

Mgr inż. **MARCIN BURDZIŃSKI** (ORCID: 0000-0001-5965-4349)
 Dr hab. inż. **MACIEJ NIEDOSTATKIEWICZ, prof. uczelni** (ORCID: 0000-0002-6451-6220)
 Politechnika Gdańska
 Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Analiza numeryczna wpływu długości zakotwienia pręta na zachowanie przyczepności w teście pull-out

Numerical analysis of the effect of bar anchorage length on bond behavior in pull-out test

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono symulacje numeryczne testu pull-out w programie ABAQUS. Symulacje miały na celu ocenienie wpływu długości zakotwienia pręta żebrowanego na przyczepność w tym teście, opierając się na wynikach przeprowadzonych eksperymentów. Interakcję pręta z betonem odwzorowano za pomocą kohezyjnej powierzchni kontaktu, wykorzystując skalibrowane krzywe przyczepność-poślizg, otrzymane z doświadczeń wykonanych w ramach badań własnych. Do zdefiniowania modeli materiałowych użyto parametrów mechanicznych betonu i stali wykorzystanych w testach. Przeprowadzona analiza wykazała, że długość zakotwienia znacząco wpływa na zachowanie przyczepności. Rezultaty symulacji numerycznych charakteryzują się dużą zbieżnością z badaniami laboratoryjnymi, zarówno pod kątem krzywej przyczepność-poślizg, jak i pracy materiałów.

Słowa kluczowe: przyczepność, test pull-out, symulacje MES, długość zakotwienia.

ABSTRACT: This paper presents a numerical simulations of a pull-out test conducted using ABAQUS software. The purpose of the simulations was to evaluate the effect of anchorage length on the bond behavior of ribbed bars in this test, based on the experiments performed. The interaction at the bar-concrete interface was modeled using a contact cohesive surface and calibrated bond-slip curves obtained from experiments. Material models were defined using mechanical parameters obtained from in-house tests on concrete and steel. The analysis shows that the bond behavior is significantly influenced by the anchorage length. Numerical simulation results demonstrate excellent convergence with laboratory tests, both in terms of the bond-slip curve and material behavior.

Keywords: bond, pull-out test, FEM simulation, anchorage length.

Najczęściej przeprowadzanym badaniem przyczepności jest próba bezpośredniego wrywania pręta zbrojenowego z betonu znana szerzej jako test pull-out. Test ten był wykonywany już na początku XX w. [1]. W następnych latach był wykorzystywany przez wielu badaczy przyczepności, takich jak Rehm [2], Goto [3], Tepfers [4] czy Eligehausen [5], co znacząco przyczyniło się do rozwoju wiedzy na temat współpracy pręta z betonem. Obecnie test pull-out jest wciąż chętnie przeprowadzany, jednak nie w kontekście samej mechaniki przyczepności, ale w zakresie wpływu wybranych czynników rzutujących na zachowanie przyczepności. Czynniki te można podzielić na trzy grupy związane:

- z betonem (np. betony nowej generacji),
- ze zbrojeniem (np. pręty niemetaliczne),
- z warunkami wewnętrznymi i zewnętrznymi (np. skrępowanie pręta).

Istotnym czynnikiem wpływającym na przyczepność związanym z warunkami wewnętrznymi i zewnętrznymi jest długość zakotwienia pręta, zwana też długością przyczepności (ang. bond length, l_b). Zwykle test pull-out jest

przeprowadzany na próbkach krótkich [6], w których długość zakotwienia nie przekracza pięciokrotności średnicy wrywanego pręta ($l_b \leq 5d_b$). Niesie to kilka konsekwencji i założeń. Po pierwsze – „lokalna” przyczepność. Oznacza to, że na całej długości styku pręt-beton występuje ten sam etap mechanizmu przyczepności [6]. Po drugie – liniowy rozkład naprężeń w pręcie. Im długość l_b jest mniejsza, tym rozkład naprężeń w pręcie jest bardziej zbliżony do liniowego [7]. Po trzecie – rozkład naprężeń przyczepności. Jest on bezpośrednio związany z rozkładem naprężeń w pręcie. Z warunku równowagi rozciąganego wycinka pręta wynika, że naprężenia przyczepności zależą od średnicy pręta oraz od pochodnej funkcji naprężenia normalnego w pręcie na rozważanym odcinku. Wobec tego, jeżeli przyjmuje się, że naprężenia w pręcie mają przebieg liniowy na długości l_b , to naprężenia przyczepności mają jednakową wartość na całym odcinku przyczepności (to tłumaczy także założenie „lokalnej” przyczepności). Wartość naprężenia przyczepności traktuje się jako siłę wrywającą pręt (F) równomiernie rozłożoną na pobocznicę pręta, co wyraża wzór

