Badania doświadczalne przyczepności

mgr inż.
MARCIN BURDZIŃSKI
Politechnika Gdańska
Szkoła Doktorska
ORCID: 0000-0001-5965-4349

dr hab. inż.
MACIEJ NIEDOSTATKIEWICZ
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska
ORCID: 0000-0002-6451-6220

W artykule dokonano skróconego przeglądu problematyki badań przyczepności między betonem i stalą zbrojeniową w aspekcie testów *pull out* oraz przedstawiono własną (autorów) koncepcję badań dotyczącą analizy przyczepności, która będzie podstawą do stworzenia w przyszłości modelu numerycznego służącego do symulacji współpracy betonu i stalowych żebrowanych prętów zbrojeniowych w różnych elementach żelbetowych.

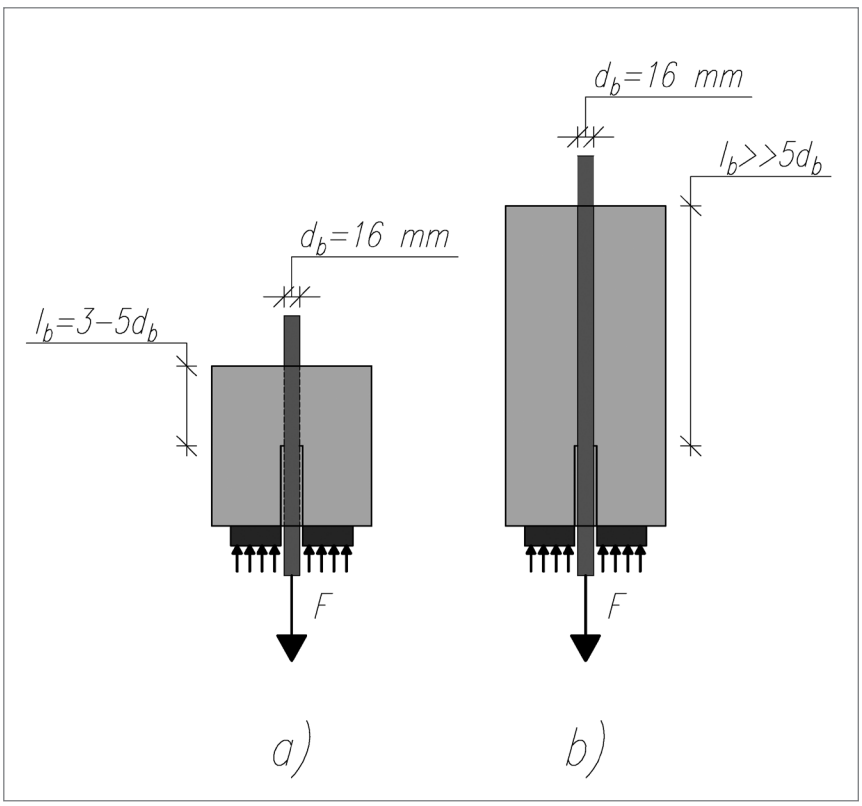
Przyczepność, podobnie jak inne zjawiska występujące w elementach żelbetowych, może być analizowana na trzy sposoby: analitycznie, doświadczalnie i numerycznie. Analiza przyczepności nie jest łatwa, co wynika m.in. z wielu czynników, które mają wpływ na współpracę betonu i zbrojenia (np. parametry wytrzymałościowe, zastosowane materiały, obciążenia cykliczne) [1]. Powszechnie znaną metodą badań doświadczalnych nad przyczepnością jest test *pull out*, który od wielu lat jest chętnie przeprowadzanym eksperymentem przez badaczy zjawiska przyczepności (np. [2], [3], [4]). W artykule zostało opisane badanie *pull out* prowadzone na elementach badawczych o różnych długościach odcinków współpracy betonu i stali z uwzględnieniem jego zalet oraz wad. Dodatkowo w dalszej części pracy została przedstawiona własna koncepcja programu badań zjawiska przyczepności, która ma stanowić podstawę do stworzenia modelu numerycznego służącego do symulacji współpracy betonu i stalowych żebrowanych prętów zbrojeniowych w różnych elementach żelbetowych.

