

inż. Marcin Burdziński

marburdz@gmail.com

inż. Mateusz Kozłowski

mkozlowski06@gmail.com

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, prof. nadzw. PG

PRZEBICIE W POŁĄCZENIACH TYPU PŁYTA-SŁUP – PRZEGLĄD POSZCZEGÓLNYCH RODZAJÓW ZBROJENIA ORAZ METOD WYMIAROWANIA W ŚWIETLE WYBRANYCH NORM PROJEKTOWYCH

PUNCHING SHEAR IN SLAB-COLUMN CONNECTIONS – OVERVIEW OF INDIVIDUAL TYPES OF REINFORCEMENT AND METHODS OF DIMENSIONING IN THE LIGHT OF SELECTED DESIGN STANDARDS

Słowa kluczowe: przebiecie, połączenie typu płyta-słup, zbrojenie na przebiecie, procedury wymiarowania

1. Wprowadzenie

Przebiecie występuje w miejscach, w których lokalnie działająca siła skupiona jest przyłożona do płaskiego elementu konstrukcyjnego (płyta stropowa, płyta/stopa fundamentowa). Zjawisko to zachodzi poprzez działanie naprężeń ścinających, na które składają się siła przebijająca oraz momenty zginające. Jeżeli naprężenia te są większe od nośności na przebiecie przez ścinanie dla płyt bez zbrojenia poprzecznego na rozważanym obwodzie, konieczne jest zastosowanie wzmocnienia powierzchni przysłupowej. W konstrukcjach szkieletowych, w których wykorzystywane są połączenia typu płyta-słup, należy sprawdzić wytrzymałość strefy przysłupowej z uwagi na przebiecie.

Istnieje kilka sposobów zwiększenia nośności połączeń typu płyta-słup na przebiecie od obciążeń grawitacyjnych – np. zwiększenie strefy przypodporowej i jej grubości (tzw. głowice) (wpływa to negatywnie na estetykę oraz na względy praktyczne, dlatego takie zabiegi można stosować np. w halach garażowych), wykorzystanie betonu o wyższej klasie wytrzymałości lub zastosowanie betonu ze zbrojeniem rozproszonym (fibrobeton) i/lub zwiększenie grubości płyty (bardzo kosztowne). Kompromisowym rozwiązaniem, między dwoma wcześniej wymienionymi propozycjami, jest wykorzystanie zbrojenia poprzecznego. Jest to najczęstsza forma wzmocnienia stref przypodporowych na przebiecie. Istnieje szeroka gama rodzajów zbrojenia z uwagi na przebiecie. W niniejszej pracy dokonano przeglądu poszczególnych systemów stosowanych w praktyce. Na skuteczność zwiększenia nośności połączenia w postaci zbrojenia poprzecznego wpływa wiele czynników (m.in. stopień zbrojenia poprzecznego, zakotwienie). W artykule omówiono najistotniejsze składowe wpływające na wytrzymałość połączeń typu płyta-słup z na przebiecie.

W zależności od zastosowanej metody wymiarowania otrzymuje się różne rezultaty dotyczące wytrzymałości i poziomu wyężenia elementu konstrukcyjnego. Przekłada się to bezpośrednio na bezpieczeństwo konstrukcji. Nie inaczej jest w przypadku projektowania z uwagi na przebiecie. W pracy omówiono istotne kwestie dotyczące wymiarowania na przebiecie według Eurokodu 2 (EC2) [1], ACI 318-14 [2], Model Code 2010 (MC2010) [3]. Podano wzory dotyczące nośności, sposoby określania obwodów kontrolnych oraz minimalne i maksymalne odległości poszczególnych obwodów zbrojenia.

W projektowaniu ustrojów nośnych wykorzystujących połączenia typu płyta-słup istotna jest świadomość wpływu rozkładu obciążeń użytkowych na rozważanej płycie, gdyż od tego w dużej mierze zależą wartości ugięć i sił wewnętrznych, które wykorzystywane są do wymiarowania. W pracach [4], [5], [6] został dokładniej omówiony ten problem. Tutaj zostało to jedynie zasygnalizowane.

2. Zbrojenie poprzeczne jako wzmocnienie strefy przypodporowej na przebiecie

Systemy zbrojenia poprzecznego na przebiecie różnią się między sobą efektywnością działania, sposobem i poziomem trudności montażu, ceną. W praktyce każdy rodzaj zbrojenia poprawia wytrzymałość połączenia z uwagi na to zjawisko – z mniejszym bądź większym powodzeniem. Według [7] zbrojenie na przebiecie polepsza także ciągliwość złącza, czyli zdolność do znacznych odkształceń przed osiągnięciem stanu granicznego nośności (SGN), co pozwala na większą redystrybucję sił wewnętrznych. W dalszej części artykułu dokonano przeglądu wybranych rodzajów zbrojenia na przebiecie oraz omówiono czynniki, które wpływają na efektywność zbrojenia poprzecznego w zwiększaniu wytrzymałości połączenia.

