

dr inż. Andrzej Śliwka^{1*)}

ORCID: 0000-0002-1638-7946

dr inż. Barbara Wieczorek¹⁾

ORCID: 0000-0002-6068-4753

dr inż. Mirosław Wieczorek¹⁾

ORCID: 0000-0002-6002-5221

Zależność pomiędzy przyrostem wytrzymałości na ściskanie i granicznymi naprężeniami przyczepności w okresie dojrzewania betonu – weryfikacja założeń EC2

The relationship between the increase in compressive strength and the limit stresses of adhesion during the concrete curing period – verification of EC2 assumptions

DOI: 10.15199/33.2024.03.02

Streszczenie. Podjęto badania w celu weryfikacji określania granicznych naprężeń przyczepności na podstawie chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie w okresie jego dojrzewania. Przedstawiono wyniki badań przyczepności prętów gładkich do betonu, które wskazują na rozwój przyczepności w okresie dojrzewania betonu proporcjonalny do rozwoju wytrzymałości na ściskanie. Porównano wyniki badań z wynikami obliczeń z wykorzystaniem wzorów empirycznych przedstawionych w EC2.

Słowa kluczowe: beton; dojrzewanie; przyczepność; stal; wytrzymałość.

Abstract. Research was undertaken to verify the possibility of determining the limit stresses of adhesion on the basis of the instantaneous compressive strength of concrete during the maturation period. The results of tests on the adhesion of smooth bars to concrete are presented. Research indicates that the development of adhesion during the concrete maturation period is proportional to the development of compressive strength. The test results were compared with the results of calculations using the empirical formulas presented in EC2.

Keywords: concrete; curing; adhesion; steel; strength.

Zelbet i beton sprężony to jedne z głównych materiałów budowlanych, wykorzystywanych do wykonywania elementów konstrukcyjnych oraz całych konstrukcji. Główną ich zaletą jest bardzo dobre przenoszenie sił rozciągających przez zbrojenie oraz sił ściskających przez beton. Wzajemną ich współpracę zapewnia dobra przyczepność stali do betonu [1]. W przypadku sprężenia umożliwia stosowanie zakotwień biernych przyczepnościowych.

Przyczepność stali do betonu zależy od wielu czynników. W przypadku stali żebrowanej głównym mechanizmem jest zazębienie się prętów zbrojeniowych w betonie, na co wskazano m.in. w [2]. Pozostałe czynniki decydujące o przyczepności, odgrywające główną rolę w przenoszeniu naprężeń pomiędzy stalą gładką a betonem, to tarcie między materiałami, zjawisko adhezji, wytrzymałość na

rozciąganie, skurcz betonu, szczelność zczynu cementowego oraz grubość otuliny, co szczegółowo opisano w [3]. Na przyczepność pomiędzy stalą a betonem wpływa również stan powierzchni stali oraz pielęgnacja betonu, a w czasie użytkowania konstrukcji również jej temperatura.

W wytycznych normowych najczęściej zaleca się, aby zakotwienie stali w betonie było zapewnione przez wzajemną przyczepność pomiędzy powierzchnią boczną pręta a betonem (przy prętach gładkich) lub zazębienie się żeberka pręta o beton (pręty żebrowane). W obu przypadkach wiąże się to z zastosowaniem odpowiedniej długości zakotwienia pręta zbrojeniowego w betonie.

Projektując konstrukcje z betonu zbrojonego lub sprężonego, przyjmuje się, że konstrukcja będzie obciążona po określonym czasie od momentu ułożenia betonu. W tym czasie beton ma osiągnąć odpowiednie parametry wytrzymałościowe, które pozwalają na obciążenie konstrukcji (np. w wyniku kontynuacji prac, sprężeniem lub obciążeniami docelowymi).

Przyjmuje się, że osiągnięcie 80% wytrzymałości 28-dniowej betonu pozwala na kontynuację prac. Obciążenie konstrukcji przed osiągnięciem przez beton odpowiedniej wytrzymałości może prowadzić do awarii bądź katastrofy budowlanej, o czym wspomnieli autorzy pracy [4].

Chcąc uniknąć takich sytuacji, prowadzi się badania wbudowanego betonu. Standardowo wykonywane są badania wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach pobranych w czasie betonowania. W przypadku wątpliwości dotyczących zgodności wytrzymałości betonu uzyskanej w badaniach na próbkach z wytrzymałością w konstrukcji można wspomóc się badaniami betonu wbudowanego. W celu zminimalizowania liczby badań w konstrukcji można wspomóc się metodą COMA-Meter [5], która pozwala na określenie dojrzałości betonu w konstrukcji w odniesieniu do krzywej obrazującej przyrost wytrzymałości w warunkach laboratoryjnych. W warunkach budowy inne cechy mechaniczne są badane rzadko, w szcze-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: andrzej.sliwka@polsl.pl

gólnych sytuacjach. Oprócz zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie, jednym ze sposobów zapewniających bezpieczną pracę konstrukcji i kontynuowanie prac jest właściwe zakotwienie zbrojenia i stali sprężającej w przypadku zakotwienia przyczepnościowego. Parametrem decydującym o właściwym zakotwieniu jest przyczepność pomiędzy stalą a betonem, która zależy od wielu czynników przedstawionych w [6].

Normy, w tym Eurokod 2 [7], pozwalają na określenie granicznych naprężeń przyczepności pomiędzy betonem i stalą na podstawie wytrzymałości betonu na rozciąganie, którą można określić, dysponując wytrzymałością betonu na ściskanie. Zależności pozwalające na wyznaczenie wytrzymałości betonu na rozciąganie na podstawie jego wytrzymałości na ściskanie oraz jej przyrost w czasie dojrzewania betonu były przedmiotem wielu badań i ujęte są również w normach [7]. Prowadzone są liczne badania, przedstawione w [1, 4, 8 ÷ 14], jak w wypadku nowych rodzajów betonów oraz stosowanych domieszek lub dodatków rozwija się wytrzymałość betonu lub jak wybrane czynniki na nią wpływają. Spośród tych prac jedynie autorzy [4, 8, 9] dostrzegli i przedstawili problem przyrostu granicznych naprężeń przyczepności, a problem zależności od wytrzymałości betonu na ściskanie został dostrzeżony w pracach [4, 8].