Charakterystyka badania *pull out*

Badanie typu *pull out* polega na wyciąganiu z betonowego bloku zakotwionego w nim pręta. Rodzaj dokonywanych pomiarów zależy od poziomu ogólności otrzymywanych rezultatów (poziom: żeberka, pręta, elementu) [5], który z kolei zależy m.in. od długości odcinka przyczepności, czyli długości odcinka współpracy pręta i otaczającego go betonu. Dla próbek krótkich (rys. 1a.) długość odcinka przyczepności wynosi zwykle od trzech do pięciu średnic wyciąganego pręta, co pozwala założyć, że na tak krótkim odcinku zmiany odkształceń wzdłuż osi pręta są liniowe, a naprężenia przyczepności mają jednakową wartość na tej długości i są opisane zależnością (1):

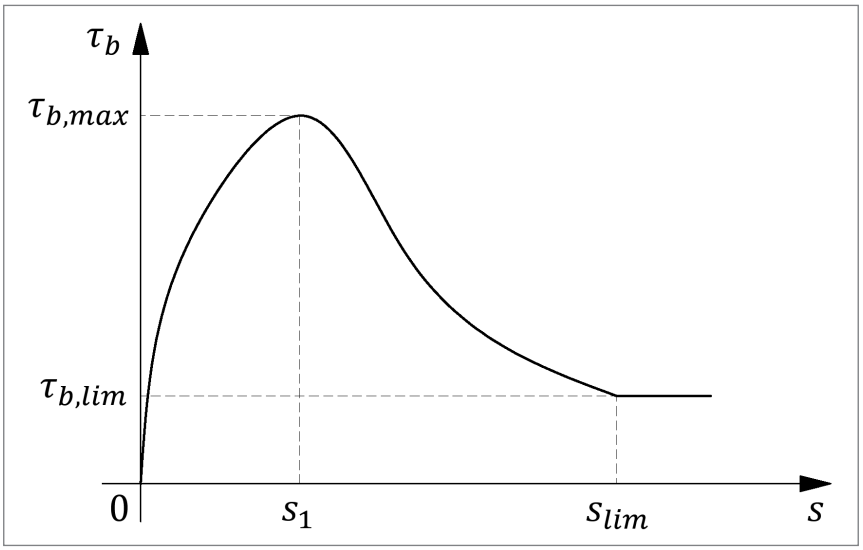
$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot d_b \cdot l_b} \quad (1)$$

gdzie: τ_b – naprężenia przyczepności, F – siła z jaką wyciągany jest pręt, d_b – średnica pręta wyciąganego z próbki, l_b – długość odcinka przyczepności. Podczas próby *pull out* na próbce krótkiej wykonuje się pomiar wartości siły F oraz odpowiadające tej sile przemieszczenie (s) wyciąganego pręta względem betonowego bloku (zwanego dalej „poślizgiem"). Na tej podstawie tworzona jest krzywa zależności naprężenia przyczepności–poślizg (τ_b – s), która jest głównym rezultatem tego badania (rys. 2.). Badanie na próbkach krótkich pozwala także na obser-



Rys. 1. Schematyczny wygląd typowej próbki: a) krótkiej (na podstawie [7]), b) długiej do testu *pull out* [rys. własny]

Fot arch. autorów



Rys. 2. Przykładowa krzywa zależności naprężenia przyczepności–poślizg ($\tau_b - s$) uzyskana z próby *pull out* na próbce krótkiej ($\tau_{b\,max}$ – maksymalna wartość naprężenia przyczepności; $\tau_{b\,lim}$ – wartość naprężenia przyczepności podczas wyrwania pręta; s_1, s_{lim} – wartość przemieszczenia swobodnego końca pręta względem górnej powierzchni betonowego bloku, która odpowiada wartości kolejno: $\tau_{b\,max}$, $\tau_{b\,lim}$) [rys. własny]

wację rozwoju mechanizmu działania przyczepności między dwoma sąsiednimi żeberkami [6].