2.1. Zbrojenie poprzeczne z uwagi na przebiecie - przegląd

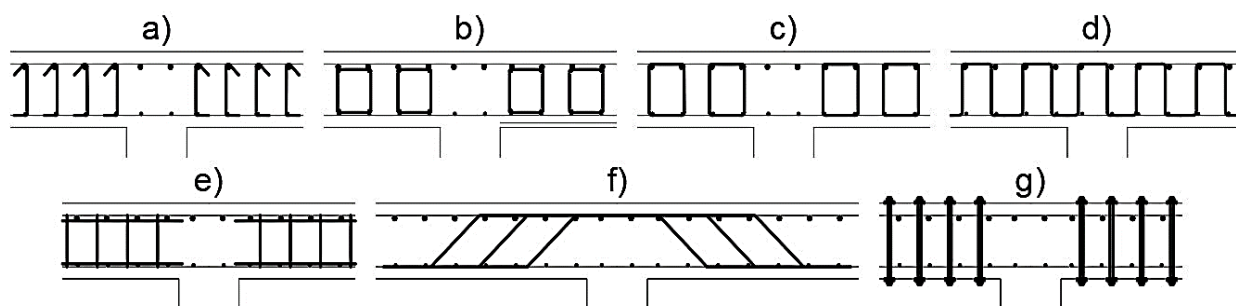
Strzemiona W praktyce można spotkać się ze strzemionami pojedynczymi (Rys.1a), zamkniętymi (Rys.1b,c), wielokrotnymi (Rys.1d). Charakteryzują się one wysoką efektywnością zwiększenia nośności elementu na przebiecie (wg [8] – 1,5-krotnie). Można je montować w elemencie niezależnie od zginanego zbrojenia (Rys.1b) (montaż gotowych wkładek składających się z podłużnych prętów narożnych, do których przywiązane/przyspawane są strzemiona) lub poprzez dowiązywanie strzemion do prętów zbrojenia na zginanie (Rys.1c) (jest to dość pracochłonne i kłopotliwe rozwiązanie, ale skuteczniejsze, jeżeli chodzi o nośność połączenia na przebiecie). Stosowanie tego rodzaju wzmocnień jest stosunkowo tanie, natomiast trzeba pamiętać, że pracochłonność układania przekłada się na wzrost kosztów robocizny.

Drabinki Kształtem przypominają, jak sama nazwa wskazuje, drabinę (Rys.1e). Montowane w formie wkładów między pręty zbrojenia zginanego. Na plac budowy przyjeżdżają już jako elementy gotowe do wbudowania, co znacząco przyspiesza pracę. Ich efektywność jest zadawalająca, a koszty tego systemu zbrojenia poprzecznego są niewielkie.

Pręty odgięte Pręty ukształtowane są tak, aby były mniej więcej prostopadłe do rysy powstałej na skutek przebiecia. (Rys.1f) Dowiązywane są do zbrojenia zginanego płyty. W przypadku konieczności zwiększenia stopnia zbrojenia poprzecznego, stosując ten rodzaj zbrojenia dochodzi do dużego nagromadzenia zbrojenia w przekroju słupa. Stosowanie prętów odgiętych jest tanie, montaż nie jest skomplikowany.

Bolce montowane w gotowych płytach (Rys.1g) Stosowane raczej w formie wzmocnienia płyty na przebiecie, gdy następuje awaria (zarysowanie). Takie rozwiązania są kosztowne. Warto zwrócić uwagę, że aby zamontować bolce trzeba mieć dostęp do górnej i dolnej krawędzi płyty, co nie zawsze jest możliwe.

Poniżej omówiono dokładniej dwa rodzaje zbrojenia na przebiecie, które według autorów tej pracy zasługują na szczególną uwagę.



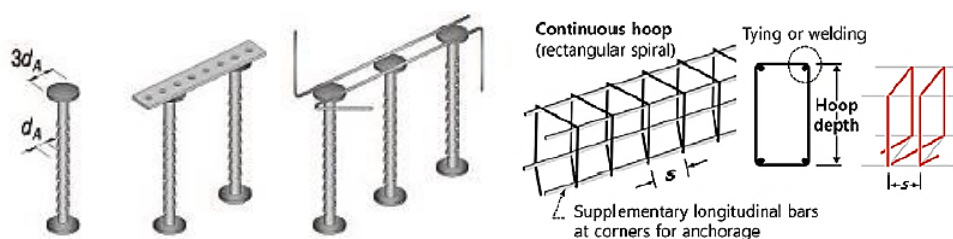
Rys.1. Rodzaje zbrojenia poprzecznego na przebiecie - opis w tekście powyżej [9]

Trzpienie (bolce) dwugłówkowe (Rys.2a) Autorzy zdecydowali się, aby bliżej przyjrzeć się temu systemowi zbrojenia, ponieważ jest on bardzo często wykorzystywany na placach budowy. Tego rodzaju zbrojenie poprzeczne montowane jest głównie od góry, już po ułożeniu zbrojenia głównego. System ten pozwala na łączenie wielu bolców do płaskowników lub listew montażowych, w zależności od rozwiązania stosowanego przez producenta. Bolce przeważnie wykonane są ze stali żebrowanej. Średnica główek (d_A) jest trzy razy większa od średnicy trzpieni (Rys.2a), co znacząco wpływa na zakotwienie zbrojenia i nośność połączenia. W elemencie tworzy się kratownica przestrzenna mogąca przenieść duże obciążenia. Normy ACI 318-14 [2] oraz Model Code 2010 [3] uwzględniają ten rodzaj zbrojenia poprzecznego w procedurze wymiarowania na