Przyrost przyczepności w czasie dojrzewania betonu może nie być proporcjonalny do przyrostu wytrzymałości na rozciąganie, a tym bardziej na ściskanie betonu. Normowe określenie przyczepności na podstawie zbadanej wytrzymałości betonu na ściskanie może prowadzić do jej przeszacowania, a w efekcie do znacznego uszkodzenia konstrukcji na skutek zbyt wczesnego obciążenia konstrukcji, na co zwrócono uwagę w pracy [4]. To przeszacowanie może być spowodowane np. innymi warunkami dojrzewania betonowych próbek (najczęściej przechowywanych w miejscach osłoniętych od warunków atmosferycznych) oraz betonu znajdującego się w konstrukcji.

Celem badań prezentowanych w artykule było wstępne określenie, czy przyczepność we wczesnym stadium dojrze-

wania betonu jest proporcjonalna do chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie i czy może być określana na jej podstawie ze wzorów normowych. Ponadto określono, czy i w jakim zakresie zmiany ulegają wartości granicznych naprężeń przyczepności po dłuższym okresie twardnienia betonu niż 28 dni.

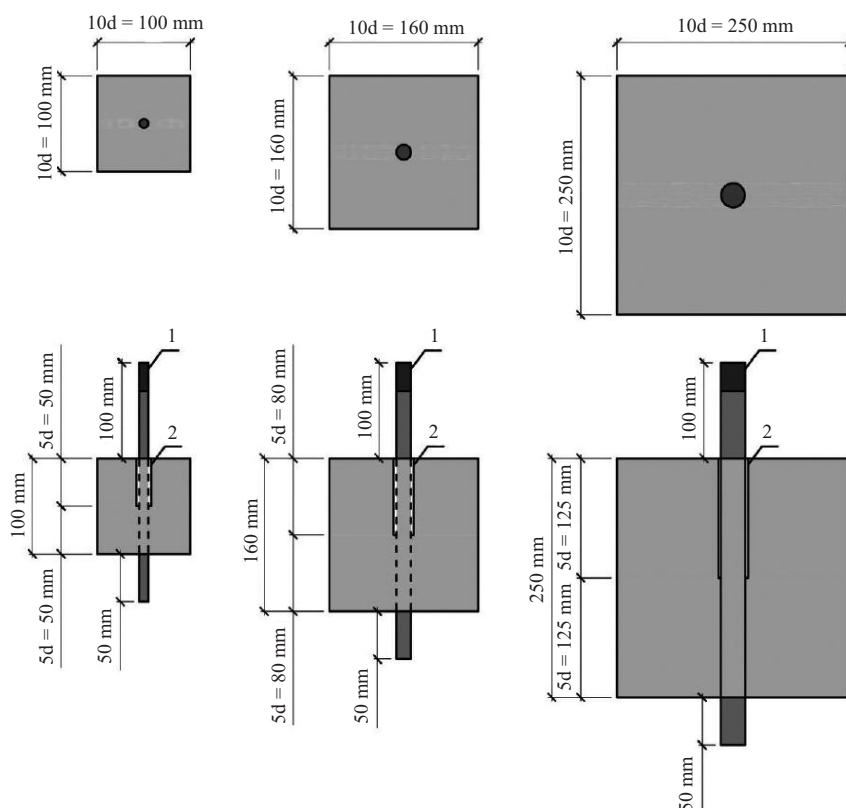
Elementy do badań

Elementy przygotowane do badań przedstawiono na rysunku 1. Kształt próbek, wg rekomendacji [15], pozwala na prosty pomiar zależności obciążenia F oraz przemieszczenia Δ , co zmniejsza ryzyko błędu. Przy przyjętym kształcie próbek można również założyć, że o zniszczeniu badanego elementu zdecyduje jedynie zniszczenie przez poślizg pręta w betonie, a wartość naprężeń przyczepności będzie stała na całym odcinku zakotwienia. Przyjęta metoda badawcza ma pewne wady, m.in. beton jest ściskany, a stal rozciągana, a bardzo krótki odcinek zakotwienia uniemożliwia powstanie rys wewnętrznych, co może prowadzić do zawyżenia wartości siły wrywającej. Zwrócono na nie uwagę w [16].

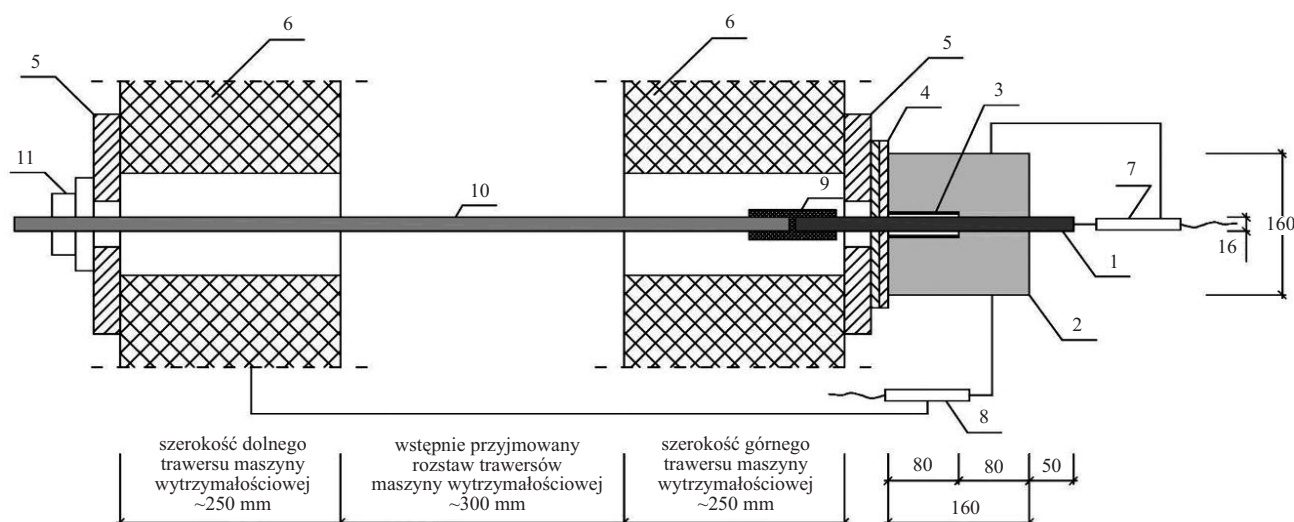
W ramach prowadzonych badań wykonano trzy rodzaje modeli badawczych, różniących się średnicą pręta zbrojeniowego (pręty $\phi 10$, $\phi 16$, $\phi 25$ – wymiary próbek dobrano na podstawie wytycznych RILEM [15] – rysunek 1). Przyjęto średnice najczęściej stosowane w przypadku zbrojenia głównego, które może być kotwione przyczepnościowo. W celu uniknięcia wpływu ząbienia się prętów żebrowanych w betonie, pomimo stosowania praktycznie tylko takiego zbrojenia, w prezentowanych badaniach zastosowano pręty gładkie.