W przypadku próbki długiej (rys. 1b.) długość odcinka przyczepności jest znacznie większa od pięciu średnic wyciąganego pręta i w przybliżeniu jest równa odległości między dwoma sąsiednimi rysami. Nie można wobec tego założyć, że naprężenia przyczepności wzdłuż długości pręta są stałe. Oblicza się je wg wzoru (2) na podstawie [6]:

$$\tau_{b,i} = -\frac{d_b}{4} \cdot \frac{\varepsilon_{s,i+1} - \varepsilon_{s,i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \cdot E_s \quad (2)$$

gdzie: $\tau_{b,i}$ – naprężenia przyczepności w przekroju i, d_b – średnica wyciąganego z próbki pręta, $\varepsilon_{s,i+1}$ – odkształcenia w pręcie zbrojeniowym w przekroju i+1, $\varepsilon_{s,i-1}$ – odkształcenia w pręcie zbrojeniowym w przekroju i-1, x_{i+1} – położenie przekroju x+1 względem czoła próbki, x_{i-1} – położenie przekroju x-1 względem czoła próbki, E_s – moduł sprężystości stali zbrojeniowej. Rezultatem badania *pull out* na długiej próbce jest wyznaczenie przebiegu naprężeń przyczepności na rozważanej długości pręta, co jest niezbędne dla analizy zjawisk związanych z zagadnieniami inżynierskimi (np. powstawanie i rozwój rys, zmiany sztywności elementu). Ze wzoru (2) wynika, że dokładność tego przebiegu zależy od gęstości rozmieszczenia punktów pomiarowych odkształceń na danym odcinku pręta.

Oprócz długości próbki elementy badawcze wykorzystywane w testach *pull out* różnią się kształtem przekroju poprzecznego. Mogą być one sześcienne [8], prostopadłościenne [9] lub walcowe [10].

Badanie *pull out* zarówno dla krótkiej, jak i długiej próbki służy również do wyznaczania funkcji przyczepności, które opisują relacje między naprężeniami przyczepności a parametrami, jakimi odznacza się analizowany element. Wspomniane parametry uwzględniają wybrane czynniki wpływające na przyczepność. Najczęściej są one związane z wytrzymałością betonu i geometrią pręta zbrojeniowego. Funkcje przyczepności można podzielić na trzy grupy [6]. Pierwsza grupa funkcji przyczepności zależy jedynie od poślizgu pręta (s) i wyznacza się je na podstawie badania *pull out* na próbce krótkiej. Druga grupa zależy od wartości poślizgu pręta (s) oraz położenia przekroju na rozpatrywanej długości welementu (x). Natomiast trzecia grupa funkcji przyczepności zależy tylko od położenia przekroju na rozpatrywanej długości elementu (x). Dwie ostatnie wspomniane grupy funkcji przyczepności wyznacza się za pomocą badań na próbkach długich. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że wzory (1) i (2) nie są funkcjami przyczepności. Służą one do wyznaczenia wartości naprężeń przyczepności uzyskanych podczas doświadczenia.

Zalety i wady badania *pull out*

Przeprowadzanie testu *pull out* na próbkach krótkich jest relatywnie tanie i proste, co umożliwia wykonanie wielu serii prób z uwzględnieniem różnych czynników, które rzutują na współpracę betonu i zbrojenia (np. wpływ: klasy betonu [11], geometrii pręta [12], korozji pręta stalowego [13]). Kolejnym atutem tego eksperymentu jest częstość jego wykonywania, co potwierdza szereg publikacji, jakie można znaleźć w literaturze. Istnieją rekomendacje [7] i procedury normowe [14] określające sposób prowadzenia omawianego testu. Niestety dowolność prowadzenia próby *pull out* powoduje często trudności lub niemożność porównania wyników różnych badań [6]. Innym plusem badania *pull out* na próbkach krótkich jest łatwość zastosowania wyników testu – tj. funkcji przyczepności postaci $\tau_b(s)$ – w analizie numerycznej. Jedną z najpopularniejszych tego typu funkcji przyczepności uzyskanych na podstawie badania *pull out* na próbce krótkiej jest formuła (3) zawarta w [15]:

$$\tau_b(s) = \tau_{b,max} \cdot \left(\frac{s}{s_1}\right)^{\alpha} \quad (3)$$

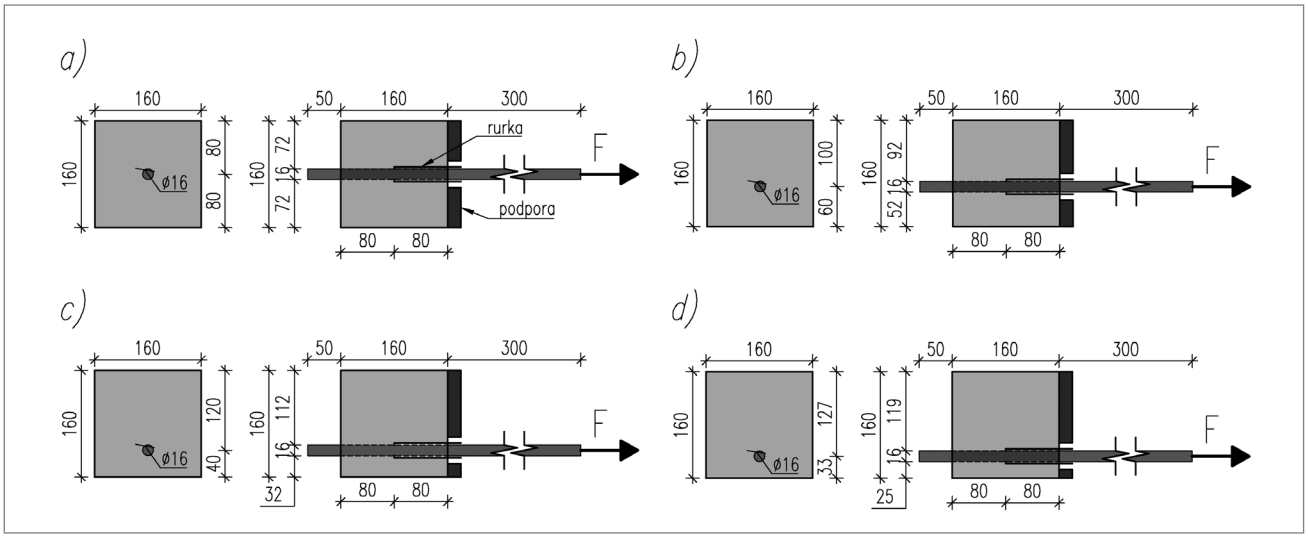
gdzie: $\tau_b(s)$ – wartość naprężenia przyczepności odpowiadająca poślizgowi (s), $\tau_{b\,max}$ – maksymalna wartość naprężenia przyczepności uzyskana podczas testu, s_1 – wartość poślizgu pręta odpowiadająca wartości $\tau_{b\,max}$, α – parametr doświadczalny. Wzór (3) opisuje krzywą pokazaną na rys. 2. w przedziale od 0 do s_1.

Niestety interpretacja powyższego wzoru nie jest wolna od kontrowersji. Po pierwsze ze wzoru (3) wynika, że danemu poślizgowi (s) odpowiada zawsze ta sama wartość naprężenia przyczepności (τ_b), a to nie jest prawdą. Po drugie z tego samego wzoru wynika również, że im większa jest wartość poślizgu, tym większa jest wartość naprężenia przyczepności. W przekroju, w którym powstała rysa, występuje największy poślizg pręta względem betonu, a naprężenia przyczepności w tym miejscu są w rzeczywistości zerowe, zatem powyższe spostrzeżenie nie jest prawdziwe.