przebiecie, zaś EC2 [1] tego nie robi. Na starym kontynencie obowiązują Europejskie Aprobaty Techniczne (ETA), w których przedstawione są niezależne metody wymiarowania na przebiecie w nawiązaniu do EC2 [1] (podobnie było z polską normą PN-B-03264 [10], którą także uzupełniono o Polską Aprobata Techniczną). Istnieją jednak różnice – np. EC2 [1] wymaga, aby płyta miała grubość minimum 20 cm (dla strzemion i prętów odgiętych), zaś wg ETA jest to minimum 18 cm (dla bolców dwugłówkowych), ETA wprowadza podział na podobszary C i D, gdzie w EC2 [1] nie ma o tym mowy. Zbrojenie w postaci trzpieni dwugłówkowych jest bardzo efektywne, gdyż przyjmuje się, że jego zastosowanie skutkuje ok. dwukrotnym wzrostem nośności (wg [8]) połączenia na przebiecie. Jest to jednak rozwiązanie dosyć drogie, ale bardzo wygodne i dlatego cieszy się tak dużą popularnością.

Ciągła obręcz stalowa o wysokiej wytrzymałości Jest to ciekawa alternatywa dla obecnie stosowanych rodzajów wzmocnień, która została przedstawiona w [11]. Obręcz wykonana jest ze stali wysokiej wytrzymałości ($f_y=500\text{MPa}$). Początkowo taka obręcz była wykorzystywana jako zbrojenie poprzeczne belek i słupów. Autorzy [11] postanowili sprawdzić skuteczność ciągłej obręczy jako zbrojenia na przebiecie. Okazało się, że otrzymane rezultaty są zadawalające. Z badań wynika [11], że ciągłe obręcze o wysokiej wytrzymałości pozwalają na większą odkształcalność elementu po jego zarysowaniu w porównaniu do tradycyjnych strzemion przy zachowaniu tego samego stopnia zbrojenia. Istotne jest to, aby zbrojenie było prawidłowo zakotwione. W celu uzyskania lepszej pracy połączenia, umieszcza się je osobno, bez angażowania zbrojenia zginanego płyty (co także przyspiesza wykonanie). Na Rys.2b widać, że obręcz o skoku s jest dowiązana/dospawana do podłużnych, dodatkowych prętów. Wyniki testów pokazały, że obręcze te dobrze sprawdzają się jako zbrojenie na przebiecie płyt i pozwalają na uniknięcie lub zminimalizowanie rozwarstwienia (delaminacji) między zbrojeniem zginanym (więcej o rozwarstwieniu w p. 2.2).



Rys.2a. (po lewej) Trzpienie (bolce) dwugłówkowe [12]

Rys.2b. (po prawej) Ciągła obręcz stalowa o wysokiej wytrzymałości [11]

2.2. Czynniki dotyczące zbrojenia wpływające na wytrzymałość strefy przysłupowej na przebiecie

Odpowiednie zamontowanie zbrojenia oraz zakotwienie jest bardzo ważnym czynnikiem, który znacząco wpływa na nośność połączeń wrażliwych na przebiecie. Według [11] jeżeli zbrojenie na przebiecie zostanie umieszczone bez żadnej ingerencji w zbrojenie zginane płyty, może wystąpić rozwarstwienie (delaminacja) między zbrojeniem na przebiecie i zginaniem, co znacznie pogorszy wytrzymałość połączenia. W pracy [13] zwrócono uwagę na problemy z odpowiednim zakotwieniem zbrojenia montowanego w gotowych płytach (post-installed shear reinforcement). W zaprezentowanym w [13] przykładzie doszło do zniszczenia połączenia spowodowanego przebieciem, chociaż obciążenie próbki badawczej było relatywnie niskie, a zbrojenie poprzeczne nie osiągało swojej nośności. Powodem było nieodpowiednie zakotwienie zamontowanego w gotowej płycie wzmocnienia. Gdyby zakotwienie było poprawne, wytrzymałość połączenia byłaby znacznie większa. Na warunki zakotwienia mają wpływ poprzeczne naprężenia i pęknięcia powodowane zginaniem.

Stopień zbrojenia na przebiecie to kolejny istotny czynnik wpływający na efektywność zbrojenia i wytrzymałość stref przysłupowych z uwagi na przebiecie. Na podstawie wniosków z badań opublikowanych w [11] wynika, że przy małym stopniu zbrojenia na przebiecie połączenie ulega zniszczeniu przez znaczny spadek wytrzymałości betonu spowodowany zarysowaniem – im większe rozwarście rysy, tym większy spadek. W sytuacji zastosowania niskiego stopnia zbrojenia to beton głównie pracuje na przebiecie, a stal zbrojeniowa nie osiąga granicznej wartości odkształcenia. Natomiast w przypadku dużej ilości zbrojenia poprzecznego nośność połączenia wzrasta. W takim przypadku zniszczenie połączenia wynika z uplastycznieniem zbrojenia na przebiecie. W [13] stwierdzono, że po przekroczeniu wartości granicznej stopnia zbrojenia poprzecznego, wytrzymałość na przebiecie jest niezależna, ponieważ jest związana ze zniszczeniem betonu między licem słupa a zbrojeniem poprzecznym.

