.
- [26] H. Rüsch, *Stahlbeton – Spannbeton. Band 1. Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren*. Werner Verlag, Düsseldorf 1972.
- [27] K. Nagrodzka-Godycka, A. Knut (Kopańska), i K. Zmuda-Baszczyń, *Experimental tests of reinforced concrete deep-beams*. *Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures, Material Technology and Structural Fire Protection*, Kaiserslautern 2014, s. 115-122.
- [28] K. Nagrodzka-Godycka, A. Knut (Kopańska), i K. Zmuda-Baszczyń, *Experimental and theoretical flow of the forces in deep beams with cantilever*, 10th CCC Congress LIBEREC 2014.
- [29] A. Kopańska i K. Nagrodzka-Godycka, *Force transfer and stress distribution in short cantilever deep beams loaded throughout the depth with a various reinforcement*, *fib Symposium 2019 - Krakow, Poland*.
- [30] T. Balawender, T. Sadowski, i M. Kneć, *Technological Problems And Experimental Investigation Of Hybrid: Clinched – Adhesively Bonded Joint*, *Arch. Metall. Mater.*, vol. 56, no. 2, pp. 438–446, 2011.
- [31] M. Kneć, *Technika cyfrowej korelacji obrazów w analizie deformacji połączeń elementów konstrukcji stosowanych w lotnictwie. Rozprawa Doktorska*, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2015.
- [32] T. Godycki-Ćwirko, *Mechanika Betonu*, Arkady, Warszawa, 1982.
- [33] B. Goszczyńska i J. Tworzewska, *Określenie rysy na potrzeby analizy wyników badania procesu powstawania i rozwoju rys w belkach żelbetowych z zastosowaniem systemu Aramis*. *Przegląd Budowlany*, 85, nr 12, 2014, s.24-29.
- [34] Hwang S.J., Lu W.Y., i Lee H.J., *Shear strength prediction for deep beams*, *ACI Structural Journal*, V.97, No. 3, 2000, pp. 367-376.
- [35] A. B. Matamoros i K. H. Wong, *Design of Simply Supported Deep Beams Using Strut-and-Tie Models*, *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, 2003, s. 704-712.
- [36] J. Park i D. Kuchma, *Strut-and-Tie Model Analysis for Strength Prediction of Deep Beams*, *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 6, 2007, pp.657-666.
- [37] H. Amini Najafian, R. L. Vollum, i L. Fang, *Comparative assessment of finite-element and strut and tie based design methods for deep beams*, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 65, No. 16, 2013, s. 970-986.
- [38] A. Muttoni, M.F. Ruiz, i F. Niketić, *Design versus Assessment of Concrete Structures Using Stress Fields and Strut-and-Tie Models*, *ACI Structural Journal*, Vol. 112, No. 5, 2015, pp. 605-616.
- [39] M.M. Raheem i H.A. Rasheed, *Novel Truss Analogy Model to Predict Full Response of Reinforced Concrete Deep Beams*, *ACI Structural Journal*, V. 119, No. 4, July 2022, pp. 97-108.
- [40] R. K. Leung Su i D. T. Wee Loo, *Revisiting Unreinforced Strut Efficiency Factor*, *ACI Structural Journal*, Vol. 113, No. 2, March-April 2016, s. 301-312.
- [41] K. Nagrodzka-Godycka, *Betonowe wsporniki sprężone*, *Studia z Zakresu Inżynierii nr 95*, PAN KILiW Warszawa 2016.



- [42] A. Kopańska i K. Nagrodzka-Godycka, *The influence of reinforcement on load carrying capacity and cracking of the reinforced concrete deep beam joint*. *Engineering Structures*, V. 107, Jan, 2016, pp. 23-33.
- [43] F.J. Vecchio i M.P. Collins, *The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear*, *ACI Journal*. V. 83, No.2, March-April 1986, s. 219-231.
- [44] K. Nagrodzka-Godycka, *Wsporniki żelbetowe. Badania, teoria, projektowanie*. Monografia nr 21, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2001.
- [45] Sekcja Konstrukcji Betonowych KILiW PAN, *Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2, DWE*, Wrocław, 2006, rozdz. 3.7.
- [46] J. R. Robinson, *L'Armature des Concoles Courtes*. Berlin, Festschrift Franz, Ernst und Sohn Verlag 1969.
- [47] J. R. Robinson, *Élèments, Constructifs Spéciaux du Béton Armé*. Paris: Éditions Eyrolles 1975.
- [48] M. P. Nielsen, M. W. Braestrup, B. F. Jensen, i F. Bach, *Concrete Plasticity, Beam-Shear in Joints, Punching Shear*, Publ. of the Danish Soc. for Struct. Scien. and Eng. T.U. Lyngby, Copenhagen, Denmark, 1978.
- [49] D. M. Rogowsky i J. G. MacGregor, *Shear Strength of Deep Reinforced Concrete Continuous Beams*, *Structural Engineering Report*, V. 110, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, 1983.
- [50] P. Marti, *Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design*, *ACI Journal Proceedings*, V. 82, No. 1, January-February 1985, s. 46-56.
- [51] D. M. Rogowsky i J. G. MacGregor, *Design of Reinforced Concrete Deep Beams*, *Concrete International*, V. 8, No. 8, Aug. 1986, s. 49-58.
- [52] J. Schlaich, K. Schafer, i M. Jennewein, *Toward a Consistent Design of Structural Concrete*, *PCI Journal*, Vol. 32, No. 3, 1987, s. 74-150.
- [53] F. J. Vecchio i M. P. Collins, *Compression Response of Cracked Reinforced Concrete*, *Journal of Structural Engineering ASCE*, V. 119, No. 12, December, 1993, s.3590-3610.
- [54] W. Warwick i S. J. Foster, *Investigation into the Efficiency Factor Used in Nonflexural Member Design*, UNICIV Report No. R-320, Kensington: School of Civil Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1993.
- [55] S. J. Foster i R. I. Gilbert, *The Design of Nonflexural Members with Normal and High-Strength Concretes*, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, January-February 1996, s. 3-10.
- [56] L. X. B. Zhang i T. T. C. Hsu, *Behavior and Analysis of 100MPa Concrete Membrane Elements*, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 124, 1 January, 1998, s. 23-24.
- [57] E. C. Bentz, F. J. Vecchio, i M. P. Collins, *Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements*, *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No.4, July-August, 2006, s.614-624.
- [58] G. Argirova i A. Muttoni, *Verification of Details of Existing Structures with the Elastic-Plastic Stress Field Method*, *Proc of the 9th fib International PhD Symposium in Civ. Engineering*, July 22-25, 2015, Karlsruhe Institute of Technology, KIT Scientific Publishing, Germany, s.153-158.
- [59] K. Nagrodzka-Godycka, *Badania bardzo krótkich wsporników żelbetowych*, *Inżynieria i Budownictwo*, 57, nr 6, 2001, s.349-350.
- [60] K. Nagrodzka-Godycka, *Morfologia rys i nośność graniczna krótkich wsporników żelbetowych*, *Praca doktorska*, Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Poznańskiej, Poznań 1988.