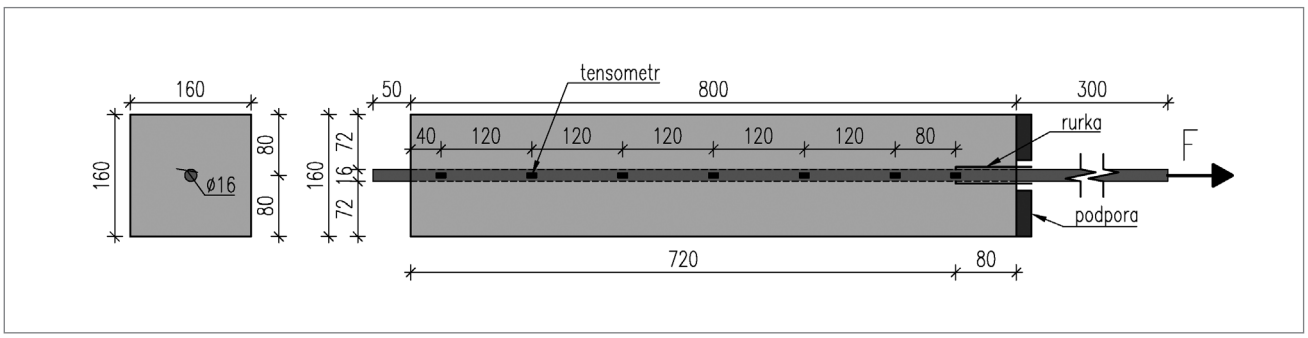
Badanie *pull out* ma istotne niedogodności. Podczas testu wyciągany pręt jest rozciągany, natomiast beton próbki jest ściskany, więc sytuacja ta nie odwzorowuje strefy rozciąganej elementu żelbetowego. Warto wspomnieć, że obciążenie elementów badawczych podczas próby *pull out* przekazywane jest za pomocą pręta, co w rzeczywistych elementach żelbetowych nie występuje. Ponadto w próbce krótkiej nie ma możliwości powstawania rys wewnętrznych, co wpływa na zawyżenie maksymalnych wartości naprężeń przyczepności. Warto także zwrócić uwagę na nienaturalne skrępowanie wkładki zbrojeniowej przez otulenie, którego tak duża grubość nie występuje w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych (ponad trzykrotność pręta zbrojeniowego). Determinuje to sposób zniszczenia próbki, tj. zniszczenie przez wyrwanie pręta (ang. *pull out failure*).

Dużo bardziej skomplikowana jest sytuacja w przypadku badania *pull out* na próbce długiej. Problem pojawia się już na samym początku, czyli przy wyborze elementu badawczego. Próbka musi możliwie jak najdokładniej odwzorowywać warunki panujące w elemencie żelbetowym. Należy również zwrócić uwagę na stan naprężenia próbki, który determinuje sposób powstawania i rozwoju rys [16]. Jednak podstawowym problemem tego testu jest wykonywanie pomiarów odkształceń wzdłuż osi pręta na rozpatrywanym od-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 3. Szczegóły próbki krótkiej używanej w próbie *pull out* (opis w tekście) [rys. własny]



Rys. 4. Szczegóły próbki długiej używanej w próbie *pull out* (opis w tekście) [rys. własny]

cinku. Najczęściej spotyka się dwa podejścia. Pierwsze polega na umieszczaniu tensometrów na powierzchni pręta. Wiąże się to z zaburzeniem obserwowanej interakcji betonu i zbrojenia poprzez odpowiednie przygotowanie pręta (miejscowe zeszlifowanie żeberek) oraz umieszczenie samych tensometrów. Drugi sposób mierzenia odkształceń polega na przecięciu pręta wzdłuż, umieszczeniu w jego wnętrzu tensometrów i ponownym zgrzaniu. Istnieją poważne wątpliwości co do użyteczności otrzymanych w ten sposób rezultatów, ze względu na ingerencję w strukturę stali wkładki oraz na wiarygodność otrzymanych wyników.

