

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



mgr inż. Milena Kucharska
Wydział Górnictwa
i Geoinżynierii
AGH Akademia
Górnictwo-Hutnicza
Opiekun naukowy:



dr inż. Piotr Dybeł
Wydział Górnictwa
i Geoinżynierii
AGH Akademia
Górnictwo-Hutnicza

Nowoczesne budownictwo nastawione jest na trwałość, ekologię i spełnienie wymagań ekonomicznych inwestora. Betony nowej generacji, czyli beton wysokowartościowy (HPC) i samozagęszczalny beton wysokowartościowy (HPSCC), który bazuje na koncepcji HPC oraz betonu samozagęszczalnego (SCC), wychodzą mu naprzeciw. Właściwości mieszanki betonu SCC pozwalają na szczelne wypełnienie formy z jednoczesnym odpowiednim i samopoziomowaniem bez dodatkowego zagęszczenia mechanicznego [1].

Przyczepność w betonach SCC

W pracy skupiono się na analizie jakości warunków przyczepności w zależności od kierunku podawania mieszanki oraz od położenia pręta zbrojeniowego w formie. Poprzez kierunek podawania założono miejsce, z którego układano mieszankę, a położenie pręta jest rozumiane jako odległość od dna formy. Często obserwowanym [5-8] zjawiskiem związanym z zagadnieniem przyczepności jest tzw. *top-bar effect*. Definiuje się go jako obniżenie przyczepności wraz ze wzrostem warstwy betonu położonej poniżej analizowanego zbrojenia. W wytycznych normowych wprowadzono konieczność rekompensaty długości zakotwienia w miejscach spodziewanego pogorszenia jakości warunków przyczepności. ACI 318 [9] zaleca dla prętów położonych w strefach obniżonej przyczepności wydłużenie zakotwienia o 30%, a normy europejskie [10,11] o 43%.

Wobec niewystarczających danych literaturowych obejmujących temat przyczepności w betonach HPSCC w pracy podjęto próbę

JAK ZWIĘKSZYĆ PRZYPNOSPNOŚĆ

stal zbrojeniowa-beton?

Istotą pracy konstrukcji żelbetowej jest zapewnienie współpracy pomiędzy betonem a stalą zbrojeniową, czyli przyczepności. Jest ona uzależniona przede wszystkim od właściwości stwardniałego betonu i geometrii znajdującego się w nim zbrojenia, jak również od jakości świeżej mieszanki. Zastosowanie technologii betonowania od dołu pozwala na poprawę jakości mieszanek samozagęszczalnych.

określenia wpływu kierunku podawania mieszanki i położenia zbrojenia na jego przyczepność do stalowych prętów zbrojeniowych.

Mieszanki betonowe

Badania przeprowadzono na trzech mieszankach HPSCC o zmiennej zawartości pyłu krzemionkowego (bez dodatku pyłu, z zawartością 5 i 10% w stosunku do masy cementu). Mieszanki te charakteryzowały się stałym współczynnikiem wodno-spoiwowym równym 0,32 i stałą masą spoiwa (550 kg/m³). Skład mieszanek zestawiono w tabeli 1. W tabeli 2. podano ich właściwości reologiczne.

Elementy badawcze

Dla każdej mieszanki użytej w eksperymencie wykonano każdorazowo po dwa elementy o wysokości 480 mm, rozpatrując dwa kierunki betonowania. Aby przeprowadzić badania *pull-out* zgodnie z zaleceniami RILEM [12], elementy te po 21 dniach od wykonania pocięto na elementarne części. Dodatkowo wykonano po cztery próbki kostkowe o wymiarach 150 x 150 x 150 mm dla każdego betonu w celu określenia wytrzymałości na ściskanie wg normy [13]. Wyniki zestawiono w tabeli 3. Badanie *pull-out* wykonano na 24 próbkach elementarnych, a badanie wytrzymałości na ściskanie na łącznie 12 próbkach. Na rysunku 1. przedstawiono schemat elementarnej próbki do badania przyczepności. Pręty zbrojenia ze stali B500SP o średnicy 16 mm zorientowane były prostopadle do kierunku betonowania. Odpowiednie zakotwienie uzyskano dzięki zastosowaniu tulei z tworzywa.

