

Piotr DYBEŁ*

Politechnika Krakowska

WPLYW GEOMETRII ORAZ POŁOŻENIA ZBROJENIA W CZASIE BETONOWANIA NA PRZYCZEPNOŚĆ W BETONACH WYSOKOWARTOŚCIOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ geometrii oraz położenia zbrojenia w czasie betonowania na przyczepność w betonach wysokowartościowych. Zakres pracy obejmował zaprojektowanie składu mieszanki betonowej, która zapewniała uzyskanie betonu klasy C50/60. Wykonano także specjalne próbki różniące się między sobą średnicą, rodzajem powierzchni i położeniem zbrojenia w czasie betonowania. Analizę postawionego problemu oparto na wynikach badań własności wytrzymałościowych zaprojektowanego betonu oraz na badaniach granicznych wartości naprężeń przyczepności, wykonanych klasycznym testem pull-out.

INFLUENCE OF THE GEOMETRY AND THE POSITION OF A REINFORCING BAR DURING THE PROCESS OF CONCRETING ON THE BOND IN HIGH STRENGTH CONCRETE

Summary. In this paper, the influence of both the geometry and the position of a reinforcing bar during the process of concreting on the bond in high strength concrete is discussed. The scope of the paper was to design concrete mixture which gave C50/60 class concrete. Special specimens with different diameter, type of surface and positions of reinforcement were made. The analysis of the problem is based on the results of strength property tests of the designed concrete as well as those of the classic pull-out bond strength test.

1. Wprowadzenie

Z powodu dużej trwałości i wytrzymałości beton wysokowartościowy znalazł szerokie zastosowanie w projektach konstrukcyjnych. Beton ten jest niewątpliwie wysoko rozwiniętym technicznie materiałem, którego potencjał nie został jeszcze całkowicie zbadany. Projektowanie i badanie cech wytrzymałościowych BWW

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak.

rozwijają się bardzo dynamicznie, analiza zagadnień przyczepności zostaje jednak daleko w tyle. Wszystkie zależności i modele stosowane dotychczas do betonów konwencjonalnych są automatycznie przenoszone na betony nowej generacji. Obydwa rodzaje betonów różnią się jednak znacznie nie tylko wytrzymałością, ale i strukturą oraz sposobem zachowania się pod obciążeniem. Uzależnienie naprężenia przyczepności jedynie od jednego parametru, jakim jest wytrzymałość na rozciąganie lub ściskanie betonu, w przypadku BWW może okazać się błędne. Wynika to z nieproporcjonalnej zależności między tymi wielkościami.

W wyniku odmiennej mikrostruktury i właściwości BWW konieczne jest sprawdzenie istniejących reguł projektowania, które obecnie bazują na badaniach wykonanych tylko dla betonów zwykłych.

2. Program badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie wartości granicznych naprężeń przyczepności w betonach wysokowartościowych oraz zbadanie wpływu geometrii oraz położenia zbrojenia w czasie betonowania na te naprężenia.

W ramach pracy badawczej wykonano próbki sześciennie o wymiarach $150 \times 150 \times 150$ mm, w których zabetonowano pręty zbrojeniowe. Stworzono sześć modeli badawczych różniących się między sobą:

- średnicą zabetonowanych prętów, $\varnothing 8$ mm i $\varnothing 22$ mm,
- rodzajem powierzchni zbrojenia, gładkie (A-0, St0S-b) i żebrowane (A-III, 34GS),
- orientacją prętów względem kierunku betonowania (dotyczy średnicy $\varnothing 22$ mm).

Badania przyczepności wykonano klasycznym testem pull-out w uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Dodatkowo wykonano badania wytrzymałości betonu na ściskanie, rozciąganie w próbie rozłupywania oraz wyznaczono moduł sprężystości betonu. Wszystkie badania wykonano po 28 dniach dojrzewania betonu w warunkach laboratoryjnych.