Stanowisko i materiały do badań

Badania przeprowadzono wg wytycznych [15] w maszynie wytrzymałościowej. Każdy z elementów był badany w pozycji pionowej. Przed rozpoczęciem badań zerowano wskazania wartości obciążenia, co umożliwiała uwzględnienie w pomiarach masy badanego elementu. Następnie podłączano indukcyjne czujniki przemieszczeń. Czujnik PJX 5 (nr 7 wg rysunku 2) o zakresie pomiarowym $\pm 2,5$ mm służył do pomiaru



Rys. 1. Elementy do badań wg Rilem [15]: 1 – gwint o długości 30 mm; 2 – rura PVC
Fig. 1. Test elements, according to Rilem [15]: 1 – thread 30 mm long; 2 – PVC pipe



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań (wymiary próbek z prętami $\varnothing 16$ mm): 1 – badany element; 2 – pręt; 3 – rurka PVC o średnicy wewnętrznej $\sim 3 - 4$ mm większej od średnicy badanego pręta; 4 – warstwa poślizgowa składająca się z gumy z EPDM grubości 6 mm oraz płyty teflonowej PTFE grubości 8 mm; 5 – blacha stalowa grubości 30 mm; 6 – trawers maszyny wytrzymałościowej; 7 – czujnik indukcyjny do pomiaru przemieszczeń w początkowej fazie badań o zakresie pomiarowym $\pm 2,5$ mm; 8 – czujnik indukcyjny do pomiaru przemieszczeń w czasie wyciągania pręta z modelu; 9 – stalowy element łącznikowy; 10 – pomocniczy element gwintowany; 11 – blokada elementu pomocniczego

Fig. 2. Scheme of the test stand (dimensions for samples with $\varnothing 16$ mm rods): 1 – test element; 2 – rod; 3 – PVC pipe with an internal diameter $\sim 3 - 4$ mm larger than the diameter of the tested rod; 4 – slip layer consisting of rubber with a thickness 6 mm made of EPDM and 8 mm thick PTFE plate; 5 – 30 mm thick steel sheet; 6 – traverse of the testing machine; 7 – inductive sensor for measuring displacements in the initial phase of testing with a measurement range of $\pm 2,5$ mm; 8 – inductive sensor for measuring displacements when pulling the bar out of the model; 9 – steel connecting element; 10 – auxiliary threaded element; 11 – locking of the auxiliary element

przemieszczeń w pierwszej fazie badań tzn. przy przemieszczeniu do 1,0 mm. Pomiar był wykonywany na swobodnym końcu badanego pręta. Po przekroczeniu wartości przemieszczeń 1,0 mm dalszy ich odczyt wykonywano za pomocą czujnika PJX 200 (nr 8 wg rysunku 2). Badania prowadzono do uzyskania przemieszczeń o wartości 150 mm.

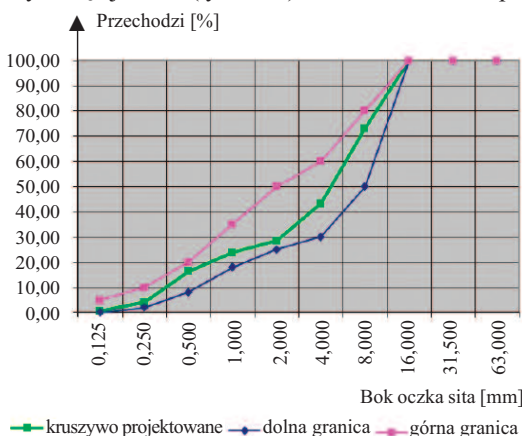
Elementy próbne wykonano z betonu zwykłego na bazie cementu żuźlowego i kruszywa o maksymalnej średnicy ziaren wynoszącej 16 mm (rysunek 3). Zastosowa-

no cementu CEM III/A 42,5 N – LH, którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1, a skład mieszanki betonowej w tabeli 2.

W celu określenia **wytrzymałości na ściskanie** próbki betonu badano w tym samym dniu, w którym elementy próbne, zgodnie z zaleceniami PN-EN 12390-3:2011 [17] i PN-EN 12390-6:2011 [18]. W tabeli 3 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości betonu na ściskanie określone na podstawie badań sześciu próbek, a na rysunku 4 zmianę wytrzymałości betonu w czasie.

Wyniki badań i ich analiza

W ramach badań dokonywano pomiaru przemieszczeń pręta względem betonowego bloku w funkcji przykładanego obciążenia. Na rysunku 5 zamieszczono zależność wartości siły F w funkcji wysuwu pręta Δ . W przypadku każdego rodzaju modelu wykonywano w danym dniu badanie sześciu próbek. Następnie, wg zaleceń zawartych w opracowaniu [19], odczytywano wartość obciążenia po-



Rys. 3. Krzywa przesiewu kruszywa zastosowanego w mieszance betonowej

Fig. 3. Sieving curve of the aggregate used in the concrete mix

Tabela 1. Skład chemiczny cementu*

Table 1. Chemical composition of cement*

Składnik	Zawartość [%]
SiO ₂	30,1
Al ₂ O ₃	6,4
Fe ₂ O ₃	1,7
CaO	52,8
MgO	3,9
SO ₃	2,3
Na ₂ O	0,3
K ₂ O	0,6
Cl	0,1
Straty prażenia	1,0
Części nierozpuszczalne	0,5

* dane producenta

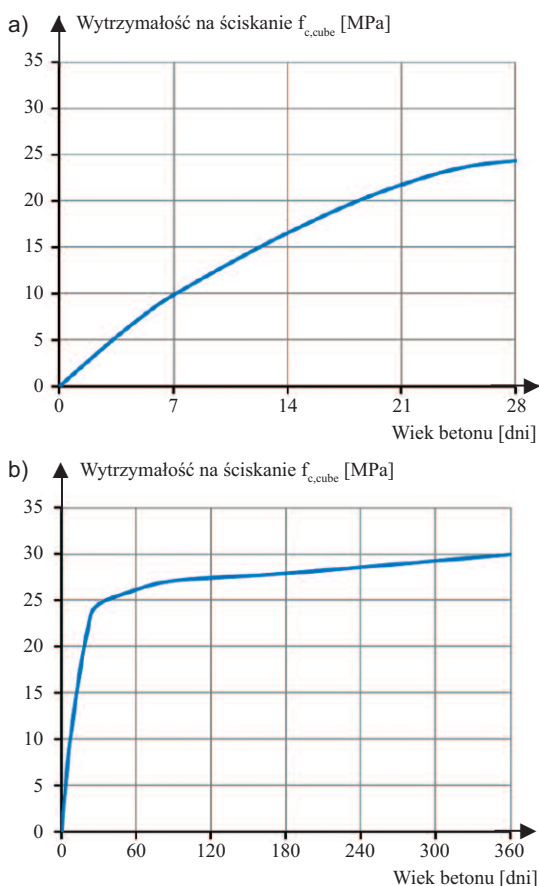
Tabela 2. Skład mieszanki betonowej

Table 2. The composition of the concrete mix

Składnik	Ilość [kg/m ³]
Cement CEM III/A 42,5 N – LH	274
Woda	154
Piasek rzeczny 0 – 2 mm	571
Żwir 2 – 4 mm	295
Żwir 4 – 8 mm	600
Żwir 8 – 16 mm	542

Tabela 3. Średnie wartości wytrzymałości betonu na ściskanie
Table 3. Average values of concrete compressive strength

Dni	Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ [MPa]						wartość średnia	odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności [%]
	1	2	3	4	5	6			
3	4,21	4,58	4,71	4,96	4,88	4,27	4,60	0,31	6,74
5	7,71	7,46	7,91	7,12	7,08	7,28	7,43	0,33	4,47
7	9,22	9,91	8,92	10,14	10,04	10,91	9,86	0,71	7,19
14	18,68	16,57	16,29	16,27	16,12	15,35	16,55	1,12	6,79
21	20,47	22,75	21,06	21,12	21,93	23,27	21,77	1,08	4,97
28	24,92	25,24	24,17	24,32	24,06	23,48	24,37	0,63	2,59
56	26,76	26,24	25,94	25,86	25,11	25,59	25,92	0,56	2,17
91	28,97	26,45	27,16	27,18	26,47	26,38	27,10	0,98	3,63
188	27,84	27,95	27,93	28,21	28,09	27,68	27,95	0,19	0,66
360	29,96	29,83	29,46	30,13	29,68	30,37	29,91	0,32	1,08



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu $f_{c,cube}$ w funkcji czasu: a) zakres do 28 dni; b) pełny zakres badań
Fig. 4. Concrete compressive strength of test elements $f_{c,cube}$ as a function of time: a) range up to 28 days; b) full range of tests

wodującego poślizg 0,1 mm (odpowiadającą granicznym naprężeniem przyczepności). Wartości z sześciu pomiarów były następnie uśredniane. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 4 – 6. Zamieszczone w dalszej części artykułu wykresy odnoszą się do wartości średnich.

Wartości obciążenia uzyskane w badaniach porównano z wartościami teoretycznymi wynikającymi z nośności, określonej na podstawie wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie PN-EN 1992-1-1 [7]. Na rysunku 6 zamieszczono krzywe określające:

1 – zmianę siły obciążającej badane elementy, powodującej poślizg (odpowiadającej granicznym naprężeniom przyczepności) w funkcji przyrostu wieku dojrzewania betonu – na podstawie przeprowadzonych badań;

2 – teoretyczną wartość siły niszczącej określoną na podstawie wartości naprężeń stycznych f_{bd} obliczonych wg EC2 [7] (wartość średnich naprężeń stycznych f_{bd} obliczono wg procedur zamieszczonych w EC2 z wykorzystaniem wartości wytrzymałości betonu na ściskanie ($f_{c,cube}$), która określana była w dniu badania elementów próbnych);

3 – teoretyczną wartość siły niszczącej określoną na podstawie wartości naprężeń stycznych f_{bd} obliczonych wg EC2 [7] (wartość średnich naprężeń stycznych $f_{bd} = 2,3$ MPa dotyczyła projektowanej klasy betonu próbek C20/25).

Na rysunku 7 zamieszczono krzywe określające:

1 – wartość naprężeń stycznych f_{bd} obliczonych wg EC2 [7] z wykorzystaniem chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie;

2 – graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wrywającej uzyskanej w badaniach prętów $\phi 10$;

3 – graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wrywającej uzyskanej w badaniach prętów $\phi 16$;

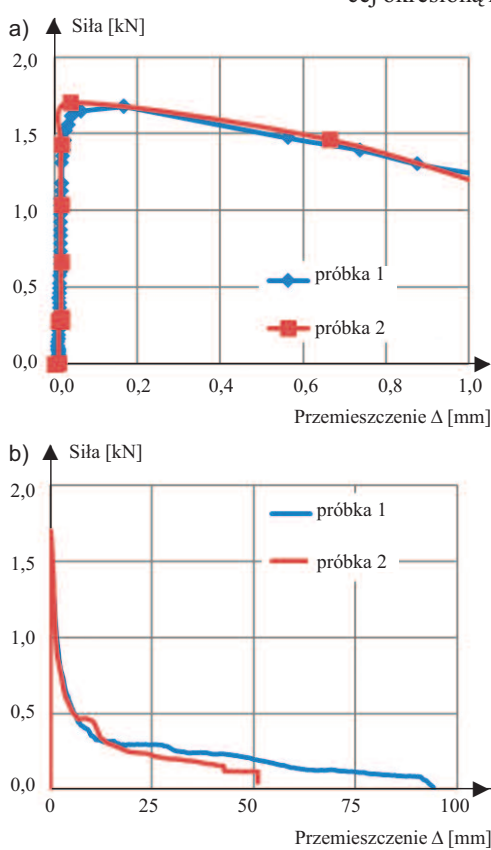
4 – graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wrywającej uzyskanej w badaniach prętów $\phi 25$;

5 – średnie graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie

siły wrywającej uzyskanej w badaniach prętów.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że:

- wartość siły wrywającej pręt z próbki określona na podstawie uzyskanych wyników obliczeń teoretycz-



Rys. 5. Wartość siły F w funkcji wysuwu pręta Δ (wiek betonu 3 dni; średnica pręta 10 mm): a) zakres do 1,0 mm; b) pełny zakres badań
Fig. 5. Value of force F as a function of bar slippage Δ (concrete age 3 days; bar diameter 10 mm): a) range up to 1.0 mm; b) full range of tests

Tabela 4. Wyniki badania przyczepności między betonem a stalą zbrojeniową – pręty $\phi 10$
 Table 4. Test results of adhesion between concrete and reinforcing steel – bars $\phi 10$

Dni	Siła wyrywająca [kN]								Współczynnik zmienności [%]
	numer próbki						wartość średnia	odchylenie standardowe	
	1	2	3	4	5	6			
3	0,81	0,83	0,97	0,80	0,85	0,83	0,85	0,06	7,43
5	1,26	1,56	1,28	1,23	1,36	1,40	1,35	0,12	8,89
7	1,74	1,54	1,70	1,65	1,73	1,82	1,70	0,10	5,66
14	2,32	2,62	2,19	2,41	2,32	2,53	2,40	0,16	6,56
21	2,84	2,73	2,76	2,44	2,59	2,74	2,68	0,14	5,37
28	3,04	3,11	2,84	2,79	2,74	2,91	2,90	0,14	4,99
56	3,29	3,83	3,38	3,23	3,15	3,20	3,35	0,25	7,47
91	3,97	3,84	3,59	3,74	3,59	3,61	3,72	0,16	4,27
188	4,22	3,68	3,72	4,19	3,92	3,70	3,90	0,25	6,34
360	4,25	4,36	4,79	4,70	4,63	4,28	4,50	0,23	5,16

Tabela 5. Wyniki badania przyczepności między betonem a stalą zbrojeniową – pręty $\phi 16$
 Table 5. Test results of adhesion between concrete and reinforcing steel – bars $\phi 16$

Dni	Siła wyrywająca [kN]								Współczynnik zmienności [%]
	numer próbki						wartość średnia	odchylenie standardowe	
	1	2	3	4	5	6			
3	4,61	4,29	4,22	4,59	4,50	4,21	4,40	0,19	4,21
5	5,77	6,39	6,16	5,97	6,38	6,29	6,16	0,25	3,99
7	7,58	7,17	7,07	7,66	6,00	7,13	7,10	0,59	8,35
14	9,37	8,64	8,13	8,01	8,14	7,60	8,31	0,61	7,37
21	7,92	9,22	7,96	8,92	8,60	9,87	8,75	0,76	8,64
28	9,74	9,13	9,01	8,65	9,37	8,73	9,10	0,41	4,46
56	10,67	8,48	9,59	9,67	10,34	11,25	10,00	0,97	9,70
91	11,34	10,98	10,48	11,43	10,97	9,58	10,80	0,68	6,32
188	10,57	10,80	12,10	11,35	11,84	10,80	11,24	0,62	5,54
360	10,75	12,08	12,26	12,98	12,38	12,99	12,24	0,82	6,72

Tabela 6. Wyniki badania przyczepności między betonem a stalą zbrojeniową – pręty $\phi 25$
 Table 6. Test results of adhesion between concrete and reinforcing steel – bars $\phi 25$

Dni	Siła wyrywająca [kN]								Współczynnik zmienności [%]
	numer próbki						wartość średnia	odchylenie standardowe	
	1	2	3	4	5	6			
3	4,86	5,54	5,07	5,98	5,06	4,72	5,21	0,47	9,06
5	7,28	6,93	6,83	7,18	7,26	7,73	7,20	0,32	4,41
7	10,13	8,13	8,01	7,57	7,44	7,22	8,08	1,06	13,12
14	8,95	9,27	9,37	10,97	10,54	10,80	9,98	0,88	8,86
21	10,89	11,83	11,37	12,31	11,06	11,98	11,57	0,56	4,80
28	12,77	12,03	14,27	13,11	13,01	13,21	13,07	0,73	5,57
56	17,23	16,73	17,53	17,09	17,39	17,73	17,28	0,35	2,04
91	18,99	20,67	20,97	19,43	19,33	20,89	20,05	0,89	4,44
188	21,89	22,91	20,67	19,98	22,19	21,86	21,58	1,07	4,95
360	23,14	24,90	22,07	22,18	21,13	21,06	22,41	1,44	6,41

nych (nr 2 wg rysunku 6) różni się od wartości uzyskanej w badaniach (nr 1 wg rysunku 6). Jest to szczególnie widoczne w początkowym okresie dojrze-

wania betonu. W pierwszych 28 dniach dojrzewania jedynie w przypadku prętów $\phi 16$ wartości przyczepności uzyskane z badań były większe od teoretycznie

określonych (nr 3 wg rysunku 7). W dłuższym okresie dojrzewania przyczepność prętów $\phi 10$ w badaniach zbliża się i przekracza wartości określone teoretycznie (nr 2 wg rysunku 7). W przypadku prętów $\phi 25$ przyczepność określona w badaniach była w całym okresie dojrzewania betonu mniejsza niż określona teoretycznie (nr 4 wg rysunku 7) i dopiero w końcowym okresie badań osiągnęła wartość określoną w przypadku projektowanej klasy betonu (nr 3 wg rysunku 6);

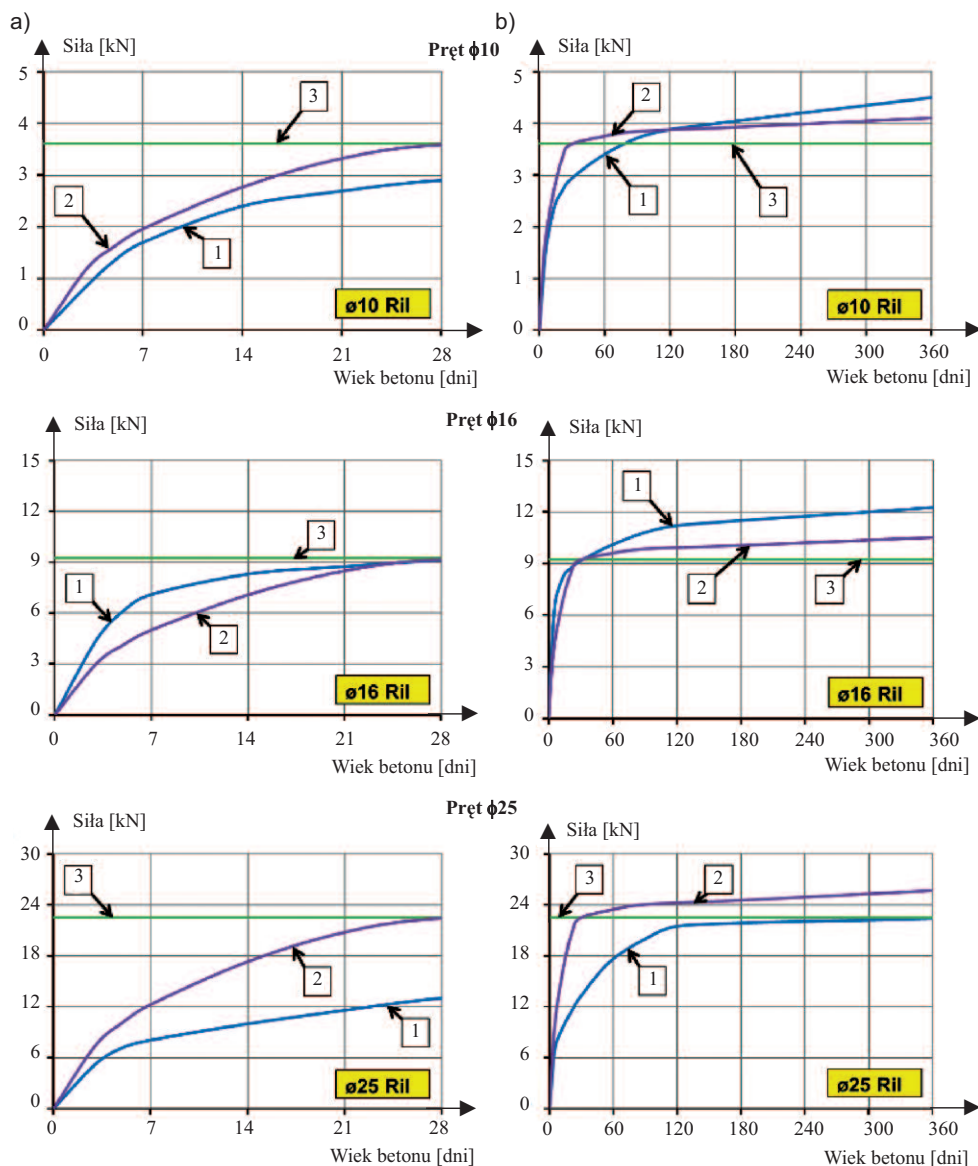
- na podstawie zbieżności wyników badań z teoretycznie określonymi granicznymi naprężeniami przyczepności (rysunek 7) można wstępnie wnioskować, że przyrost przyczepności jest proporcjonalny do przyrostu wytrzymałości na ściskanie betonu również w początkowym okresie dojrzewania betonu;

- procedura zamieszczona w EC2 [7] pozwala na szacowanie wartości granicznej naprężeń przyczepności w okresie dojrzewania betonu, ale rozbieżność pomiędzy wartościami wyznaczonymi wg tej procedury i uzyskanymi w badaniach (rysunek 7) wskazuje na potrzebę weryfikacji współczynników bezpieczeństwa lub wyznaczenia wartości f_{bd} przy określaniu długości zakotwienia;

- w 28 dniu dojrzewania uzyskano żądaną wytrzymałość betonu na ściskanie. Niestety, jak wynika z rysunku 6, prawie we wszystkich przypadkach uzyskano mniejsze wartości obciążenia wyrywającego – granicznych naprężeń przyczepności (1 – wg rysunku 6; 2, 4 – wg rysunku 7), niż wartości z obliczeń (2, 3 – wg rysunku 6; 1 – wg rysunku 7).

Podsumowanie

Badania przyczepności pomiędzy betonem a stalą zbrojeniową prowadzone są najczęściej po okresie dojrzewania. Niewiele jest badań dotyczących rozwoju granicznych naprężeń przyczepności [9]. Pojedyncze badania przedstawiają zależność rozwoju granicznych naprężeń przyczepności od chwilowej wytrzymałości betonu w okresie dojrzewania [4]. Tylko niektóre z nich odnoszą się do zaleceń normowych lub proponowanych wzorów empirycznych wyznaczania granicznych naprężeń przyczepności [8], co



Rys. 6. Porównanie eksperymentalnej wartości siły wyrywającej z wartościami teoretycznymi w zależności od wieku betonu: a) zakres do 28 dni; b) pełny zakres badań; 1 – siła wyrywająca uzyskana w badaniach; 2 – siła wyrywająca określona wg EC2 z wykorzystaniem chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie; 3 – siła wyrywająca określona wg EC2 w przypadku projektowanej klasy betonu

Fig. 6. Comparison of the experimental value of the pull-out force with the theoretical values depending on the age of the concrete: a) range up to 28 days; b) full range of tests; 1 – pull-out force obtained in tests; 2 – pull-out force determined according to EC2 using the temporary compressive strength of concrete; 3 – tensile force determined according to EC2 in the case of the designed concrete class

jest bardzo istotne z punktu widzenia praktyki inżynierskiej.

Celem badań była doświadczalna weryfikacja założeń normowych oraz wzorów empirycznych przedstawionych w normie EC2 [7] w sytuacji:

- przekazania na zbrojenie obciążeń w czasie dojrzewania betonu, gdy nie osiągnął on jeszcze projektowanych parametrów wytrzymałościowych;
- proporcjonalności granicznych naprężeń przyczepności i wytrzyma-

łości betonu na ściskanie w czasie dojrzewania.

Wyniki uzyskane w przypadku badanej serii próbek wykonanych z betonu C20/25 na cemencie hutniczym wskazują na proporcjonalność rozwoju granicznych naprężeń przyczepności oraz wytrzymałości betonu na ściskanie w okresie dojrzewania betonu – przebieg krzywej obrazującej przyrost granicznych naprężeń przyczepności w czasie dojrzewania (krzywa nr 5 wg rysunku 7)

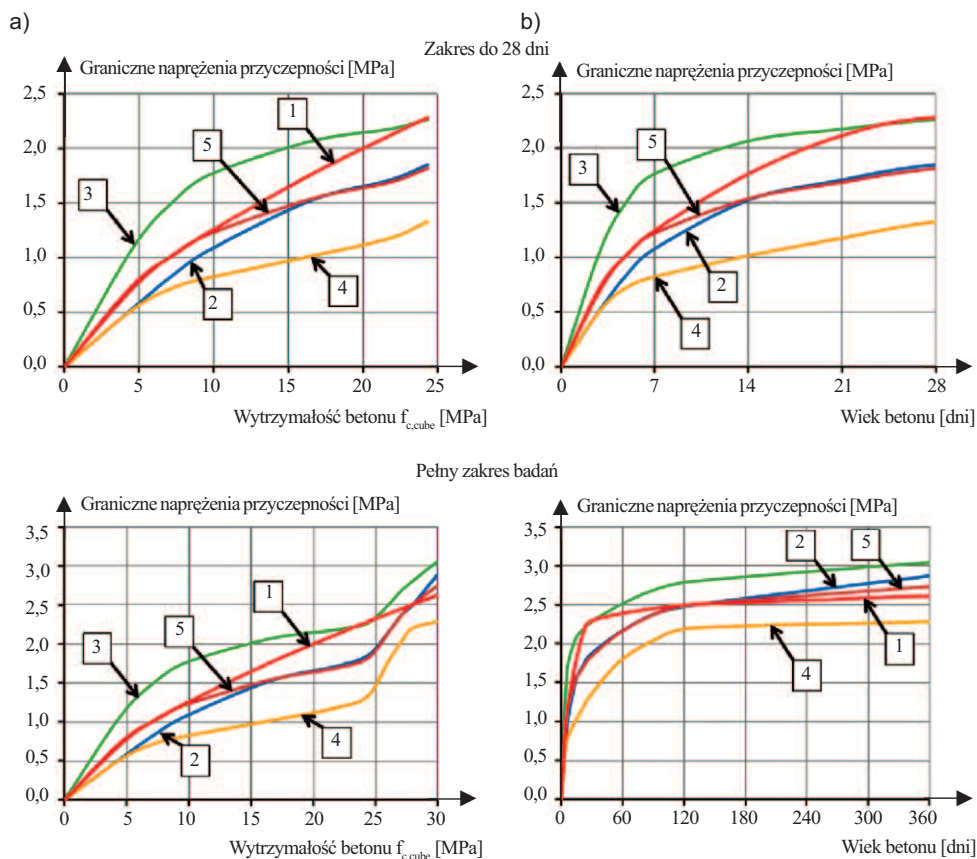
jest zbliżony do przebiegu krzywej określonej wzorem empirycznym wg EC2 [7] na podstawie chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie (krzywa nr 1). Na podstawie wzorów empirycznych uzyskano wartości większe niż z badań, co jest sprzeczne z innymi doniesieniami [4, 8], które wskazują na bezpieczne założenia przyjęte w przepisach, co podkreślają autorzy pracy [4]. W 28 dniu dojrzewania nie uzyskano w badaniach przyczepności określonej teoretycznie wg EC2 [7] w przypadku projektowanej klasy betonu.

Przedstawione wstępne wyniki badań sugerują konieczność weryfikacji współczynników bezpieczeństwa lub wartości f_{bd} przy określaniu długości zakotwienia wg EC2 [7]. Przeszacowanie granicznych naprężeń przyczepności między materiałami, wyznaczonych na podstawie procedury przedstawionej w EC2 [7], szczególnie w wieku 28 dni, może być niebezpieczne.

Przedstawione badania na nielicznej próbie i z zastosowaniem tylko jednej klasy betonu muszą zostać zweryfikowane w szerszych badaniach. Planowane jest kontynuowanie badań z zastosowaniem betonów o wyższej wytrzymałości oraz na bazie innych cementów. W przypadku pręta $\phi 16$ uzyskano graniczne naprężenia z badań

większe niż określone empirycznie, odwrotnie niż w przypadku przebadanych prętów o innej średnicy (rysunek 7). W związku z tym w następnych etapach badań planowane jest zbadanie większej liczby prętów różniących się średnicą.

Obecnie najczęściej stosowane są pręty żebrowane. W przypadku tych prętów naprężenia pomiędzy stałą a betonem są najczęściej przenoszone przez ząbienie się żeberek pręta o beton.



Rys. 7. Graniczne naprężenia przyczepności: a) w funkcji wytrzymałości betonu $f_{c,cube}$; b) w funkcji wieku betonu; 1 – wartość naprężeń stycznych f_{bd} obliczanych wg EC2 z wykorzystaniem chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie; 2 – graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wyrywającej uzyskanej w badaniach prętów $\phi 10$; 3 – graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wyrywającej uzyskanej w badaniach prętów $\phi 16$; 4 – graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wyrywającej uzyskanej w badaniach prętów $\phi 25$; 5 – średnie graniczne naprężenia przyczepności określone na podstawie siły wyrywającej uzyskanej w badaniach prętów
 Fig. 7. Limit adhesion stresses: a) as a function of concrete strength $f_{c,cube}$; b) as a function of concrete age; 1 – value of tangential stresses f_{bd} calculated according to EC2 using the temporary compressive strength of concrete; 2 – limit adhesion stresses determined on the basis of the pull-out force obtained in tests of $\phi 10$ bars; 3 – limit adhesion stresses determined on the basis of the pull-out force obtained in tests of $\phi 16$ bars; 4 – limit adhesion stresses determined on the basis of the pull-out force obtained in tests of $\phi 25$ bars; 5 – average limit adhesion stresses determined on the basis of the pull-out force obtained in bar tests

W takiej sytuacji wpływ granicznych naprężeń przyczepności na siłę wyrywającą, a także różnica pomiędzy wartościami uzyskiwanymi w badaniach i metodą empiryczną na podstawie chwilowej wytrzymałości betonu na ściskanie, mogą być małe.

Z przeprowadzonych badań wynika również, że konieczne jest zwiększenie liczby elementów próbnych do 12 lub 25, jak sugeruje norma [20], ze względu na uzyskaną dużą zmienność wyników, szczególnie w początkowym okresie dojrzewania betonu.

Literatura

[1] Burdziński M, Niedostatkiwicz M, Ziółkowski P. Tests of bond between concrete and steel bars – literature background and program of own

research. *Budownictwo i Architektura*. 2020; 19 (3): 5 – 20.

[2] Jasiczak J, Kulczewski P, Borowski P. Laboratory Tests of Adhesion of Steel Bars to Ordinary and Frozen Concrete. *WMCAUS, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 245 032043: 10.

[3] Dondelowski H, Januszewski M. *Betony cementowe. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.

[4] Hughes BP, Videla C. Design criteria for early-age bond strength in reinforced concrete. *Materials and Structures*. 1992, 25: 445 – 463.

[5] <https://www.germanninstruments.com/coma-meter-maturity-meter/>. 26.04.2023 r.

[6] Praca zbiorowa. *Budownictwo betonowe*. Tom 1. Technologia betonu, cz. 1. Arkady, Warszawa 1963.

[7] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[8] Chowdhury S. Early Age Bond Strength of Reinforcing Bars in High Strength Concrete. 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, Kandy, Sri Lanka 2013, s. 78 – 89.

[9] Dybel P, Kucharska M. Development of Bond Strength of Reinforcement Steel in New Generation Concretes. *WMCAUS, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471 052058: 8.

[10] Xiao J, Long X, Ye M, Jiang H, Liu L, Mo F, Deng D, Huang Z. Bond-Slip Law Between Steel Bar and Different Cement-Based Materials Considering Anchorage Position Function. *Frontiers in Materials*. 2021; 8: 15.

[11] Almeida Filho FM, El Debs MK, El Debs ALHC. Evaluation of the bond strength behaviour between steel bars and High Strength Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete at early ages. *Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds) Taylor & Francis Group, London, 2008, s. 445 – 451*.

[12] Gruszczyński M, Lenart M, Wasag T. Analiza przyrostu wytrzymałości wczesnej betonu modyfikowanego domieszkami zawierającymi nanokryształy CSH/Analysis of the increase in early strength of concrete modified with admixtures containing CSH nanocrystals. *Materiały Budowlane*. 2022; 595 (3): 2 – 4.

[13] Burdziński M, Niedostatkiwicz M. Analiza doświadczalna wpływu średnicy pręta na przyczepność w teście pull-out. *Materiały Budowlane*. 2022; 602 (10): 1 – 4.

[14] Krystosik D. Ocena przyczepności włókien stalowych do matrycy betonowej po ich obróbce mechanicznej. *Materiały Budowlane*. 2022; 603 (11): 1 – 5.

[15] RILEM/CEB/FIP, Technical recommendations for the testing and use of construction materials, E&FN Spon, U. K. 1983.

[16] Cairns J, Plizzari G. Do we need a standard test for bond. *Proc. Int. Conf. Bond in Concrete – from research to standards*. Budapest 2002, s. 259 – 267.

[17] PN-EN 12390-3:2011. *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.

[18] PN-EN 12390-6:2011. *Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*.

[19] Pędziwiatr J. *Podstawowe zagadnienia przyczepności stali i betonów w elementach żelbetonowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007, 291 s.

[20] PN-EN 10080:2007 *Stal do zbrojenia betonu. Spawalna stal zbrojeniowa. Postanowienia ogólne*.

Przyjęto do druku: 21.02.2024 r.