Rozpatrzono dwa kierunki podawania mieszanki betonowej: od góry oraz od dołu formy. Na rysunku 2. przedstawiono schemat elementu badawczego wraz z zaznaczonymi rozpatrywanymi kierunkami betonowania. Betonowanie od dołu zapewniono poprzez orurowanie zamocowane w dolnej części deskowania i wyprowadzone ponad górę formy. Mieszanka samoczynnie wypełniała formę od dołu na zasadzie naczyń połączonych.

W związku z wykonywaniem badań na betonach HPSCC długość zakotwienia podobnie jak w [5] zmniejszono do wartości 2,5 ϕ , ponieważ proponowana przez RILEM [12] wartość 5 ϕ uniemożliwia uzyskanie granicznych naprężeń przyczepności przed wystąpieniem zerwania stali zbrojeniowej.

Metoda badań

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono metodą bazującą na teście *pull-out* zalecaną przez [12]. Przyjęcie modelu badawczego zgodnego z [12] pozwala na założenie, że zmiany odkształceń w stali wzdłuż osi pręta będą liniowe [14]. Możliwe jest zatem wyznaczenie naprężeń przyczepności w funkcji przesunięcia. Zakładając stałe wartości naprężeń przyczepności, można je wyliczyć z zależności:

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

gdzie: F – siła wrywająca, ϕ – średnica pręta zbrojeniowego, l_b – długość zakotwienia.

Przesunięcie pręta spowodowane przykładaną siłą wrywającą mierzone było czujnikami przemieszczeń liniowych. Próbki obciążano stopniowo do osiągnięcia granicznych naprężeń przyczepności.

Opracowanie wyników

Wartość granicznych naprężeń przyczepności (τ_{max}) jest często proponowana jako wartość reprezentatywna naprężeń przyczepności ze względu na swoją klarowną definicję [2–4, 7, 8]. Drugą rozpatrywaną wartością proponowaną przez autorów [3, 7, 8, 12] jest średnie naprężenie przyczepności obliczane jako średnia arytmetyczna trzech naprężeń przyczepności odpowiadających przesunięciom pręta względem betonu o 0,01, 0,10 i 1,00 mm:

$$\tau_m = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad (2)$$

Dotychczasowe badania na betonach HPC [6,15] wykazały, że przemieszczenia w chwili osiągnięcia maksymalnych naprężeń przyczepności rzadko uzyskują wartość 1,0 mm. Zatem zaproponowano zmianę we wzorze (2) wartości $\tau_{1,0}$ na $\tau_{0,5}$, która jest związana z naprężeniem przyczepności przy przesunięciu pręta o 0,5 mm.

Dodatkowo uwzględniono, że naprężenia przyczepności są uwarunkowane jakością i wytrzymałością betonu na rozciąganie. By móc porównać zjawisko przyczepności w betonach użytych w badaniu, posłużono się tzw. znormalizowanym naprężeniem przyczepności. Zazwyczaj [7, 8] wartość ta opisywana jest jako:

$$\frac{\tau_b}{f_{cm}^{0,5}} \quad (3)$$

gdzie τ_b – naprężenie przyczepności, a f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (tab. 2).

Wyniki badań

Zależności znormalizowanych naprężeń przyczepności i odpowiadającym im przesunięciom pręta ($\tau_b/f_{cm}^{0,5} - s$) porównano z wytycznymi proponowanymi w pracach [11, 15]. Wykresy przedstawiają wartości średnie otrzymane z dwóch serii badań (rys. 3). Wyniki reprezentatywnych naprężeń przyczepności przedstawiono w tabeli 4. i 5.