3. Opis badań

3.1. Właściwości wytrzymałościowe badanego betonu

Mieszanka betonowa użyta do badań została wykonana przez specjalistyczną wytwórnię mas betonowych. Skład mieszanki betonowej został dobrany na podstawie założonej wytrzymałości kostkowej na ściskanie rzędu 60 MPa [5, 6, 8]. Określenie cech wytrzymałościowych badanego betonu przeprowadzono zgodnie z zaleceniami PN-EN 12390 [10, 11, 12, 13].

Tabela 1

Skład mieszanki BWB

Składniki	kg/m ³
Cement portlandzki CEM I 42,5R	470
Grys bazaltowy 2÷8 mm	577
Grys bazaltowy 8÷16 mm	709
Piasek płukany 0÷2 mm	570
Mikrokrzemionka	30
Superplastyfikator	10
Woda	170
w/(c+krzemionka)	0,34

Tabela 2

Wytrzymałościowe cechy betonu

Wiek betonu [dni]	$f_{c,cube}$ [MPa]	$f_{c,cyl}$ [MPa]	f_{ctm} [MPa]	E_{cm} [GPa]	$f_{ctm} / f_{c,cube}$ [%]
28	63,1	49,1	4,0	37,7	6,3

Wytrzymałość na rozciąganie badanego betonu wzrasta wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie, jednakże wzrost ten nie jest wprost proporcjonalny. Wytrzymałość na rozciąganie wyniosła 6,3% $f_{c,cube}$, podczas gdy dla betonów zwykłych przyjmuje się 10% [6]. Oznacza to, że badany beton cechuje się większą kruchością niż beton zwykły [3]. Powierzchnia przełomu próbek poddanych badaniu wytrzymałości na ściskanie sugeruje, że zniszczenie betonu przechodzi przez ziarna kruszywa, a nie przez strefę przejściową między zaczynem cementowym a kruszywem, tak jak w betonach zwykłych.

Wytrzymałość na ściskanie, określona na próbkach kostkowych 150×150×150 mm i na próbkach walcowych Ø150/300 mm, jest adekwatna do klasy wytrzymałościowej C50/60 [9].

3.2. Badanie przyczepności stali do BWW

Do badania przyczepności zastosowano klasyczną metodę pull-out, która polega na wyciąganiu z pryzmy betonowej zabetonowanego w niej pręta zbrojeniowego [4, 7]. Badanie to jest stosunkowo proste i obrazuje układ, w którym beton poddany jest ścisłaniu, a stal rozciąganiu. Model ten odpowiada kotwieniu prostego zbrojenia w strefie ścisłanej betonu. W czasie badania dokonuje się pomiaru poślizgu nieobciążonego końca pręta i ustala odpowiadającą temu momentowi siłę. W modelu badawczym przyjęto długość zakotwienia prętów równą 5 cm.

W przeprowadzonych badaniach jako kryterium utraty przyczepności przyjęto, według danych literaturowych, przesunięcie swobodnego końca pręta o $\Delta l = 0,01$ mm [1, 2]. Na podstawie zarejestrowanej siły odpowiadającej temu przesunięciu oraz maksymalnej siły wyrwującej pręt określono wartości naprężeń przyczepności, odpowiednio $\tau_{0,01}$ i τ_p . Do pomiaru poślizgu zbrojenia wykorzystano zamocowany w specjalnym uchwycie, trwale przymocowany do badanej próbki czujnik zegarowy o dokładności pomiaru 0,001 mm. Zapewniało to poprawny odczyt wielkości poślizgu pręta w stosunku do powierzchni betonu próbki. W badaniach nie korzystano z automatycznej rejestracji poślizgu, jednak pomiar prowadzono bez zatrzymania przyrostu obciążenia na odczyt i zapis wyniku, starając się utrzymać podobną dla poszczególnych elementów prędkość obciążania.

Naprężenia przyczepności τ w strefie zakotwienia obliczono ze wzoru:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot l_k} \quad (1)$$

gdzie: F – siła działająca na pręt zbrojeniowy, l_k – długość odcinka przyczepności, d – średnica pręta zbrojeniowego.

Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci naprężeń $\tau_{0,01}$, odpowiadających chwili naruszenia równowagi, i τ_p , występujących w chwili wyrwania pręta.