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot d_b \cdot l_b} \quad (1)$$

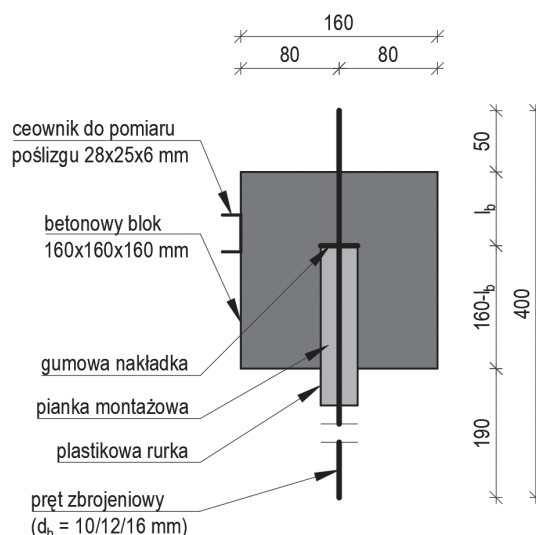
W literaturze można spotkać różne długości przyczepności podane stosunkiem l_b/d_b dla próbek krótkich do testu pull-out: Kucharska i Dybeł [8] oraz Kijania-Kontak i Winnicki [9] 2,5; Deshpande i in. [10] 3,0; norma ISO 10406-1 [11] 4,0; Metelli i Plizzari [12] oraz norma PN-EN 10080 [13] 5,0. Na tej podstawie można stwierdzić, że długość zakotwienia w teście pull-out na próbkach krótkich waha się od 2,5- do 5,0-krotności średnicy wyrwanego pręta. Istnieją także badania, w których stosunek l_b/d_b przyjęto znacznie większy niż 5,0 (np. w [14] wynosił 10,0). Jednak z uwagi na opisane powyżej założenia trudno jest traktować takie próbki jako krótkie.

Warto zwrócić uwagę, że w pracach poświęconych testom pull-out obserwuje się tendencję do przyjmowania wartości długości zakotwienia bez analizy jej wpływu na wyniki badań. Dlatego celem artykułu było przeprowadzenie symulacji numerycznych. Symulacje opierały się na wynikach wcześniejszych badań doświadczalnych, które posłużyły do kalibracji modelu. Ostatecznie uzyskane wyniki zestawiono z rezultatami własnych badań eksperymentalnych [15]. Zaprezentowane w pracy analizy są częścią szerokiego programu badawczego obejmującego doświadczalną i numeryczną analizę przyczepności próbek w różnych skalach obserwacji współpracy pręta zbrojonego i betonu [16, 17]. Jednym z głównych celów wspomnianego programu jest m.in. opracowanie metody wykorzystania rezultatów próby pull-out na próbkach krótkich w praktycznych zastosowaniach inżynierskich, na które wpływa przyczepność, takich jak zarysowanie czy długość zakotwienia.

Szczegóły analizy numerycznej

W ramach analizy numerycznej przeprowadzono sześć symulacji dla trzech średnic żebrowanych prętów – 10, 12 i 16 mm oraz dla dwóch długości przyczepności wyrażonych stosunkiem l_b/d_b równych 2,5 i 5,0. Symulacje stanowiły odzwierciedlenie eksperymentów opisanych w pracy [15]. Zastosowano w nich próbki składające się z pręta zbrojonego zakotwionego w centralnej części betonowego sześciennego bloku. Dobór wymiarów bloku był wzorowany na zapisach normy PN-EN 10080 [13] w zakresie procedury przeprowadzania testu pull-out. Według normy [13] dla zastosowanych w doświadczeniach średnic prętów bok sześciennego bloku powinien mieć długość będącą 10-krotnością średnicy wyrwanego pręta, lecz nie mniejszą niż 200 mm. W eksperymentach nie uwzględniono tego drugiego wymagania i zdecydowano się zastosować blok o boku długości 160 mm, co odpowiada 10-krotności największej wykorzystanej średnicy pręta. Zabieg ten miał na celu uzyskanie dwóch podstawowych typów zniszczenia przyczepności, czyli wyrwania pręta i rozłupania betonu. Schematyczny rysunek próbki z opisem pokazano na rys. 1, podstawowe zaś informacje dotyczące elementów badawczych zebrano w tabl. 1.