Top-bar effect

W celu określenia zmiany jakości warunków przyczepności wzdłuż wysokości elementu wprowadzono wskaźnik przyczepności wyznaczony jako stosunek reprezentatywnych naprężeń przyczepności pręta górnego do pręta dolnego (τ_g/τ_d) (rys. 5). Uzyskane wartości wskaźnika τ_g/τ_d porównano z wytycznymi normowymi [9–11], które rozgraniczają „dobre” i „słabe” warunki przyczepności. W przypadku układania mieszanki betonowej od dołu wartości wskaźnika τ_g/τ_d dla τ_m wahają się pomiędzy 0,8–0,84, a dla τ_{max} 0,88–0,95 w zależności od rodzaju mieszanki. Podawanie mieszanki od góry powoduje większą redukcję przyczepności: wskaźnik τ_g/τ_d znajdował się w prze-

Tablica 1. Skład mieszanek betonów HPSCC w [kg/m³]

Table 1. Composition by mass of proposed HPSCC mixes

Składniki [kg/m ³]	Symbol mieszanki		
	HPSCC 0	HPSCC 5	HPSCC 10
Cement CEM I 42.5R	550	524	500
Woda	176	176	176
Piasek 0/2 mm	790	790	790
Grysbazaltowy 2/8 mm	940	940	940
Pyłkrzemionkowy	-	26	50
Superplastifikator	5,14	5,98	6,27
w/s [-]	0,32	0,32	0,32

Tablica 2. Właściwości betonów HPSCC

Table 2. Details of HPSCC mixes

Symbol mieszanki	Rozplyw [cm]	Klasa rozplywu	Czas rozplywu T500 [s]	Klasa lepkości	Współczynnik L-Box	Klasa L-box	Wskaźnik stabilności	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]
HPSCC 0	72	SF2	1,8	VS1	0,93	PL2	0	84,40
HPSCC 5	66	SF2	2,1	VS2	0,90	PL2	0	88,30
HPSCC 10	68	SF2	1,7	VS1	0,91	PL2	0	86,50

Tablica 3. Maksymalne znormalizowane naprężenia przyczepności dla mieszanek

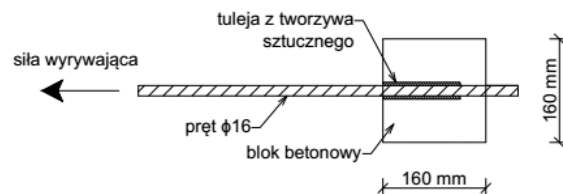
Table 3. Maximum normalized bond stresses of each mixture

Kierunek betonowania	Pręt	Maksymalne znormalizowane naprężenie przyczepności					
		HPSCC 0	σ_c [%]	HPSCC 5	σ_c [%]	HPSCC 10	σ_c [%]
Od dołu	Górny	3,96	9,2	4,46	6,3	4,97	5,4
	Dolny	4,48	5,8	4,87	9,9	5,24	8,5
Od góry	Górny	3,27	10,3	3,55	8,7	3,64	9,7
	Dolny	4,31	7,1	4,34	7,5	4,33	6,1

Tablica 4. Średnie znormalizowane naprężenia przyczepności dla mieszanek

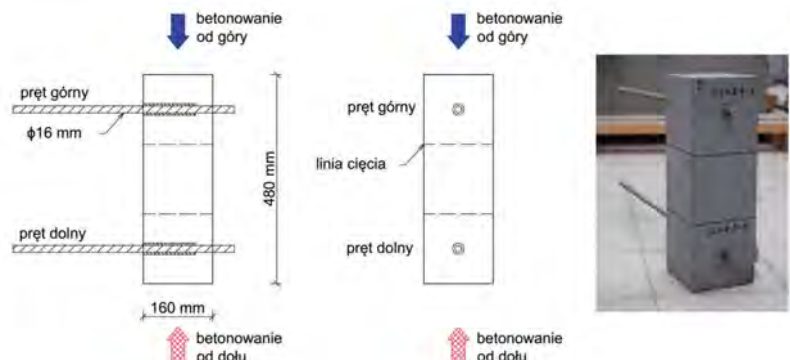
Table 4. Mean normalized bond stresses of each mixture

Kierunek betonowania	Pręt	Średnie znormalizowane naprężenie przyczepności					
		HPSCC 0	σ_c [%]	HPSCC 5	σ_c [%]	HPSCC 10	σ_c [%]
Od dołu	Górny	2,06	8,3	2,60	9,0	2,61	8,6
	Dolny	2,57	9,8	3,11	7,7	3,10	7,2
Od góry	Górny	1,38	6,8	1,73	10,2	2,07	9,7
	Dolny	2,40	6,0	2,48	7,3	2,80	6,9