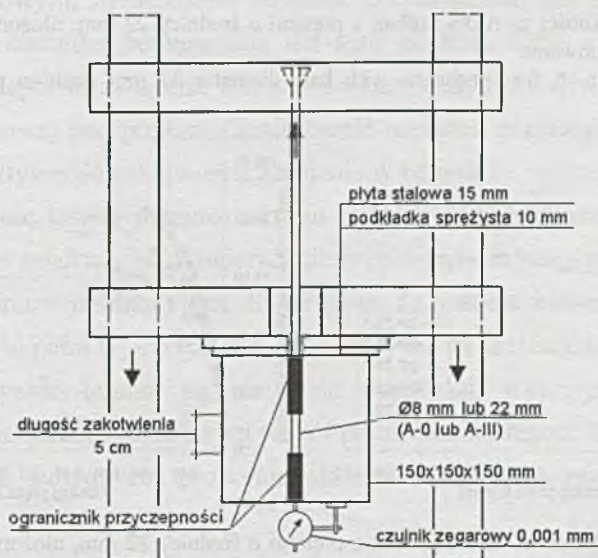
Przyjęto następującą metodykę oznaczenia próbek:

- G/Ż – próbka z prętem gładkim/żebrowanym,
- R/P – położenie zbrojenia względem betonowania równoległe/prostopadłe,
- 8/22 – średnica pręta odpowiednio Ø8/ Ø22 mm,
- 1, 2, 3, ... – kolejne numery próbek.

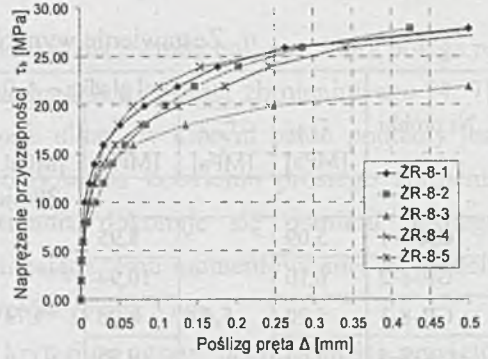
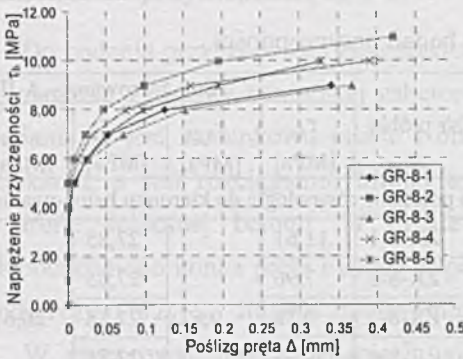
Tabela 3

Zestawienie wyników badań przyczepności

Nr próbki	Stal gładka – A-0				Nr próbki	Stal żebrzana – A-III			
	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\overline{\tau}_{0,01}$ [MPa]	τ_p [MPa]	$\overline{\tau}_p$ [MPa]		$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\overline{\tau}_{0,01}$ [MPa]	τ_p [MPa]	$\overline{\tau}_p$ [MPa]
Zbrojenie położone równoległe do kierunku betonowania									
GR-8-1	5,09	5,40	8,95	9,74	ŻR-8-1	11,61	9,62	27,85	26,67
GR-8-2	6,10		10,94		ŻR-8-2	7,96		27,85	
GR-8-3	5,20		8,95		ŻR-8-3	9,38		21,88	
GR-8-4	5,64		9,95		ŻR-8-4	9,95		27,85	
GR-8-5	4,97		9,95		ŻR-8-5	9,18		27,85	
GR-22-1	7,20	7,02	9,26	9,34	ŻR-22-1	11,57	10,99	21,70	24,02
GR-22-2	6,5		8,68		ŻR-22-2	11,57		21,70	
GR-22-3	7,91		9,84		ŻR-22-3	11,57		26,04	
GR-22-4	6,94		9,26		ŻR-22-4	10,13		26,04	
GR-22-5	6,56		9,84		ŻR-22-5	10,13		24,6	
Zbrojenie położone prostopadłe do kierunku betonowania									
GP-22-1	7,87	6,42	10,42	8,33	ŻP-22-1	12,73	10,82	20,83	20,08
GP-22-2	5,02		5,79		ŻP-22-2	10,93		20,26	
GP-22-3	6,94		8,68		ŻP-22-3	8,68		20,26	
GP-22-4	6,37		8,68		ŻP-22-4	10,39		21,70	
GP-22-5	5,90		8,10		ŻP-22-5	11,37		17,36	