Analizę numeryczną przeprowadzono w programie ABAQUS, opartym na metodzie elementów skończonych. Do symulacji użyto solveru Standard. Dla betonu zasto-



Rys. 1. Schematyczny rysunek próbki

Tablica 1. Podstawowe informacje dotyczące próbek

Nazwa serii	Długość zakotwienia l_b [mm]	Średnica pręta d_b [mm]	Stosunek l_b/d_b	Stosunek c/d_b
C-10-2.5	25	10	2,5	7,5
C-10-5.0	50	10	5,0	7,5
C-12-2.5	30	12	2,5	6,2
C-12-5.0	60	12	5,0	6,2
C-16-2.5	40	16	2,5	4,5
C-16-5.0	80	16	5,0	4,5

sowano model betonu plastycznego ze zniszczeniem (ang. Concrete Damaged Plasticity, CDP). Dla plastyczności przyjęto kąt tarcia wewnętrznego (kąt dylatacji) równy 35° , natomiast dla pozostałych parametrów założono domyślne wartości modelu CDP wg dokumentacji programu ABAQUS, tj.: mimośrodowość powierzchni potencjału plastycznego 0,1, stosunek wytrzymałości betonu w stanie dwuosiowym do wytrzymałości w stanie jednoosiowym f_{bd}/f_{cd} 1,16, parametr K 0,667. W celu poprawienia zbieżności modelu zastosowano parametr wiskotyczny o wartości 0,001. Do zdefiniowania zachowania betonu ściskanego posłużono się krzywą $\sigma-\varepsilon$ podaną w fib Model Code 2010 [18]. Natomiast do określenia zachowania betonu rozciąganego wykorzystano wytrzymałość betonu na rozciąganie oraz energię pęknięcia obliczoną według wzoru podanego również w [18]. Dla stali zastosowano model liniowo-sprężysty, zakładając, że stal podczas badania pull-out nie przekracza granicy plastyczności. Parametry mechaniczne modelu materiałowego betonu i stali uzyskano na podstawie badań własnych [15]. Ich podsumowanie zostało zaprezentowane w tabl. 2 i 3.

Do modelowania przyczepności na styku pręt-beton użyto kohezynnej powierzchni kontaktu (ang. Contact Cohesive Behavior, CCB). Zaletą tej metody jest stosunkowo łatwa definicja poszczególnych etapów mechanizmu przyczepności. Wadą natomiast jest brak możliwości obserwacji interakcji między żebrami pręta a betonem, ponieważ w tego typu symulacjach wykorzystuje się pręt gładki.

Tabela 2. Podsumowanie badań betonu [15]

Nazwa serii	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie f_{ctm} [MPa]	Moduł sprężystości E_{cm} [GPa]	Energia pęknięcia G_F wg [18] [N/mm]
C-10-2.5	41,69	2,77	34,05	0,1429
C-10-5.0	41,50	3,17	30,81	0,1427
C-12-2.5	41,64	3,15	34,84	0,1428
C-12-5.0	40,20	3,38	35,03	0,1419
C-16-2.5	41,25	2,88	33,98	0,1426
C-16-5.0	41,50	2,78	32,01	0,1427

Tabela 3. Podsumowanie badań stali zbrojeniowej [15]

Średnica pręta [mm]	Granica plastyczności f_y [MPa]	Granica wytrzymałości f_u [MPa]	Ciągliwość k	Moduł sprężystości E_s [GPa]
10	469,94	592,89	1,19	206
12	523,22	646,92	1,24	211
16	522,78	641,03	1,23	214