Własna koncepcja badań doświadczalnych przyczepności

Rezultatem badań doświadczalnych będą wyniki, które umożliwią walidację modelu numerycznego pozwalającego na zadowalającą dokładną symulację współpracy betonu i stalowych żebrowanych prętów zbrojeniowych w wybranych elementach żelbetowych.

Głównym problemem badawczym podczas planowanych badań eksperymentalnych jest zmienność zachowania się układu stal zbrojeniowa – beton w przypadku tzw. próbki krótkiej oraz próbki długiej. Zmienność ta zostanie przeanalizowana w odniesieniu do zróżnicowanego położenia pręta zbrojeniowego, co stanowi analogię do różnej wysokości użytecznej przekroju zbrojonego.

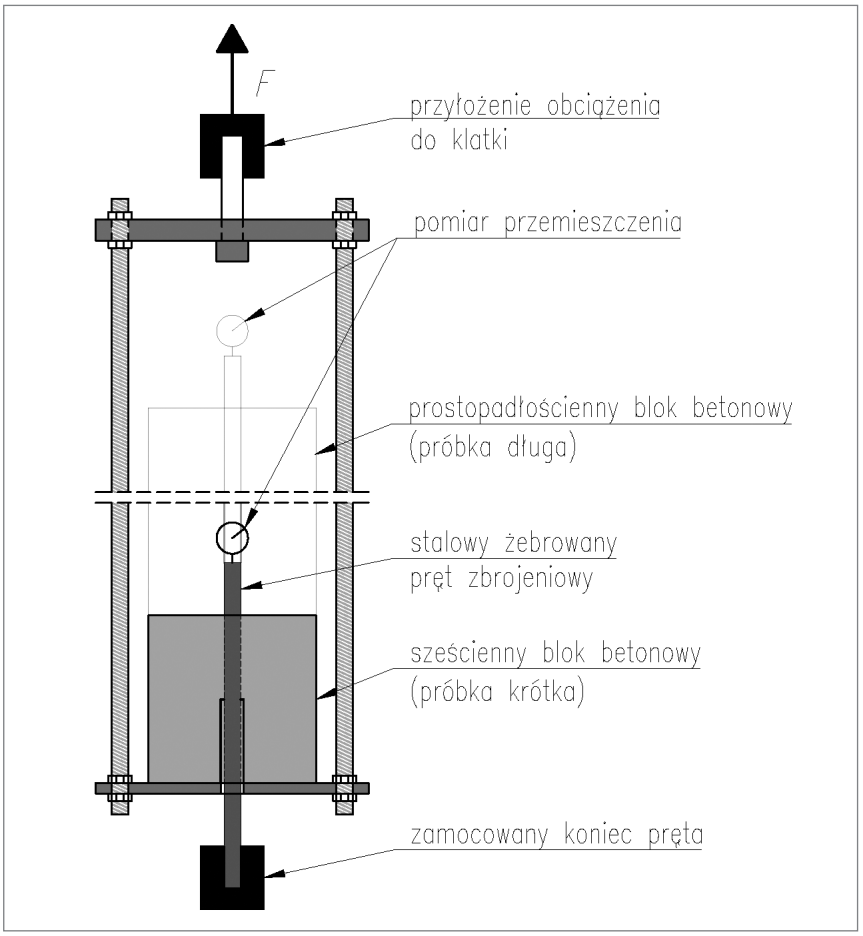
W przypadku próbki krótkiej do testu zostanie wykorzystany stalowy żebrowany pręt zbrojeniowy o średnicy 16 mm (B500SP EPSTAL) zakotwiony w betonowym sześcianie (beton klasy C30/37) o boku długości równym 160 mm (dziesięciokrotność średnicy pręta), a długość zakotwienia pręta w betonie będzie wynosić 80 mm (pięciokrotność średnicy pręta). Na pozostałych 80 mm pręt będzie otoczony rurką o średnicy wewnętrznej 20 mm, aby zapewnić brak współpracy wkładki i betonu. Rurka nie będzie miała kontaktu z wyciąganym prętem, zatem nie zaburzy ona wykonywanych podczas badania pomiarów. Opisany element badawczy został opracowany głównie na podstawie zaleceń [7]. Testy zostaną przeprowadzone na czterech różnych próbkach różniących się między sobą lokalizacją wyciąganego pręta zbrojeniowego – tj. w środku wysokości próbki (rys. 3a.), przesunięty w dół o 20 mm (rys. 3b.), przesunięty w dół o 40 mm (rys. 3c.), przesunięty w dół o 47 mm (rys. 3d.) względem środka próbki. Otulenie pręta, mierząc od dołu próbki, będzie wynosić kolejno: 72, 52, 32, 25 mm. Próby przeprowadzone na opisanych elementach pozwolą na obserwację mechanizmu zjawiska przyczepności oraz sposobu zniszczenia próbki w zależności od grubości otulenia pręta.