Rys. 1. Schemat elementarnej próbki do badania przyczepności

Fig. 1. Schematic view of reference element for pull-out test



Rys. 2. Schemat i widok elementu badawczego

Fig. 2. Schematic view of the test element

dziale 0,57–0,74 dla τ_m i 0,76–0,84 dla τ_{max} . Badania wykazały, że betonowanie od dołu formy powoduje ujednolicenie jakości warunków przyczepności wzdłuż wysokości elementów badawczych. Mieszanka podczas podawania od dołu sukcesywnie podnosi się w formie, przez co następuje jej bardziej efektywne samoodpowietrzenie i samozagęszczenie. W rezultacie zmniejsza się porowatość styku stal–beton oraz ograniczone zostaje osiadanie mieszanki pod górnym prętem zbrojeniovym.

Wnioski

Głównym problemem podjętym w niniejszej pracy jest wpływ kierunku podawania mieszanki betonu samozagęszczalnego na jego przyczepność do prętów zbrojeniovych. W betonach HPSCC występuje tendencja wzrostu naprężeń przyczepności w elementach betonowanych od dołu wobec tych od góry. Podawanie mieszanki od dołu powoduje wzrost τ_{max} o średnio 12, 19 i 28% kolejno dla mieszanek HPSCC 0, HPSCC 5 i HPSCC 10.

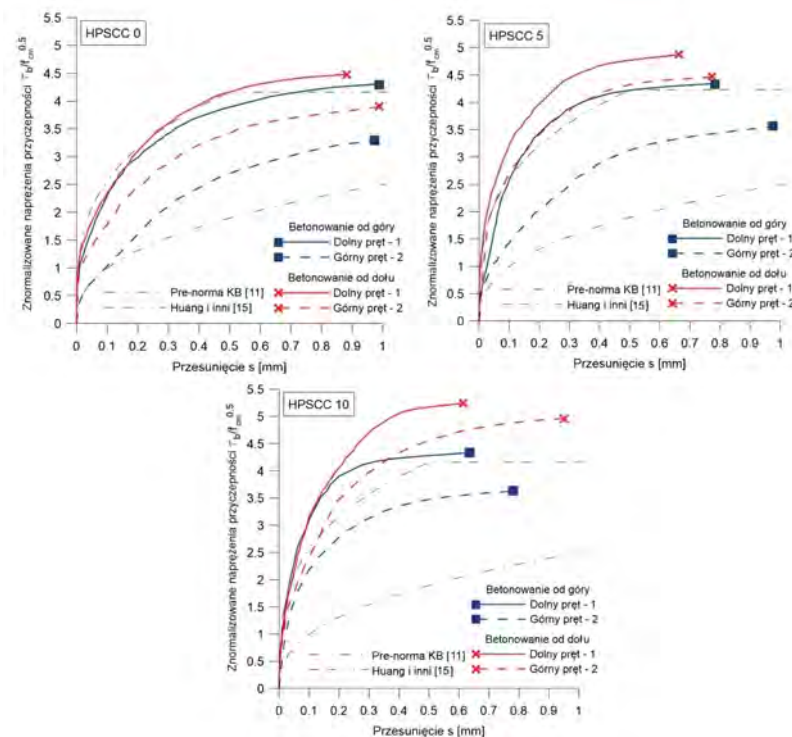
Zauważono ujednolicenie jakości warunków przyczepności wzdłuż wysokości elementu badawczego w przypadku betonowania od dołu. Średnia redukcja τ_{max} w przecię górnym wobec pręta dolnego wyniosła 8%. Podawanie mieszanki z góry powoduje większą redukcję przyczepności, średnio 19%.