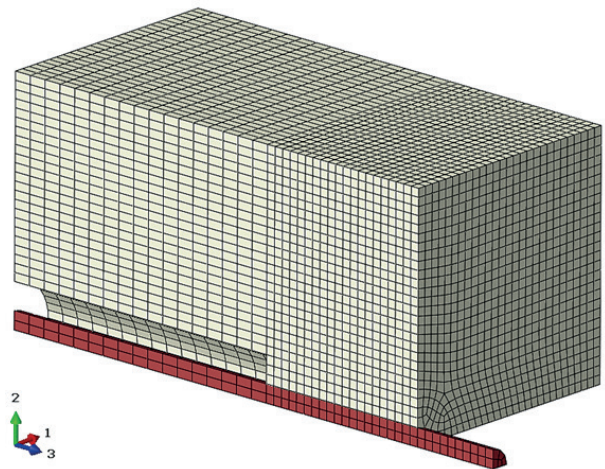
Metoda CCB jest oparta na zależności trakcja-separacja, co w kontekście testu pull-out można traktować jako zależność przyczepność-poślizg. W symulacjach zastosowano interakcję typu powierzchnia do powierzchni (ang. surface-to-surface, StS), wybierając przy tym jako powierzchnię pierwszą (master) pręt oraz powierzchnię drugą (slave) otaczający go beton. W definicji metody CCB przyjęto zachowanie prostopadłe do powierzchni kontaktu typu „twardy kontakt”. Dla zachowania styczności nie uwzględniono tarcia, ponieważ zostało ono wzięte pod uwagę przy określaniu zachowania kohezijnego oraz zniszczenia połączenia. Zachowanie kohezyjne zawiera definicję początkowej sztywności połączenia na kierunku prostopadłym i na obu kierunkach stycznych do powierzchni kontaktu. Przyjęto, że liniowa zależność przyczepność-poślizg występuje do zakresu 20% szczytowego naprężenia przyczepności, co jest nawiązaniem do zakresu działania adhezji i tarcia [19]. Definicja zniszczenia składa się z określenia kryterium inicjacji zniszczenia oraz wartości niezbędnych do spełnienia tego kryterium. W przypadku opisywanych symulacji MES zastosowano kryterium maksymalnego naprężenia nominalnego. To wymaga podania naprężenia normalnego i naprężeń stycznych dla styku pręt-beton (tutaj praktyczne znaczenie miało tylko naprężenie styczne na kierunku wrywania pręta). Ponadto wykorzystano opcję opisu zmian zniszczenia typu przemieszczenie. Degradację początkowej sztywności przyczepności zdefiniowano tabelarycznie, wykorzystując wzór dla naprężenia stycznego:

$$t = (1 - D)t', \quad (2)$$

gdzie: t – naprężenie kontaktowe (naprężenie przyczepności), D – zmienna uszkodzenia; zakres od 0 (brak zniszczenia) do 1 (całkowite zniszczenie), t' – naprężenia kontaktowe przy założeniu liniowej zależności trakcja-separacja (czyli naprężenie przyczepności dla początkowej sztywności przyczepności).

Aby jak najlepiej odzwierciedlić główny wynik testu pull-out, czyli krzywą przyczepność-poślizg, dokonano kalibracji modeli numerycznych pod tym kątem. Kalibracja polegała na iteracyjnym dopasowywaniu zależności $\tau_b(s)$. W iteracji zerowej wykorzystano oryginalną uśrednioną krzywą z eksperymentu. W rezultacie uzyskano nową krzywą z obliczeń MES. Następnie po jej przeanalizowaniu modyfikowano oryginalną krzywą w zakresie szczytowego naprężenia przyczepności oraz poślizgu przed naprężeniem i po tym naprężeniu. Kolejnym krokiem było użycie zmodyfikowanej krzywej przyczepność-poślizg w symulacji MES i ponowne porównanie rezultatu symulacji z oryginalną krzywą. W większości przypadków wystarczyły trzy iteracje, aby uzyskać zadowalającą zbieżność krzywej z numeryki z oryginalną krzywą z badań.

W modelach numerycznych zostały wykorzystane ośmiowęzłowe elementy bryłowe o zredukowanym całkowaniu (C3D8R). Na podstawie przeprowadzonych analiz zbieżności ostatecznie przyjęto wielkość elementów skończonych – dla symulacji z prętem o średnicy 10 mm zastosowano rozmiary 2,5/5 mm, a dla prętów o średnicy 12 i 16 mm rozmiary 3/6 mm. Pierwsza wartość dotyczy bloku i pręta mających ze sobą kontakt, natomiast druga wartość dotyczy pozostałej części modelu. Korzystając z bisymetrii elementu badawczego, wymodelowano 1/4 próbki, co pokazano na rys. 2.