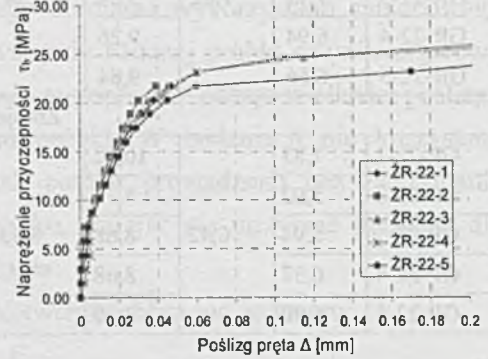
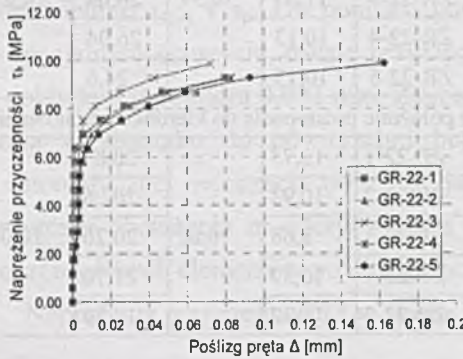


Rys. 1. Schematyczny widok badania typu pull-out
 Fig. 1. Schematic view of pull-out test



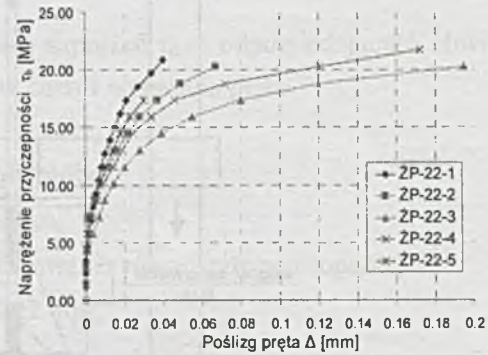
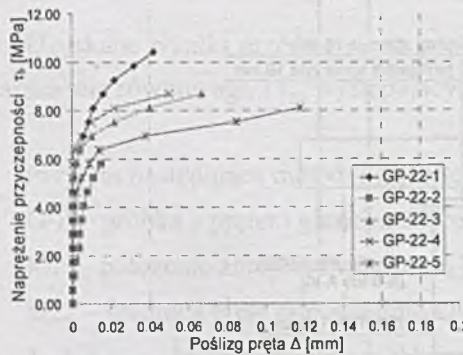
Rys. 2. Wykresy zależności $\tau_b-\Delta$ dla próbek z prętami o średnicy 8 mm, ułożonymi równoległe do kierunku betonowania

Fig. 2. Diagrams of $\tau_b-\Delta$ for specimens with bars diameter 8 mm position parallel to concrete direction



Rys. 3. Wykresy zależności $\tau_b-\Delta$ dla próbek z prętami o średnicy 22 mm, ułożonymi równoległe do kierunku betonowania

Fig. 3. Diagrams of $\tau_b-\Delta$ for specimens with bars diameter 22 mm position parallel to concrete direction



Rys. 4. Wykresy zależności $\tau_b-\Delta$ dla próbek z prętami o średnicy 22 mm, ułożonymi prostopadle do kierunku betonowania

Fig. 4. Diagrams of $\tau_b-\Delta$ for specimens with bars diameter 22 mm position perpendicular to concrete direction

4. Wnioski

Większa kruchość BWW niż betonów zwykłych może nie mieć większego znaczenia w konstrukcjach budowlanych i inżynierskich. Rysy i pęknięcia w elementach konstrukcyjnych zależą bowiem nie tylko od kruchości materiału i jego wytrzymałości na rozciąganie, ale przede wszystkim od występujących sił rozciągających, wynikających z przyłożonych obciążeń i warunków swobody odkształceń.