Na nośność na przebicie połączenia typu płyta-słup wpływa także stopień zbrojenia zginanego. Połączenia, których wytrzymałość zależy głównie od przebicia, charakteryzują się zwykle niewielkimi odkształceniami. Jest to możliwe m.in. dzięki zbrojeniu z uwagi na zginanie płyty. Jeżeli stopień zbrojenia zginanego byłby zbyt niski, to płyta miałaby zdolność do nadmiernych deformacji. W [14] opisano wpływ niskiego stopnia zbrojenia na zginanie płyty na wytrzymałość połączenia na przebicie dla elementów wykonanych z betonów zwykłych oraz wysokiej wytrzymałości (BWW). Okazuje się, że w takim przypadku, w którym występuje przebicie, zniszczenie następuje wcześniej od uplastycznienia się stali zginanej. Zniszczenie to bardzo przypomina zniszczenie od przebicia. Można je jednak odróżnić za pomocą obserwacji rys. Pęknięcia przy uszkodzeniu od zginania mają kształt kołowo-promienisty, zaś rysy od przebicia są zwykle równoległe do krawędzi słupa [14].

Ostatnim omówionym czynnikiem jest wpływ położenia pierwszego obwodu zbrojenia na przebicie. W normach projektowych zawarte są wytyczne dotyczące optymalnej odległości pierwszego obwodu zbrojenia poprzecznego od lica słupa – podaje się minimalną/maksymalną odległość (patrz: p. 3.4). Wg [13] jest to istotne ze względu na fakt, że siła w betonie w strefie wokół kolumny zależy właśnie od odległości ścinanego zbrojenia, a także od jego prawidłowego zakotwienia. W sytuacji, gdy dystans od zbrojenia na przebicie do krawędzi podpory jest niewystarczający, wzmocnienie nie jest efektywne ze względu na niewłaściwy rozwój siły w zbrojeniu przez zbyt małe odkształcenia.

3. Metody wymiarowania na przebicie wg wybranych norm projektowych

W poprzednich częściach artykułu zawarto informacje dotyczące rodzajów zbrojenia poprzecznego z uwagi na przebicie oraz czynniki, które wpływają na skuteczne zwiększenie nośności połączenia słupa i płyty. Sprawdzenie czy zbrojenie na przebicie jest konieczne, a jeżeli tak, to jaka ilość zbrojenia jest potrzebna, wyznacza się z procedur wymiarowania, które są zawarte w normach projektowych. Poszczególne procedury normowe różnią się między sobą, a więc otrzymane rezultaty obliczeń mogą być mniej lub bardziej odmienne. W niniejszej pracy omówiono niektóre wytyczne dot. wymiarowania na przebicie według norm: Eurokod 2 (EC2) [1], ACI 318-14 [2], Model Code 2010 (MC2010) [3].

3.1. Istotne informacje dotyczące wybranych norm

W wybranych normach procedura wymiarowania na przebicie, co do zasady, jest taka sama. Na początku sprawdza się nośność połączenia bez zbrojenia poprzecznego – na przebicie pracuje sam beton. Jeżeli ta nośność nie spełnia oczekiwań, czyli działające naprężenia ścinające w połączeniu są większe od nośności na przebicie samego betonu, należy zastosować zbrojenie z uwagi na przebicie. Różnice pojawiają się w samych wzorach oraz w podejściach do obliczeń. Poniżej przedstawiono istotności dotyczące procedur wymiarowania na przebicie w trzech ww. normach.

Eurokod 2 (EC2) [1] Jest ona najczęściej stosowaną normą projektową w Polsce wykorzystywaną przy projektowaniu konstrukcji z betonu. EC2 [1] uwzględnia wpływ efektywności zbrojenia za pomocą współczynnika k_{max} , który niejako sprowadza wytrzymałość płyty zbrojonej poprzecznie do wielokrotności wytrzymałości płyty bez takiego zbrojenia. Wartość tego współczynnika zależy od rodzaju zastosowanego rodzaju zbrojenia na przebicie. Zalecaną wartością podaną w EC2 [1] jest 1,5, natomiast może być ona wyższa, jeżeli wskazują na to wyniki badań dot. danego rodzaju zbrojenia (np. dla trzpieni dwugłówkowych można przyjąć 1,9 – wg [13]). W EC2 [1] nie uwzględnia się wpływu rodzaju zbrojenia na przebicie. Brak ten jest uzupełniany przez Europejskie Aprobaty Techniczne (ETA). Ponadto EC2 [1] uwzględnia efekt skali w formie współczynnika k , którego maksymalna wartość wynosi 2,0. Współczynnik ten znajduje zastosowanie we wzorze na obliczeniową wytrzymałość betonu na przebicie (wzór (2)) oraz przy obliczaniu ścinania.

ACI 318-14 [2] Amerykańska norma do projektowania konstrukcji betonowych znana i ceniona na całym świecie. Często jest zestawiana i porównywana z innymi normami, co potwierdza niezliczona ilość polskich i zagranicznych publikacji. Wytyczne ACI 318 [2] dotyczące przebicia uwzględniają różne rodzaje zbrojenia poprzecznego – strzemiona, trzpienie dwugłówkowe, stalowe głowice. Norma ta określa także wartość graniczną naprężenia ścinającego w zależności od rodzaju zbrojenia na przebicie. ACI 318 [2] nie uwzględnia w równaniach efektu skali oraz wpływu zbrojenia zginanego przy wyznaczaniu wytrzymałości na przebicie, co zauważono w [14]. Nie wprowadza także maksymalnej wartości wytrzymałości betonu na ściskanie. Natomiast dla przebicia czynnik $\sqrt{f_c} \leq 0,70 \text{ MPa}$ (100 psi). Jeżeli przewidziano zastosowanie zbrojenia poprzecznego na przebicie to wg ACI 318-14 [2] musi ono przenieść co najmniej 50% siły przebijającej.