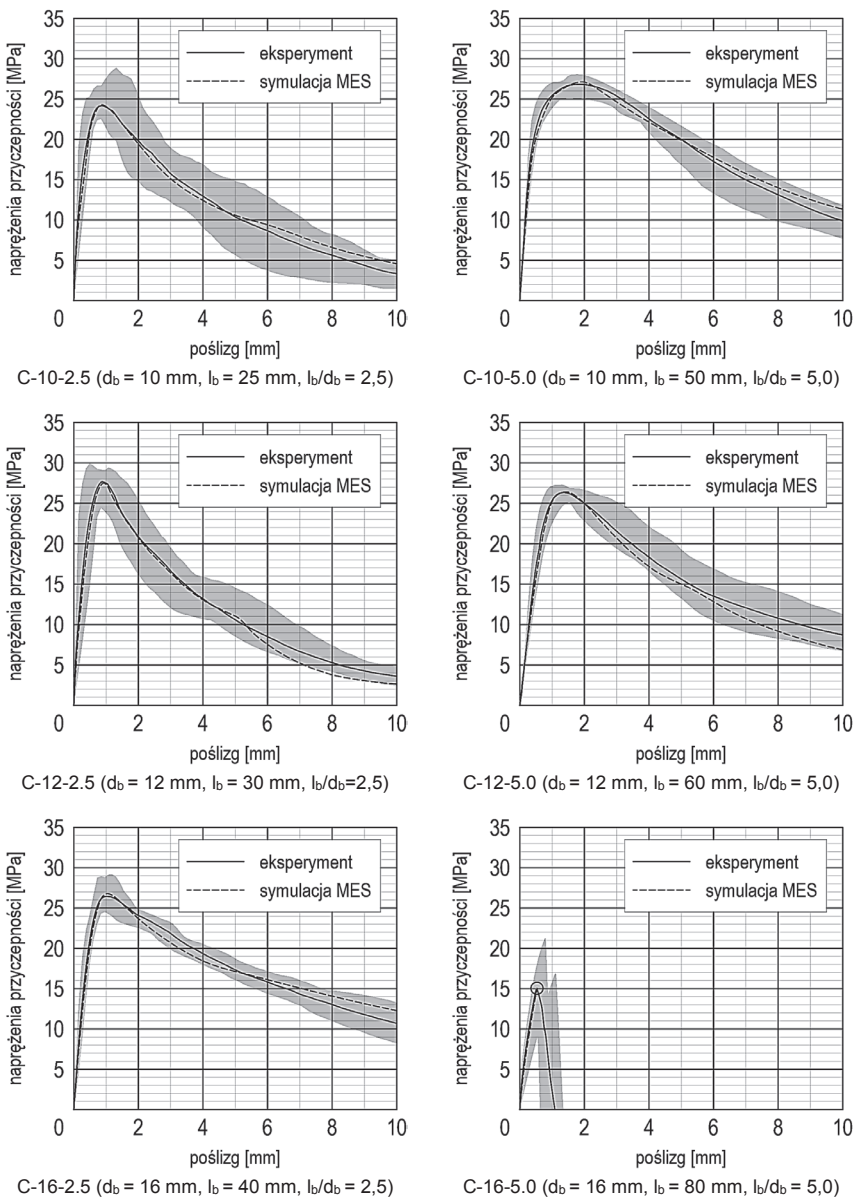


Rys. 2. Widok próbki wykorzystanej w modelu numerycznym

Wyniki i dyskusja

Na rysunku 3 pokazano krzywe przyczepność-poślizg wraz z obwiedniami uzyskanych wyników z eksperymentów [15] oraz krzywe otrzymane z symulacji MES.

Krzywe przyczepność-poślizg z symulacji numerycznych wykazują bardzo dobrą zbieżność z krzywymi z badań eksperymentalnych. Oznacza to prawidłową kalibrację i w konsekwencji dobór parametrów metody CCB modelującej pracę styku pręt-beton. Skutkiem bardzo dobrej zbieżności rezultatów jest również duża zgodność w zakresie szczytowego naprężenia przyczepności $\tau_{b,max}$ oraz odpowiadającego poślizgu s_1 , a także typu zniszczenia przyczepności. W tabelicy 4 zestawiono rezultaty



Rys. 3. Krzywe przyczepność-poślizg z eksperymentów i symulacji MES

eksperymentów [15] oraz przeprowadzonych symulacji numerycznych.

Panuje powszechne przekonanie, że zwiększenie średnicy pręta powoduje zmniejszenie naprężeń przyczepności. W przypadku prętów żebrowanych wysokość żebra relatywnie maleje w stosunku do wzrostu średnicy

długość przyczepności wpływa także na typ zniszczenia wiązania między prętem a betonem w teście pull-out. Jest to dobrze widoczne na mapach głównych naprężeń rozciągających w chwili osiągnięcia szczytowego naprężenia przyczepności, które pokazano na rys. 4. Z map wynika, że na znacznej powierzchni przekroju próbki C-16-5.0

d_b . W efekcie względne pole powierzchni żebra f_R nie rośnie proporcjonalnie względem rozmiaru pręta [20]. Badania Soroushiana i Choi'ego wykazały, że spadek naprężeń τ_b jest liniowy wraz ze wzrostem d_b dla prętów o średnicach z przedziału od 16 do 32 mm [21]. Rezultaty pokazane w tabl. 4 dotyczą średnic 10, 12 oraz 16 mm i nie wykazują podobnej tendencji.

Zgodnie ze wzorem (1) na obliczanie naprężeń przyczepności, wartość τ_b zależy od długości zakotwienia l_b , a dokładniej od pola powierzchni pobocznic pręta zwanej powierzchnią przyczepności A_b . Zwiększenie długości l_b z $2,5d_b$ do $5,0d_b$ oznacza dwukrotne zwiększenie powierzchni A_b . Zaprezentowane w tabl. 5 wyniki przeprowadzonych badań dla serii C-10-2.5 i C-10-5.0 oraz C-12-2.5 i C-12-5.0 pokazują, że wspomniane wydłużenie odcinka l_b skutkuje około dwukrotnym wzrostem maksymalnej siły wrywającej F_{max} uzyskanej w badaniu. Dla serii z próbkami o różnych średnicach także zaobserwowano podobną zależność pomiędzy wzrostem powierzchni A_b i wzrostem siły F_{max} . Wobec tego szczytowe naprężenia przyczepności pozostają na porównywalnym poziomie niezależnie od długości l_b . Przytoczona wcześniej norma [13], zawierająca procedurę przeprowadzania testu pull-out, dzieli średnice prętów na cztery grupy i podaje reprezentatywną średnicę. Takie podejście sugeruje, że zachowanie przyczepności w teście pull-out dla reprezentatywnej średnicy będzie takie samo dla pozostałych średnic z danej grupy. Potwierdzeniem tego są wartości szczytowych naprężeń przyczepności otrzymanych z badań.

Otrzymane z eksperymentów rezultaty dla serii C-16-2.5 i C-16-5.0 wskazują, że

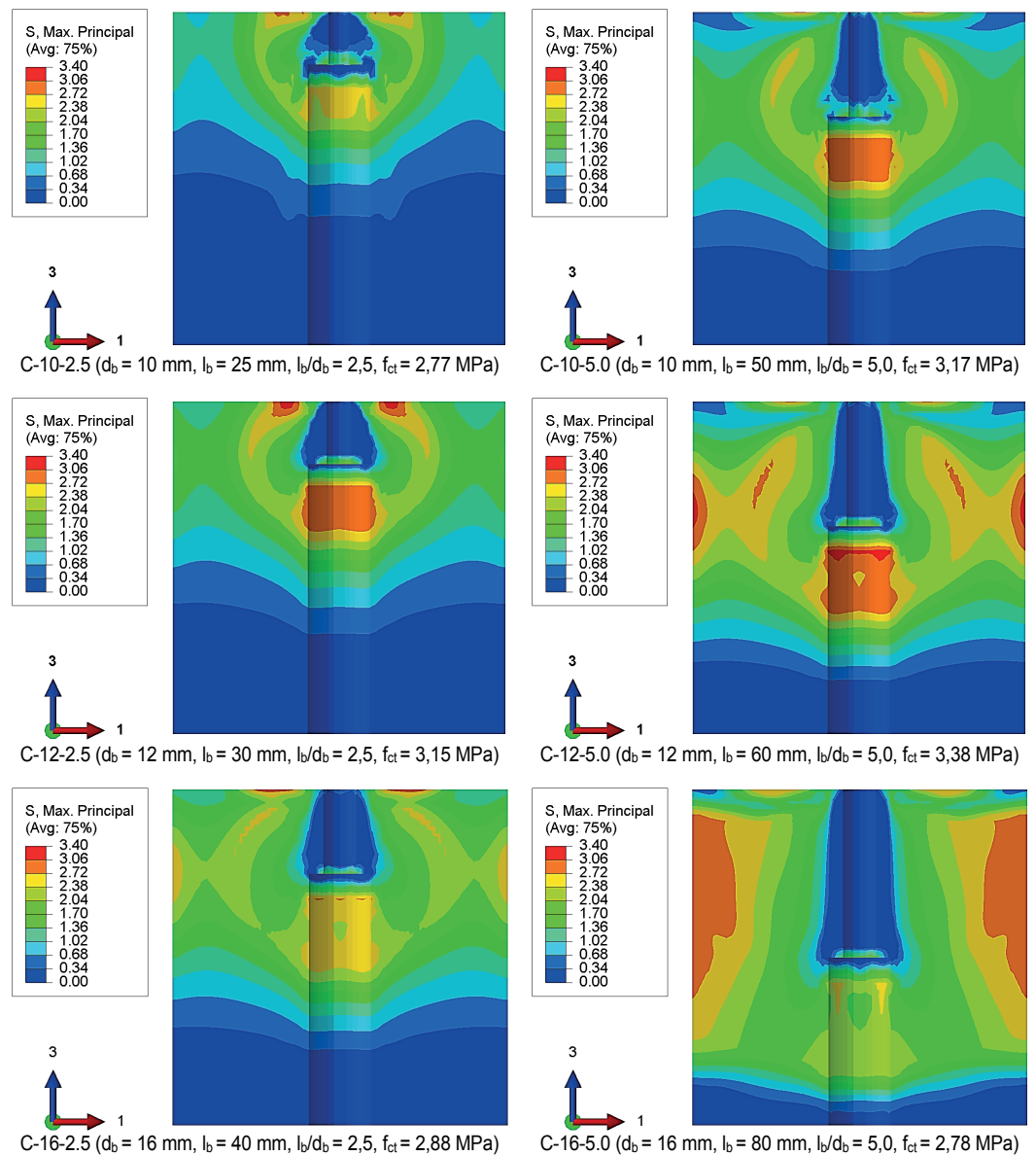
Tablica 4. Zestawienie rezultatów eksperymentów [15] i symulacji MES