Zalecane jest przeprowadzenie dalszych badań nad przedstawionym problemem w szerszym spektrum przypadków. Potwierdzenie korzystnego wpływu betonowania od dołu na przyczepność stal–beton pozwoli na ograniczenie zużycia stali zbrojeniovej związane-

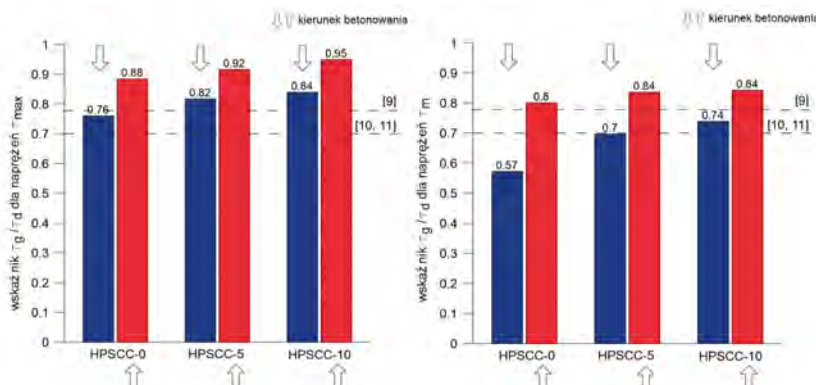
go m.in. ze skróceniem długości zakotwienia zbrojenia zlokalizowanego w strefie „słabych” warunków przyczepności. ■

Bibliografia

- [1] Szwabowski J., Golaszewski J., Technologia betonu samozagęszczalnego, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.
- [2] Castel A., Vidal T., Viriyametant K., Francois R., Effect of reinforcing bar orientation and location on bond with self-consolidating concrete. *ACI Structural Journal*. 2006, Vol.103, No.4, s.559-567.
- [3] Desnerck P., De Schutter G., Taerwe L., Bond behaviour of reinforcing bars in self-compacting concrete: experimental determination by using beam tests. *Materials and Structures*. 2010, Vol.43, s.53-62.
- [4] Hassan A.A.A., Hossain K.M.A., Lachemi M., Bond strength of deformed bars in large reinforced concrete members cast with industrial self-consolidating concrete mixture. *Construction and Building Materials*. 2009, Vol.24, s.520-530.
- [5] Dybel P., Furtak K., The effect of ribbed reinforcing bars location on their bond with high-performance concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015, Vol.15, No.4, s.1070-1077.
- [6] Dybel P., Furtak K., Influence of silica fume content on the quality of bond conditions in high-performance concrete specimens. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017, Vol.17, No.4, s.795-805.
- [7] Trezós K. G., Sfikas I.P., Pasiós C. G., Influence of water-to-binder ratio on top-bar effect and on bond variation across length in Self-Compacting Concrete specimens. *Cement & Concrete Composites*. 2013, Vol.48, s.127-139.
- [8] Valcuende M., Parra C., Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*. 2009, Vol.23, s.162-170.
- [9] ACI 318. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2011.
- [10] EN 1992. Design of concrete structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization, 2008.
- [11] FIB Bulletin No. 65. Model Code 2010. Final draft Volume 1, 2012.
- [12] RILEM TC, RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, RC 6 Bond Test for Reinforcement Steel. Pull-Out Test, 1983. E&FN SPON, 1994.
- [13] EN 12930-3. Testing hardened concrete. Compressive Strength of test specimens, 2009.
- [14] Pędziwiatr J., Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetonowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
- [15] Huang Z., Engström B., Magnusson J., Experimental investigation of the bond and anchorage behaviour of deformed bars in high strength concrete. In: Report 94:4. Chalmers, Chalmers University of Technology, 1996.



Rys. 3. Zależności $\tau_b / f_{cm}^{0.5} - s$ dla poszczególnych betonów
Fig. 3. Normalized bond stresses vs. slip of each mixture



Rys. 4. Wskaźnik uwzględniający efekt top-bar τ_t / τ_b
Fig. 4. Top-to-bottom bond stress ratio

ABSTRACT: INFLUENCE OF CASTING DIRECTION ON BOND TO STEEL REINFORCING BARS IN SELF-COMPACTING CONCRETE

The paper analyses the impact of casting direction of self-compacting concrete (SCC) on its bond quality to steel reinforcing bars. Tests were performed on high performance self-compacting concretes with different amount of silica fume to cement mass. Experiment was carried out on 480 mm height specimens, which allowed determining changes of bond condition along its height. The ribbed reinforcing bars have been placed perpendicularly to the direction of casting. Casting was performed from two points – from the bottom and the top of the form. Research has shown that casting from the bottom of the form improves bond strength and quality.

Key words: bond, top-bar effect, self-compacting concrete, pull-out test, casting direction