Model Code 2010 [3] Najbardziej kompleksowa norma dotycząca konstrukcji betonowych, która została wydana przez "The International Federation for Structural Concrete". W przypadku wymiarowania na przebiecie norma ta oparta jest na Teorii Krytycznej Rysy Ścinającej (z ang. Critical Shear Crack Theory (CSCT)) opracowanej przez A. Muttoni'ego. CSCT stwierdza, że wytrzymałość płyty na przebiecie bez zbrojenia poprzecznego jest funkcją rozwarcia krytycznej rysy, która jest proporcjonalna do iloczynu obrotu płyty i efektywnej wysokości płyty [13]. Procedura MC2010 [3] zawiera cztery poziomy przybliżenia wartości kąta obrotu płyty, tj.: pierwszy poziom wykorzystywany jest do wstępnego oszacowania nośności, drugi poziom stosowany jest przy projektowaniu, trzeci lub czwarty poziom znajduje zastosowanie przy ekspertyzach [15]. Pierwotnie teoria ta dotyczyła jedynie samego betonu, ale została rozszerzona przez F. Ruiza i A. Muttoni'ego o zastosowanie tej teorii także dla płyt ze zbrojeniem z uwagi na przebiecie. W MC2010 [3], podobnie jak w ACI 318-14 [2], bierze pod uwagę rodzaj zbrojenia poprzecznego na przebiecie (zamknięte strzemiona, pręty odgięte, trzpienie dwugłówkowe). CSCT uwzględnia również bezpośrednio efekt skali (zmniejszona jednostkowa wytrzymałość na przebiecie w przypadku grubszych płyt). Analogicznie do ACI 318 [2], w MC2010 [3] wymaga się, aby w przypadku zastosowania zbrojenia na ścinanie przenosiło ono minimum 50% siły przebijającej.

3.2. Wyznaczanie nośności połączenia typu płyta-słup z uwagi na przebiecie

Według Eurokodu 2 (EC2) [1]

Obliczeniowa wartość naprężeń ścinających

$$v_{Rd,c} < v_{Ed} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{u_1 \cdot d} \quad (1)$$

gdzie:

- β – współczynnik uwzględniający wpływ momentów zginających w naprężeniach ścinających
- V_{Ed} – obliczeniowa wartość siły przebijającej
- u_1 – podstawowy obwód kontrolny (tj. w odległości 2d od lica słupa)
- $d = 0,5(d_y + d_z)$ – wys. użyteczna przekroju jako średnia arytmetyczna z obu ortogonalnych kier.

Maksymalna wytrzymałość betonu na przebiecie przez ścinanie w płycie stropowej

$$v_{Rd,c} = \max \left\{ \begin{array}{l} C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \\ v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \end{array} \right. \quad (2)$$

gdzie:

- $C_{Rd,c} = C_{Rk,c} / \gamma_c = 0,18 / \gamma_c$ – współczynnik korelacji między wytrzymałością na ścinanie i ściskanie
- $k = 1 + (200/d)^{0,5} \leq 2,0$ – uwzględnienie efektu skali
- $\rho_l = (\rho_{ly} \cdot \rho_{lz})^{0,5} \leq 0,02$ – stopień zbrojenia na zginanie
- f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach
- $k_1 = 0,1$
- $\sigma_{cp} = 0,5(\sigma_{cy} + \sigma_{cz})$ – śred. arytmetyczna z napr. norm. w betonie w przekroju kryt. w kier. y i z
- $v_{min} = 0,035 \cdot k^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5}$

Wytrzymałość połączenia z uwzględnieniem zbrojenia poprzecznego

$$v_{Rd,cs} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \frac{1}{u_1 \cdot d} \cdot \sin \alpha \\ k_{max} \cdot v_{Rd,c} \end{array} \right. \quad (3)$$

gdzie:

- $v_{Rd,c}$ - maksymalna wytrzymałość betonu na przebiecie przez ścinanie
- s_r – promieniowy rozstaw obwodów zbrojenia na ścinanie (przebiecie)
- A_{sw} – pole powierzchni jednego obwodu zbrojenia na ścianie dookoła słupa

$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25 \cdot d \leq f_{ywd}$ – efektywna wytrzymałość obl. zbrojenia na ścianie przy przebieciu
 α – oznacza kąt między zbrojeniem na ścianie i płaszczyzną płyty
 k_{max} – współczynnik uwzględniający efektywność rodzaju zbrojenia (zalecana wart: 1,5)

Maksymalna wytrzymałość na ścinanie przy przebieciu na obwodzie słupa

Spełniona musi być nierówność:

$$v_{Ed} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{u_0 \cdot d} \leq 0,4 \cdot v \cdot f_{cd} = v_{Rd,max} \quad (4)$$

gdzie:

u_0 – obwód słupa

$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ – współczynnik redukcji wytrzymałości betonu zarysowanego przy ścinaniu

f_{cd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach

Jeżeli:

$v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$ – zbrojenie na ścinanie nie jest wymagane

$v_{Ed} > v_{Rd,c}$ i $v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$ – należy zastosować zbrojenie na przebiecie

$v_{Ed} > v_{Rd,max}$ – nie należy projektować zbrojenia na przebiecie – trzeba zwiększyć wysokość płyty

Według ACI-318-14 [2] (dla jednostek układu SI)

Wytrzymałość na przebiecie płyty bez zbrojenia na ścinanie

$$V_c = \min \begin{cases} \frac{1}{12} \cdot \left(2 + \frac{4}{\beta}\right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \\ \frac{1}{12} \cdot \left(2 + \frac{\alpha_s \cdot d}{b_0}\right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \\ \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

β – stosunek dłuższego do krótszego boku słupa

f'_c - wytrzymałość betonu na ściskanie; $\sqrt{f'_c} \leq 0,70 \text{ MPa}$ (100 psi)

d – wysokość użyteczna przekroju

b_0 – długość obwodu kontrolnego, który znajduje się w odległości 0,5d od lica słupa

α_s – współczynnik uwzględniający to, czy słup jest wewnętrzny (40), krawędziowy (30), narożny (20) (w nawiasach podano wartości tego współczynnika dla danego przypadku)

Wytrzymałość połączenia z uwzględnieniem zbrojenia poprzecznego

Wyrażenie ogólne:

$$V_n = V_c + V_s \quad (6)$$

gdzie:

V_c – wytrzymałość betonu płyty na przebiecie

$V_s = (A_v \cdot f_{yt} \cdot d) / s$ – wytrzymałość płyty zbrojonej poprzecznie

A_v – powierzchnia ograniczona obwodem kontrolnym

f_{yt} – granica plastyczności stali zbrojenia na przebiecie

s – odległość obwodu kontrolnego od lica słupa

W zależności od zastosowanego rodzaju zbrojenia na przebiecie należy wykorzystać odpowiednie wzory, które zawarte są w ACI-318-14 [2]. Dla przykładu, poniżej przedstawiono wzory dla strzemion.

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_0 \cdot d \quad (7)$$

$$s \leq 0,5d \quad (8)$$

$$V_n \leq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_0 \cdot d \quad (9)$$

Maksymalna dopuszczalna wartość siły

$$V_{max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b_0 \cdot d \quad (10)$$

Jeżeli:

$V_u \leq V_c$ – zbrojenie na ścinanie nie jest wymagane

$V_u > V_c$ i $V_u \leq V_{max}$ – należy zastosować zbrojenie na przebiecie

$V_u > V_{max}$ – nie należy projektować zbrojenia na przebiecie – trzeba zwiększyć wysokość płyty

gdzie:

V_u – wartość siły przebijającej

Według Model Code 2010 [3]

Udział betonu w nośności płyty na przebiecie

$$V_{Rd,c} = k_\psi \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_0 \cdot d_v = \min \left(\frac{1}{1,5+0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d}; 0,6 \right) \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_0 \cdot d_v \quad (11)$$

gdzie:

k_ψ – empiryczny współczynnik zależny od granicznego kąta obrotu ψ oraz maksymalnej średnicy ziaren kruszywa d_g

f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie

γ_c – częściowy współczynnik bezpieczeństwa

b_0 – obwód kontrolny

d_v – zmniejszona efektywna wysokość płyty

$k_{dg} = \frac{32}{16+d_g} \geq 0,75$ – współczynnik zależny od stosowanego kruszywa

d – efektywna wysokość płyty

ψ – graniczny kąt obrotu płyty (wyznaczony za pomocą jednego z czterech metod przybliżania)

Dla przykładu poniżej podano wzór dla drugiego poziomu przybliżenia kąta obrotu ψ

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5} \quad (12)$$

gdzie:

r_s – odległość zerowania się momentów radialnych od osi podpory

f_{yd} – obliczeniowa wartość granicy plastyczności stali zbrojenia poprzecznego na przebiecie

E_s – moduł sprężystości (Younga) stali zbrojenia poprzecznego na przebiecie

m_{Ed} – jednostkowy moment zginający na jednostkę długości pasma podporowego

m_{Rd} – nośność graniczna płyty na zginanie



Nośność płyty ze zbrojeniem na przebiecie

$$V_{Rd,s} = k_e \cdot \sum A_{sw} \cdot \sigma_{swd} \leq V_{Rd,max} \quad (13)$$

gdzie:

k_e – współczynnik redukcyjny, który uwzględnia wpływ nierównomiernego rozkładu naprężeń stycznych na długości obwodu kontrolnego

$\sum A_{sw}$ – sumaryczne pole przekroju zbrojenia poprzecznego z uwagi na przebiecie, przecinające powierzchnię potencjalnego stożka przebiecia i jest zlokalizowane w strefie odległej o $0,35-1,00d$ od krawędzi podpory

$\sigma_{swd} \leq f_{ywd}$ – naprężenia w zbrojeniu poprzecznym na przebiecie nie większe niż wartość obliczeniowej granicy plastyczności stali tego zbrojenia

$V_{Rd,max}$ – maksymalna nośność na przebiecie, która zależy od efektywności zbrojenia poprzecznego (k_{sys}); jest to wytrzymałość ściskanego betonowego krzyżulca w pobliżu słupa

Ponadto musi być spełniony następujący warunek (patrz: p. 3.1)

$$\sum A_{sw} \geq \frac{0,5 \cdot V_{Ed}}{k_e \cdot f_{ywd}} \quad (14)$$

gdzie:

V_{Ed} – wartość obliczeniowej siły przebijającej

Na całkowitą wytrzymałość płyty na przebiecie składa się wytrzymałość betonu ($V_{Rd,c}$) oraz wpływ zbrojenia poprzecznego na ścinanie ($V_{Rd,s}$) (o ile występuje).

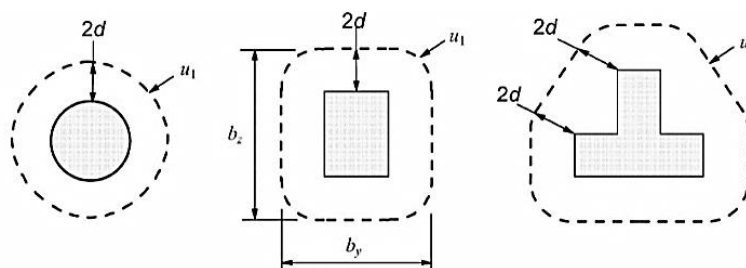
$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \quad (15)$$

3.3. Obwód kontrolny

Obwód kontrolny wyznacza obszar, w którym sprawdza się nośność na przebiecie przez ścinanie elementu. W zależności od procedury wymiarowania, obwody kontrolne znajdują się w różnej odległości od lica słupa. Odległość ta zależy ściśle od kąta pochylenia rysy ukośnej. Poniżej pokazano ogólne zasady określania obwodów kontrolnych wg EC2 [1], ACI 318-14 [2] oraz MC2010 [3].

Według Eurokodu 2 (EC2) [1]

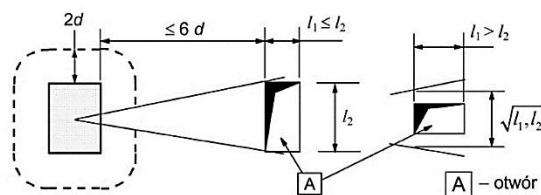
Na Rys.3a pokazano typowe, podstawowe obwody kontrolne (u_1) wokół pól obciążenia. Obwody te znajdują się w odległości $2d$ od lica słupa (wartość kąta pochylenia rysy ukośnej wynosi $26,6^\circ$), gdzie d oznacza efektywną wysokość użyteczną przekroju, która jest średnią arytmetyczną z wysokości użytecznych dla dwóch ortogonalnych kierunków.



Rys.3a. Typowe, podstawowe obwody kontrolne wg EC2 [1]

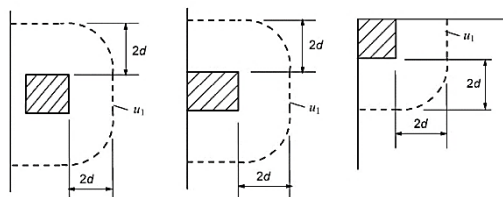
Gdy w pobliżu podpory (słupa) (nie większej niż $6d$) znajduje się otwór, należy zredukować długość obwodu kontrolnego (u_1) wg Rys.3b.





Rys.3b. Wyznaczanie obwodu kontrolnego w pobliżu otworu wg EC2 [1]

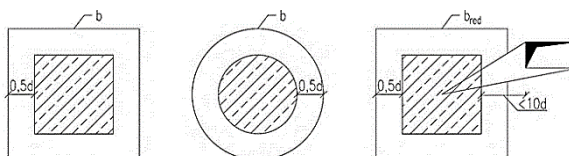
W przypadku słupów krawędziowych i narożnych obwód kontrolny (u_1) wg EC2 [1] także znajduje się w odległości $2d$ od krawędzi podpory. W normie pokazano, jak należy postępować w takiej sytuacji (Rys.3c).



Rys.3c. Obwody kontrolne dla słupów krawędziowych i narożnych wg EC2 [1]

Według ACI 318-14 [2]

W amerykańskiej normie przyjmuje się, że obwód kontrolny (b) znajduje się w odległości $0,5d$ od krawędzi podpory (wartość kąta pochylenia rysy ukośnej wynosi 45°). Na Rys.4 pokazano, jak ACI [2] podchodzi do wyznaczania obwodu kontrolnego (b) i jak uwzględnia otwór w pobliżu słupa.

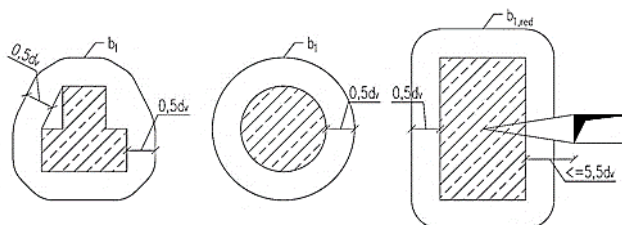


Rys.4. Wyznaczanie obwodów kontrolnych wg ACI 318-14 [9]

Zredukowany obwód kontrolny (b_{red}) stosuje się w sytuacji, gdy otwór znajduje się w odległości nie większej niż dziesięciokrotność wysokości przekroju (h).

Według Model Code 2010 [3]

W MC2010 [3], podobnie jak w ACI 318-14 [2], kąta pochylenia rysy ukośnej wynosi 45° , zatem i odległość obwodu kontrolnego (b_1) wynosi $0,5d_v$, gdzie d_v jest zredukowaną efektywną wysokością efektywną (patrz: wzór (11)). Zasady kształtowania obwodów kontrolnych (b_1) wg Model Code 2010 [3] pokazano na poniższym rysunku (także, gdy w okolicy podpory znajduje się otwór).



Rys.5. Wyznaczanie obwodów kontrolnych wg Model Code 2010 [9]

3.4. Rozmieszczanie pierwszego obwodu zbrojenia poprzecznego na przebiecie

W poniższej tabeli zestawiono minimalne/maksymalne odległość pierwszego obwodu zbrojenia poprzecznego na przebiecie od lica słupa wg norm EC2 [1], ACI 318-14 [2], MC2010 [3] (d – efektywna wysokość przekroju).

Tabela 1. Rozmieszczanie 1. obwodu zbrojenia na przebicie wg EC2 [1], ACI 318-14 [2], MC2010 [3]

	EC2	ACI 318-14	MC2010
Odległość minimalna	0,30d	nie podano	0,35d
Odległość maksymalna	0,50d	0,50d	0,75d

4. Podsumowanie

Połączenia typu płyta-słup są wrażliwe na zjawisko przebicia. Jeżeli nośność na przebicie betonu jest niewystarczająca, należy wzmocnić połączenie. Najczęstszą metodą zwiększenia wytrzymałości na ścinanie jest zastosowanie zbrojenia poprzecznego, które z mniejszym bądź większym powodzeniem zwiększają nośność elementu na przebicie. Powodzenie to zależy przede wszystkim od poprawności zakotwienia, od stopnia zbrojenia na przebicie i zginanie oraz od odległości pierwszego obwodu zbrojenia od krawędzi podpory.

W praktyce inżynierskiej można spotkać szerokie spektrum tego rodzaju wzmocnień. W tej pracy dokonano przeglądu popularnych rozwiązań – strzemiona (pojedyncze, zamknięte, wielokrotne), drabinki, pręty odgięte, bolce montowane w gotowych płytach. Dokładniej omówiono trzpienie (bolce) dwugłówkowe, które są bardzo często stosowane na placach budów, ze względu na wysoką skuteczność wzmocnienia złącza oraz łatwość montażu. Poza tym wciąż trwają badania nad nowymi systemami zbrojenia na przebicie. Przykładem są ciągle obręcze stalowe o wysokiej wytrzymałości, które także zaprezentowano w tym artykule. Propozycja ta jest interesująca ze względu na efektywne podniesienie nośności połączenia oraz prostotę montażu.

W artykule przedstawiono wybrane elementy dotyczące wymiarowania z uwagi na przebicie w normach projektowych EC2 [1], ACI 318-14 [2], Model Code [3]. Pokazano wzory dotyczące wyznaczania nośności elementu na przebicie, a także opisano symbole w nich występujące. Zaprezentowano sposoby definiowania obwodów kontrolnych według wytycznych ww. norm oraz minimalne i maksymalne odległości pierwszego obwodu zbrojenia od lica słupa. Poza tym procedury wymiarowania na przebicie, które zawarto w tych trzech normach, zostały scharakteryzowane - wskazano podobieństwa i różnice. Należy pamiętać, że nie istnieje jednoznaczna odpowiedź, która norma jest najodpowiedniejsza do wyznaczania wytrzymałości na przebicie. Normy projektowe mają charakter ogólny. W szczególnych przypadkach można posłużyć się literaturą, w których analizowane są konkretne przypadki oraz autorskie propozycje wyznaczania nośności z uwagi na przebicie.

5. Bibliografia

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary, American Concrete Institute, 2014.
- [3] Model Code 2010. Final draft. Bulletin 65 FIB, March 2012.
- [4] Starosolski W., „O rozmieszczaniu obciążeń zmiennych w stropach krzyżowo zbrojonych i płytowo-słupowych”, Inżynieria i Budownictwo 4/2008, pp. 177-180.
- [5] Ambroziak A., Grabski M., „Sposoby przykładania obciążenia zmiennego na konstrukcję płytowo-słupową”, Materiały Budowlane 1/2019, pp. 80-82.
- [6] Burdziński M., „Wpływ rozkładu obciążenia użytkowego na siły wewnętrzne i ugięcia w stropie płytowo-słupowym”, VIII Ogólnopolska Konferencja Budowlana Studentów i Doktorantów EUROINŻYNIER, Kraków 2018.
- [7] Urban T., „Diagnostyka i wzmocnianie płyt żelbetowych na przebicie”, Przegląd Budowlany 11/2008, pp. 33-40.
- [8] Lindorf A., „Wymiarowanie płyt na przebicie przy zastosowaniu bolców dwugłówkowych według Europejskich Aprobatach Technicznych”, Przegląd Budowlany 12/2013, pp. 24-32.
- [9] Grafika wykonana przez autorów artykułu

- [10] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [11] Eom T.S., Kang S.M., Park H.G., Choi T.W., “Punching Shear Tests of Slabs with High-Strength Continuous Hoop Reinforcement”, ACI Structural Journal, September 2018, pp. 1295-1311.
- [12] Urban T., Gołdyn M., „Meandry procedur obliczeniowych płaskich stropów żelbetowych na przebiecie”, Przegląd Budowlany 2/2018, pp. 24-31.
- [13] Einpaul J., Brantschen F., Ruiz M.F., Muttoni A., “Performance of Punching Shear Reinforcement under Gravity Loading: Influence of Type and Detailing”, ACI Structural Journal, July-August 2016, pp. 827-846.
- [14] Teng S., Chanthabouala K., Lim D.T.Y., Hidayat R., “Punching Shear Strength of Slabs and Influence of Low Reinforcement Ratio”, ACI Structural Journal, January 2018, pp. 139-150.
- [15] Urban T., Krawczyk Ł., Gołdyn M., „Badanie nośności na przebiecie płyt żelbetowych z różnicą ukształtowanym zbrojeniem poprzecznym”, Budownictwo i Architektura 13(3) 2014, pp. 193-200.