Nazwa serii	A_b [mm ²]	Eksperymenty				Symulacje MES	
		$\tau_{b,max}$ [MPa]	s_1 [mm]	F_{max} [kN]	zniszczenie	$\tau_{b,max}$ [MPa]	s_1 [mm]
C-10-2.5	785,40	24,18	0,87	18,99	wyrwanie	24,29	0,87
C-10-5.0	1570,80	26,82	1,90	42,13	wyrwanie	27,12	1,89
C-12-2.5	1130,97	27,67	0,88	31,29	wyrwanie	27,14	0,91
C-12-5.0	2261,95	26,35	1,37	59,60	wyrwanie	26,40	1,39
C-16-2.5	2010,62	26,45	1,32	53,18	wyrwanie	26,78	1,38
C-16-5.0	4021,24	14,99	0,52	60,28	rozłupanie	15,05	0,53

Tablica 5. Wzrost powierzchni A_b i siły F_{max} dla wybranych serii badań

Porównywane serie	Wzrost A_b [-]	Wzrost F_{max} [-]
C-10-5.0 do C-10-2.5	2,00	2,22
C-12-5.0 do C-12-2.5	2,00	1,90
C-12-5.0 do C-10-5.0	1,44	1,41
C-12-2.5 do C-10-2.5	1,44	1,65
C-16-2.5 do C-12-2.5	1,78	1,70
C-16-2.5 do C-10-2.5	2,56	2,80

Rys. 4. Główne naprężenia rozciągające w betonie [MPa] dla poszczególnych serii odpowiadające szczytowemu naprężeniu τ_b



występują naprężenia rozciągające o wartości wytrzymałości betonu na rozciąganie. Dlatego próbki z tej serii zniszczyły się przez rozłupanie. Natomiast dla C-16-2.5 oraz dla pozostałych serii naprężenia równe wytrzymałości betonu na rozciąganie nie były dominujące, co przełożyło się na zniszczenie przyczepności przez wyrwanie.

Zastosowanie odcinka przyczepności odpowiadającego 2,5-krotności średnicy wyrwanego pręta wywołuje mobilizację mniejszej objętości betonu w przenoszeniu naprężeń z pręta niż próbki z zakotwieniem $5,0d_b$. Wynika to z mniejszej powierzchni przyczepności A_b , a co za tym idzie, niższych wartości sił wyrwających. W konsekwencji naprężenia rozciągające powodujące rozłupanie są skutecznie równoważone przez wystarczające skrępowanie pręta w betonie (tj. stosunek c/d_b) dla zakotwienia $2,5d_b$ i nie dochodzi do rozłupania, jak w próbkach z serii C-16-5.0. W prenormie Model Code 2010 [18] zapisano, że zniszczenie przez wyrwanie pręta ma miejsce w przypadku dobrze skrępowanego betonu, co jest określone przez nierówność $c/d_b \geq 5$. W przypadku serii z prętem o średnicy 16 mm stosunek c/d_b jest równy 4,5. Jednakże, dla

serii z długością $l_b = 2,5d_b$ doszło do wyrwania, choć wspomniana nierówność nie została spełniona. W MC2010 zapisano również, że wzory do obliczania szczytowego naprężenia przyczepności przy rozłupaniu zostały określone dla stosunku $l_b/d_b = 5$, co sugeruje, że model przyczepności opisany w tej normie oparto na długości $l_b = 5d_b$.

Podsumowanie

Długość zakotwienia l_b ma istotny wpływ na zachowanie przyczepności w teście pull-out. Zwiększenie długości odcinka l_b determinuje przyrost powierzchni przyczepności A_b . W rezultacie konieczna jest większa siła wyrwająca F_{max} , aby zniszczyć wiązanie na styku pręt-beton, co może wpłynąć na zmianę typu zniszczenia przyczepności, jak w przypadku serii z prętem $d_b = 16$ mm. Przyrost siły F_{max} jest w przybliżeniu równy przyrostowi powierzchni A_b . W związku z tym szczytowe naprężenia przyczepności pozostają na porównywalnym poziomie.

Symulacje numeryczne przedstawione w artykule stanowią uzupełnienie przeprowadzonych badań doświadczalnych opisanych w pracy [15]. Przez zastosowanie

w modelach materiałowych parametrów mechanicznych betonu i stali otrzymanych z własnych badań laboratoryjnych oraz stosowanie skalibrowanych uśrednionych krzywych przyczepność-poślizg z eksperymentów do definicji modelu odzwierciedlającego współpracę pręta z betonem, uzyskano symulacje numeryczne, które charakteryzują się dużą zbieżnością rezultatów z eksperymentami. Dotyczy to zarówno krzywych przyczepność-poślizg, jak i szczytowego naprężenia przyczepności oraz odpowiadającego poślizgu (różnica nie większa niż kolejno 1% i 2%), a także zachowania betonu podczas badania.

PIŚMIENICTWO

- [1] Abrams D.A.: Tests of Bond Between Concrete and Steel. University of Illinois, Urbana, 1913.
- [2] Rehm G.: O podstawach przyczepności między stalą a betonem (Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton). Deutscher Ausschuss Für Stahlbeton, 1961.
- [3] Goto Y.: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars. ACI Journal Proceedings, t. 68, no. 4, pp. 244–251, 1971.
- [4] Tepfers R.: A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. Chalmers University of Technology, Publication No. 73:2, Göteborg, Sweden, 1973.
- [5] Eligehausen R., Popov E.P., Bertero V.V.: Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Techn. Chamber of Greece, t. 4, 1982, pp. 69–80.
- [6] CEB-FIP, fib Bulletin No. 10 – Bond of reinforcement in concrete: State-of-art report, 2000.
- [7] Pędziwiatr J.: Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007, ISBN: 0324-9875.
- [8] Kucharska M., Dybel P.: Jak zwiększyć przyczepność stal zbrojenia-beton? Builder, Tom 23, Nr 1, str. 65-67, 2019.
- [9] Kijania-Kontak M., Winnicki A.: Badania doświadczalne przyczepności prętów zbrojeniowych SAS 670/800 do betonu wysokiej wytrzymałości za pomocą próby pull-out. Przegląd Budowlany, R. 93, Nr 5-6, str. 136-141, 2022.
- [10] Deshpande A.A., Kumar D., Ranade R.: Temperature effects on the bond behavior between deformed steel reinforcing bars and hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. Construction and Building Materials, Tom 233, 117337, 2020.
- [11] ISO 10406-1 – Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids.
- [12] Metelli G., Plizzari G.A.: Influence of the relative rib area on bond behaviour. Magazine of Concrete Research, Tom 66, Wyd. 6, str. 277-294, 2014.
- [13] PN-EN 10080:2007 – Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne.
- [14] Miranda M.P., et al.: Steel-concrete bond behavior: An experimental and numerical study. Construction and Building Materials, Tom 271, 121918, 2021.
- [15] Burdziński M., Niedostatkiewicz M.: Analiza doświadczalna wpływu długości zakotwienia pręta na zachowanie przyczepności w teście pull-out. Inżynieria i Budownictwo nr 3/2024, str. 115-120.
- [16] Burdziński M., Niedostatkiewicz M.: Badania doświadczalne przyczepności. Builder, Tom 24, Nr 6, str. 12-15, 2020.
- [17] Burdziński M., Niedostatkiewicz M., Ziółkowski P.: Tests of bond between concrete and steel bars – literature background and program of own research. Budownictwo i Architektura, Tom 19, Nr 3, str. 5-19, 2020.
- [18] fib Model Code for Concrete Structures 2010, Federation internationale du beton.
- [19] Xing G., et al.: Experimental Study on Bond Behavior between Plain Reinforcing Bars and Concrete. Advances in Materials Science and Engineering, t. 2015, 2015.
- [20] Tang C-W., Cheng C-K.: Modeling Local Bond Stress – Slip Relationships of Reinforcing Bars Embedded in Concrete with Different Strengths. Materials, t. 13, nr 17, 2020.
- [21] Soroushian P., Choi K.B.: Local bond of deformed bars with different diameters in confined concrete. ACI Structural Journal, vol. 86, no. 2, pp. 217-222, 1989.

Nowości wydawnicze dla Inżynierów!



Kup taniej o 25%!
Kod rabatowy: IIB25*

*25% rabatu od ceny katalogowej książek WN PWN oraz WNT. Kod będzie ważny do 31.07.2024 r.

Patronat medialny:

**INŻYNIERIA I
BUDOWNICTWO**

PWN KSIĘGARNIA
INTERNETOWA