Próbka długa do badania *pull out* będzie miała kształt prostopadłościanu o przekroju kwadratowym o boku 160 mm i długość 800 mm (pięciokrotność długości próbki krótkiej). Długość odcinka przyczepności to 720 mm, czyli 45-krotność średnicy wyciąganego pręta φ16 (B500SP EPSTAL). Wyciągany pręt będzie się znajdował w centralnej części betonowego bloku (beton klasy C30/37), którego otulenie będzie równe 72 mm. Przewidziane zostało umieszczenie rurki na odcinku 80 mm izolującej wkładkę od betonu, analogicznie do próbki krótkiej, co umożliwi porównanie rozkładu naprężeń przyczepności w czole próbki długiej i krótkiej.

Na powierzchni pręta zbrojeniowego zostaną zamontowane tensometry. Ich rozstawy oraz pozostałe szczegóły próbki długiej pokazano na rys. 4. Stosunkowo duże rozstawy tensometrów są podyktowane ich wpływem na współpracę betonu i pręta zbrojeniowego. Mniejszy rozstaw zbyt mocno ingerowałby w analizowane zjawisko przyczepności.

Rys. 5. przedstawia schematyczny wygląd stanowiska badawczego próby pull out. Jest to metalowa klatka, w której znajduje się betonowy blok z zakotwionym prętem, umieszczona w maszynie wytrzymałościowej. Stanowisko badawcze różni się wysokością klat-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 5. Schematyczny rysunek stanowiska badawczego [rys. własny]

ki w zależności od badanej próbki (krótkiej, długiej). Szczegóły dotyczące stanowiska zaznaczono na rysunku.

Podsumowanie i wnioski

Artykuł ma na celu dokonanie skróconego przeglądu problematyki badań przyczepności między betonem i stalą zbrojeniową w aspekcie testów *pull out* oraz przedstawienie własnej koncepcji programu badań doświadczalnych tego zjawiska, które zostaną wkrótce przeprowadzone. Wykonywanie docelowych analiz numerycznych pozwoli na zastosowanie zaawansowanych, trójwymiarowych modeli wykorzystujących mechanikę kruchego pękania i uwzględniających powstawanie rys wewnętrznych w sąsiedztwie pręta. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że wspomniane modele numeryczne są kalibrowane na podstawie eksperymentów, co sprawia, że oba rodzaje analizy przyczepności nie są od siebie niezależne, a dokładne badania doświadczalne przyczepności oraz płynące z nich wnioski są niezbędne. W przyszłości testy *pull out* będą uzupełniane o modyfikacje (m.in. inna średnica/gatunek pręta, inna klasa betonu) i o kolejne eksperymenty (*double pull out test, beam test*). Pozwoli to na dokładniejsze poznanie wpływu zjawiska przyczepności na pracę wybranych elementów żelbetowych.