W przypadku prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm uzyskano większe naprężenia przyczepności w porównaniu do zbrojenia o średnicy 22 mm. Na poprawę przyczepności w przypadku małych średnic znacząco wpływa skurcz betonu.

Naprężenia przyczepności w BWW zasadniczo zależą od rodzaju powierzchni zbrojenia. W próbkach z prętami żebrowanymi uzyskano prawie 3-krotnie większe wartości naprężeń niż w próbkach z prętami gładkimi. W początkowym okresie obciążania pręta zarówno zbrojenie żebrowane, jak i gładkie pracują podobnie. Czynnikiem wpływającym na zjawisko przyczepności w tym etapie jest przyciąganie międzycząsteczkowe, występujące na styku stali i betonu (adhezja). W miarę zwiększania obciążenia zaczyna pojawiać się znaczna różnica w przebiegu charakterystyk. Decydujący wpływ zaczyna odgrywać zjawisko ścinania.

Zgodnie z przedstawionymi wynikami badań, orientacja zbrojenia względem kierunku betonowania ma wpływ na naprężenia przyczepności w betonie wysokowartościowym. Stwierdzono redukcję przyczepności dla prętów położonych prostopadle do kierunku betonowania dla stali gładkiej 12%, a żebrowanej 20%. Mniejsza przyczepność związana jest z procesami sedymentacji i osiadania świeżej mieszanki betonowej pod prętem. Zmniejszenie naprężeń przyczepności prowadzi do pogorszenia efektywności zakotwienia zbrojenia w betonie.

Po zakończeniu testów przeprowadzono badania stanu powierzchni żebrowanych prętów w rejonie zakotwienia. Powierzchnie prętów były czyste i nie zaobserwowano zniszczenia betonu w pobliżu żeber. Sugeruje to, że nośność betonu na ściskanie pod żebrami nie jest w pełni wykorzystana. Wcześniej niż miażdżenie betonu pod żebrami następuje rozłupanie betonu na obwodzie żeber lub wyczerpanie nośności na rozciąganie w pierścieniu betonowym wokół pręta, zatem długość kotwienia zbrojenia nie powinna być zredukowana proporcjonalnie do wzrostu wytrzymałości BWW na ściskanie.

BIBLIOGRAFIA

1. Azizinamini A., Stark M., Roller J.J., Ghosh S.K.: Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 5, 1993, p. 554-561.
2. De Larrard F., Schaller I., Fuchs J.: Effect of Bar Diameter on the Bond Strength of Passive Reinforcement in High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 4, 1993, p. 333-339.
3. Flaga K., Mierzwa J.: Betony o dużej trwałości i wysokiej wytrzymałości (HSC) jako realizacja nowej materiałowo-technologicznej koncepcji kompozytu konstrukcyjnego. *Przegląd Budowlany*, nr 8-9, 1992, s. 342-345.
4. Holschemacher K., Dehn F., Weiße D.: Influence of the Rebar Position on the Bond Behaviour in High Strength Concrete. *Leipzig annual civil engineering report*, No. 7, 2002, p. 135-144.
5. Jamróży Z.: *Beton i jego technologie*. PWN, Warszawa 2005.
6. Kucharska L., Brandt A.M.: Skład, technologia i właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 9, 1993, s. 356-360.
7. Pędziwiatr J.: *Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
8. Rajski O.: Propozycja doboru składu mieszanek betonów wysokowartościowych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 2, 1996, s. 101-102.
9. PN-EN 206-1:2003 „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”. PKN, Warszawa 2003.
10. PN-EN 12390-1:2001 „Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form”. PKN, Warszawa 2001.
11. PN-EN 12390-2:2000 „Badania betonu. Część 2: Wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”. PKN, Warszawa 2001.
12. PN-EN 12390-3:2002 „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania”. PKN, Warszawa 2002.
13. PN-EN 12390-6:2000 „Badanie betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania”. PKN, Warszawa 2001.