Literatura

[1] fib Bulletin No. 10, 2000, Bond of reinforcement in concrete, fédération internationale du béton, Lausanne, Switzerland, doi:10.35789/fib.BULL.0010.
[2] Dybeł P., Furtak K., 2015, The Effect of Ribbed Reinforcing Bars Location on Their Bond with High-Performance Concrete, Archives of Civil and Mechanical Engineering 15(4):1070–77, doi:10.1016/j.acme.2015.03.008.
[3] Carvalho E.P. et al., 2017, Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars, Latin American Journal of Solids & Structures, 14(11), pp. 1932–1951. doi: 10.1590/1679-78254116.
[4] Kijania-Kontak M., 2018, Badania przyczepności między betonem wysokowartościowym a stalą wysokiej wytrzymałości, rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska.
[5] Cox J.V., Herrmann L.R., 1998, Development of a Plasticity Bond Model for Steel Reinforcement, Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 1998, Vol. 3, Issue: 2, pp. 155-180.
[6] Pędziwiatr J., Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
[7] RILEM/CEB/FIP, Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete, Revised edition of RC6 Bond test for reinforcement steel: (2). Pull-out test, CEB News, May 1983, No. 73.
[8] Zhao J., Cai G., Yang J., Bond-slip behavior and embedment length of reinforcement in high volume fly ash concrete, Materials and Structures, 2016, 49(6):2065, doi:10.1617/s11527-015-0634-2.
[9] Li X., Zhang J., Liu J., Cao W., Bond Behavior of Spiral Ribbed Ultra-high Strength Steel Rebar Embedded in Plain and Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete, KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(10):4417, doi:10.1007/s12205-019-2449-0.
[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 & Building Materials, 2020, 233:N.PAG., doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117337.
[11] Esfahani M.R., Rangan B.V., Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete (HSC), ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 2, 1998, s. 96–106.
[12] Soretz S., Holzenbein H., Influence of Rib Dimensions of Reinforcing Bars on Bond and Bendability, ACI Journal – Symposium Paper, January 1979, s. 111–125.
[13] Chen J., Zhang B., Yang O., Long S., Xu F., Yang C., Impact of anchorage length on bond performance between corroded reinforcing steel bars and concrete, Cailiao Daobao/Mater Rep 2019, 33(11), s. 3744–51.
[14] PN-EN 10080 – Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne, 2007.
[15] fib Model Code for Concrete Structures 2010, 1st ed, fédération internationale du béton/International Federation for Structural Concrete, 2013.
[16] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. T.1, Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.1401

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
Burdziński Marcin, Niedostatkiewicz Maciej, 2020, Badania doświadczalne przyczepności, „Builder" 06 (275). DOI: 10.5604/01.3001.0014.1401

Streszczenie: W artykule zostało przedstawione powszechnie znane wśród badaczy zjawiska przyczepności badanie typu *pull out*. Zostały opisane wybrane próbki wykorzystywane w tych eksperymentach, sposób prowadzenia badań oraz uzyskiwane z nich rezultaty, a także opisano funkcję przyczepności uzyskiwaną na podstawie wspomnianego testu. W artykule została zaprezentowana własna koncepcja badań dotycząca analizy przyczepności, która w przyszłości ma stanowić podstawę do stworzenia modelu numerycznego służącego do symulacji współpracy betonu i stalowych żebrowanych prętów zbrojeniowych w różnych elementach żelbetowych.
Słowa kluczowe: konstrukcje betonowe, przyczepność, pull out, stalowy pręt żebrowany, beton

Abstract: EXPERIMENTAL STUDIES OF BOND. The article presents a pull out test commonly known among bond researchers. Selected specimens used in these experiments, the method of testing and the results obtaining from them were described, and the bond function obtained on the basis of the said test was characterized. In addition, the article presents own concept of experimental bond analysis, which in the future will be formed the basis for creating a numerical model for simulating the cooperation of concrete and steel ribbed reinforcing bars in various reinforced concrete elements.
Keywords: reinforced concrete structures, bond, pull out, ribbed steel bar, concrete

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl