

Wpływ zawartości pyłu krzemionkowego na sztywność przyczepności betonu wysokowartościowego do prętów zbrojeniowych

Effect of silica fume content on the bond stiffness of reinforcement bars in high-performance concrete

1. Wprowadzenie

W literaturze polskiej i światowej zagadnienia związane ze zjawiskiem przyczepności betonów zwykłych (BZ) do prętów zbrojeniowych są szeroko opisane (9, 10, 12). Pomimo dużego zainteresowania badaczy betonami wysokowartościowymi (BWW) badaniami związanym z tą problematyką poświęcono niewiele miejsca. Opublikowane prace (1, 6, 7) wykazują duży rozrzut wyników, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia wyciągnięcie jednoznacznych wniosków.

Jednym z ważnych zagadnień dotyczących przyczepności jest tak zwana sztywność wiązania (sztywność przyczepności). Rozumie się przez nią zmianę przyrostu naprężeń przyczepności w stosunku do przemieszczenia pręta w betonie (kąąt nachylenia krzywej naprężenia przyczepności – przemieszczenie pręta w betonie).

Przedmiotem prezentowanych w pracy badań jest doświadczalna ocena wpływu zawartości pyłu krzemionkowego w betonie na zdefiniowaną wcześniej sztywność przyczepności, w elementach wykonanych z betonu wysokowartościowego.

Na wstępie podkreślić należy, że określenie „przyczepność” jest pojęciem umownym. Praktycznie można byłoby go używać tylko w odniesieniu do prętów gładkich, które we współczesnym budownictwie są rzadko stosowane jako zbrojenie nośne. W przypadku prętów żebrowanych „przyczepność” jest związana z oporem, jaki beton stawia wyciąganemu z niego prętowi. Powierzchnia ścinania betonu w przypadku prętów żebrowanych może mieć różny kształt i przebieg [rysunek 1].

Wpływ pyłu krzemionkowego na mikrostrukturę betonu oraz strefy kontaktowej stali zbrojeniowej z zaczynem cementowym został przedstawiony w kilku pracach (4, 5, 8, 13). Wyniki tych badań wykazują, że zastosowanie pyłu krzemionkowego zmniejsza radykalnie porowatość strefy przejściowej zaczynu z powierzchnią pręta stalowego (13). Korzystny wpływ pyłu krzemionkowego na przyczepność wyjaśniany jest wypełnieniem przestrzeni zajętej

1. Introduction

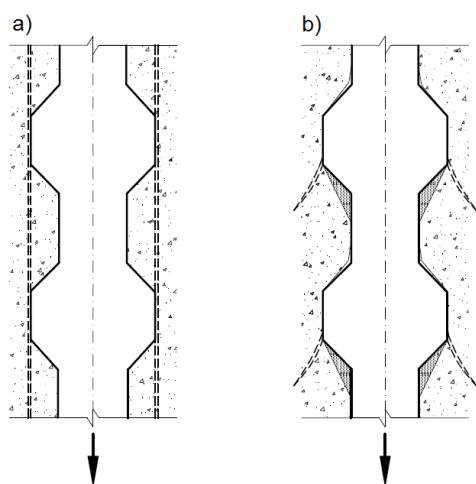
The phenomenon of ordinary concrete (OC) – rebars bond has been comprehensively discussed in the technical literature (9, 10, 12). Despite high interest in high-performance concrete (HPC), not much attention has been paid to the problem in question. The research results presented in some papers (1, 6, 7) show considerable scatter, which makes it difficult or even impossible to draw unambiguous conclusions.

One of the important problem related to the steel bars bond in concrete is its stiffness, understood as the change in bond strains increment relative to bar displacement in concrete (the bond strain – bar displacement in concrete curve slope angle).

The aim of the research presented in this paper was to study experimentally the effect of the silica fume admixture in concrete on bond stiffness, in elements made from high-performance concrete.

It should be emphasised that the term “bond” is a conventional one. Practically, it could be used in reference to smooth bars, which in contemporary construction practice are seldom used as rigid reinforcement. In the case of ribbed bars the “bond” is linked with the resistance of concrete to the bar, pulled out of it. The concrete shear surface in the case of ribbed bars may has various shape and a different propagation (Fig. 1).

The effect of silica fume on the microstructure of concrete and steel–cement paste contact area was presented in several papers (4, 5, 8). The results of the research discussed in the aforementioned papers are showing that the application of silica fume results in the significant reduction of the interfacial transition zone porosity of cement matrix and bar surface (13). The favourable effect of silica fume on the bond is explained by the filling of the area previously occupied by water in the transition zone by silica particles and this zone densifying by quickly formed C-S-H phase in the expense of calcium hydroxide, as a result of pozzolanic reaction (13). These processes result in the improvement of cement matrix–steel bars



Rys. 1. Mechanizmy utraty przyczepności: a) wyrwanie; b) rozłupanie (2).

Fig. 1. Bond loss mechanisms: a) pull-out; b) splitting (2).

przez wodę w strefie przejściowej zaczynu cementowego z prętami zbrojeniowymi przez cząstki krzemionki oraz jej zagęszczeniem powstającą szybko fazą C-S-H, kosztem wodorotlenku wapnia, w wyniku reakcji pucolanowej (13). Procesy te powodują wzmocnienie wiązań matrycy cementowej ze stalą zbrojeniową w betonie. Zwiększenie dodatku pyłu krzemionkowego (przy odpowiednim stosunku w/c) poprawia przyczepność betonu do stali, głównie przyczepność adhezyjną.

W przypadku przyczepności wtórnej (przyczepność, przy której odkształcenia zbrojenia są większe niż otaczającego betonu) pył krzemionkowy zmienia mechanizm jej zniszczenia. Dodatek pyłu krzemionkowego powoduje zmniejszenie tarcia między powierzchnią boczną żeber pręta a betonem (8). Wzrasta wtedy składowa siła przyczepności prostopadła do zbrojenia, która powoduje zwiększenie naprężeń rozciągających przy czole żeber, co wpływa na przyspieszenie propagacji rys poprzecznych wokół zbrojenia (8). Proces ten wpływa na wielkość otrzymywanych granicznych naprężeń przyczepności oraz jej sztywność.

Przedstawiony opis ma jedynie znaczenie jakościowe. W analizie zagadnień praktycznych konieczna jest ilościowa ocena procesu. Niestety znanych wyników badań dotyczących przyczepności betonów zwykłych nie można przenieść bezpośrednio na przyczepność betonów wysokowartościowych (3). Ilościowa ocena wpływu zawartości pyłu krzemionkowego w mieszance betonowej na sztywność przyczepności BWW do zbrojenia jest przedmiotem niniejszego artykułu.

3. Metody i materiały

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu zawartości pyłu krzemionkowego w betonie na sztywność połączenia stal zbrojeniowa–beton o dużej wytrzymałości. Do badań przygotowano elementy doświadczalne, które różniły się między sobą:

- wysokością położenia prętów zbrojeniowych w betonowym elemencie (rysunek 2),

bond. An increased silica fume addition improves, at an appropriate w/c ratio, the concrete–steel bars bond, chiefly of adhesive type.

In the case of secondary bond [bond when the steel bars strain are higher than that of surrounding concrete] the silica fume is changing the mechanism of its destruction. The silica fume addition is changing the mechanism of destruction. The silica fume addition is changing the friction between the ribs side-surface and concrete (8). In these conditions, the bond force component perpendicular to the reinforcement is rising, which increases the tensile stress at the ribs side-surfaces, which in turn results in the acceleration of transverse cracks propagation around the reinforcement. This phenomenon affects the resulting ultimate stresses of the bond and bond stiffness.

The description above is qualitative in nature. In the engineering practice it is necessary to have the quantitative process evaluation. Unfortunately, the available results of research concerning the bond of ordinary concrete with steel bars cannot be transferred directly to the bond in high performance concrete (3). The aim of this paper is to present an experimental study of quantitative evaluation of the silica fume content effect on the bond stiffness of steel bars in HPC.

3. Materials and methods

The aim of the experiments was to determine the effect of the silica fume content in concrete on the reinforcing steel – HPC bond stiffness.

The test elements prepared for the experiments differed in:

- reinforcing bars positions at the embedded element height,
- composition and consistency class of concrete mixes (Table 1).

The bond were tested by the classical pull-out method, recommended by RILEM (11). Additionally, the standard concrete compressive and splitting tensile strength as well as the modulus of elasticity were determined. The concrete samples for all these tests were cured for 28 days in laboratory condition, at 20°C and air relative humidity of 95%.

The tested elements were produced from six different mixes of HPC, whose variable parameters of composition was the content of silica fume (0,5 and 10% by mass of cement), which replaced Portland cement, and superplasticizer. The constant parameters of the samples composition were cement content (500 kg/m³) and water/binder ratio w/b (0,32). Each concrete mix was made in two consistency classes (S2 – mix A and S4 – mix B).

Deformed reinforcing bars (RB500W) of one diameter of 16 mm, representative of the so-called mean diameters (10±20 mm) were used.

3.1. Tested samples

To determine the effect of silica fume content on bond stiffness a special test elements were designed. In these elements the

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH
CONCRETE MIX COMPOSITION

Składnik Component	Zawartość składników w kg/m ³ i oznaczenie betonu Components content in kg/m ³ and concrete designing					
	A-0	A-5	A-10	B-0	B-5	B-10
Cement CEM I 42.5R	500	476	455	500	476	455
Woda/Water	160					
Piasek rzeczny River sand 0/2 mm	665					
Bazalt/Basalt 2/8 mm	665					
Bazalt/Basalt 8/16 mm	570					
Pył krzemionkowy Silica fume	0	24	45	0	24	45
Superplastyfikator Superplasticizer	2,50	4,76	5,45	5,00	6,81	7,73

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH I STWARDNIAŁYCH BETONÓW
PROPERTIES OF CONCRETE MIXES AND OF HARDENED CONCRETES

Oznaczenie mieszanki Mix designing	Opad stożka Slump cm	Klasa konsystencji Consistency class	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength				Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu Splitting tensile strength		Moduł sprężystości podłużnej Young's modulus	
			$f_{c, cyl}^1$	v	$f_{c, cube}^1$	v	$f_{ct, sp}^1$	v	E_{cm}	v
			MPa	%	MPa	%	MPa	%	GPa	%
A-0	6,0	S2	80,0	2,0	84,9	3,9	5,6	2,1	47,9	2,5
A-5	6,5	S2	84,4	5,2	89,6	4,2	5,5	9,2	49,0	1,2
A-10	8,0	S2	82,3	3,5	87,0	3,8	5,5	4,5	46,6	4,2
B-0	18,0	S4	81,0	1,6	87,2	1,6	5,7	4,2	46,9	1,7
B-5	20,0	S4	92,6	3,4	95,4	2,7	5,9	5,1	50,8	4,1
B-10	21,0	S4	90,7	1,8	91,1	4,5	6,4	5,3	49,6	1,6

– składem i klasą konsystencji mieszank betonowych (tablica 1).

Badania przyczepności wykonano zgodnie z zalecaną przez RILEM (11) klasyczną metodą wrywania. Dodatkowo oznaczono normową wytrzymałość betonu na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wyznaczono moduł sprężystości. Wszystkie badania wykonywano po 28 dniach dojrzewania betonu w warunkach laboratoryjnych, w powietrzu, w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 95%.

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z sześciu różnych mieszank betonowych wysokowartościowego, w których zmieniano zawartość pyłu krzemionkowego (0, 5 i 10% masy cementu), zastępującego część cementu oraz dodatek superplastyfikatora. Natomiast stała była zawartość cementu (500 kg/m³) i wskaźnik wodno-spoiwowy w/s (0,32). Każdą z próbek wykonywano z mieszank betonowych o dwóch konsystencjach (S2 – mieszanki A i S4 – mieszanki B).

W badaniach stosowano żebrowane pręty zbrojeniowe (RB500W), o tej samej średnicy wynoszącej 16 mm, która jest reprezentatywną dla tak zwanych „średnich średnic” (10÷20 mm).

reinforcing bars were oriented perpendicularly to concrete placement direction and the height of their location during concrete placement was the multiple of specimen dimension recommended by RILEM (11). After 21 days of curing the elements were cut into the test specimens. The schematic view of test samples has been shown in Fig. 2.

The preliminary tests of the steel bars bond in HCP have shown that the bond section length equal 5ϕ , adopted in measurements [according to RILEM requirements] makes impossible the bar pull-out from the concrete elements. Before the steel bar bond in HPC destruction its disruption occurred. In this situation in the measurements the length of bond section was diminished to 2.5ϕ .

3.2. Research method

The RILEM method (11), based on pull-out test, for bars-concrete bond measurements was used. It is a fundamental method for estimating rebar-concrete bond, depending on concrete properties, or type of reinforcing bars. The method consists in applying load to the bar anchored in the concrete element, as a tensile force. The values measured are the force applied to the bar and relative displacement of the later in the concrete.

The adopted test method is permitting to assume that the deformation changes in the steel along the bar axis are linear. Consequently, the value of the bond stresses is constant and can be determined from formula:

$$\tau = \frac{F}{\pi \phi l}, \quad [1]$$

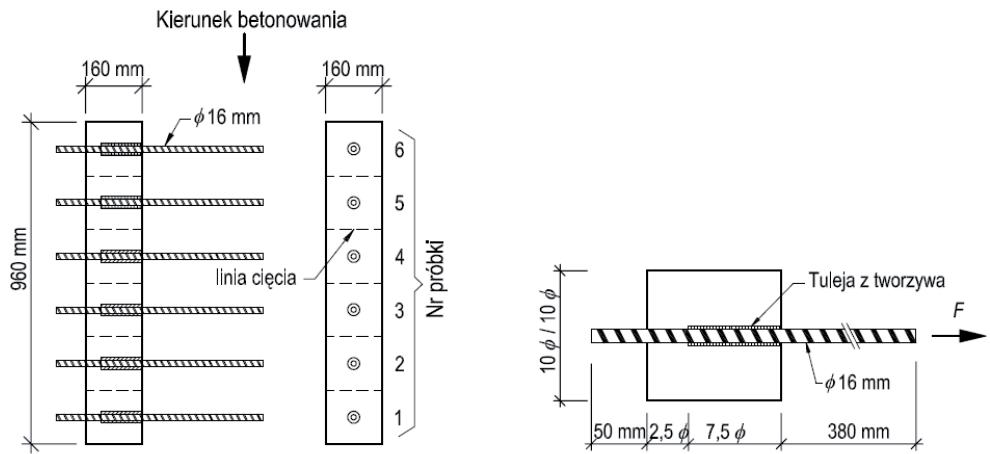
where:

F – force acting on the reinforcing bar,

ϕ – reinforcing bar diameter,

3.1. Elementy próbne

W celu określenia wpływu zawartości pyłu krzemionkowego na sztywność przyczepności, przygotowano specjalne elementy do badań. W elementach tych pręt zbrojeniowy był zorientowany prostopadłe do kierunku betonowania, a wysokość jego usytuowania podczas betonowania stanowiła wielokrotność wymiaru próbki zalecanej przez RILEM (11). Elementy te po 21 dniach od wykonania pocięto na kilka części. Schematyczny widok elementu do badań pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat elementu do badań.

Fig. 2. Schematic test specimens and concrete placement presentation.

Przeprowadzone wstępne badania przyczepności pręta w BWW wykazały, że przyjęta w pomiarach długość odcinka przyczepności 5ϕ (zalecana przez RILEM), uniemożliwia wyrwanie pręta z elementu betonowego. Przed zniszczeniem połączenia pręta stalowego z betonem następowało jego rozerwanie. W przeprowadzonych badaniach długość odcinka przyczepności zmniejszono do $2,5\phi$.

3.2. Metoda pomiaru przyczepności

Badanie przyczepności prętów do betonu wykonano metodą zalecaną przez RILEM (11). Metoda ta oparta jest na próbie wyciągania pręta z bloku betonowego. Stanowi ona podstawową metodę służącą do oceny współpracy prętów zbrojeniowych z betonem w zależności od właściwości betonów, czy rodzaju prętów zbrojeniowych. Zasada pomiaru polega na obciążaniu pręta, który jest zakotwiony w bloku betonowym, siłą rozciągającą. Wielkościami mierzonymi są: siła przyłożona do pręta oraz względne przemieszczenie pręta względem betonu.

Przyjęta metoda pomiaru pozwalała założyć, że zmiany odkształceń stali wzdłuż osi pręta są liniowe. W konsekwencji wartość naprężeń przyczepności jest stała i można ją wyznaczyć ze wzoru:

$$\tau = \frac{F}{\pi \phi l}, \quad [1]$$

gdzie:

F – siła działająca na pręt zbrojeniowy,

ϕ – średnica pręta zbrojeniowego,

l – długość odcinka przyczepności.

Badania przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Pomiar siły prowadzony był automatycznie przez wbudowany w maszynę siłomierz. Do pomiaru przemieszczenia zbrojenia względem betonu wykorzystano ekstensometry inkrementalne, zsynchronizowane z oprogramowaniem urządzenia. Wyciąganie pręta z betonu następowało w wyniku przemieszczania szcęk maszyny wytrzymałościowej w czasie. W całym zakresie badania prędkość przemieszczania wynosiła $0,01$ mm/s.

l – bond section length.

For the tests the universal testing machine was used. The force was measured automatically by an in-built dynamometer. The reinforcement bar slip in concrete was measured by incremental extensometers synchronised with the device software. The bar pull-out was caused by the displacements of the testing machine jaws over time. Over the whole experiment range this displacement has speed of 0.01 mm/s.

4. Experimental results

For the results assessing the normalised, bond strength relative to the splitting tensile concrete strength ($\tau/f_{ct,sp}$) was applied. The bond strength was determined from the equation [1]. The normalised bond strength vs. slip ($\tau/f_{ct,sp}-\delta$) curves are shown in Figs. 3÷5. For each of the tested specimen $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ relationship was the mean value of four experimental results. The curves plots are embracing the specimens with the same silica fume content which were produced of the concrete mix of the same consistency.

To present more clear the $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ relationship changes for the specimens with different silica fume content and for bottom and top samples the obtained curves were plotted in one diagram (Fig. 6).

From the comparison of the curves of $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ relationship shown on Fig. 6, it is evident that their shape and slope as well as the maximum slip depend on the bar position in the concrete element. It concerns primarily the bars located in the element upper part, but also produced of concrete mixes with the high silica fume content of the concrete mix. For the other specimens cut from the concrete elements, the composition changes of the concrete composition is insignificant.

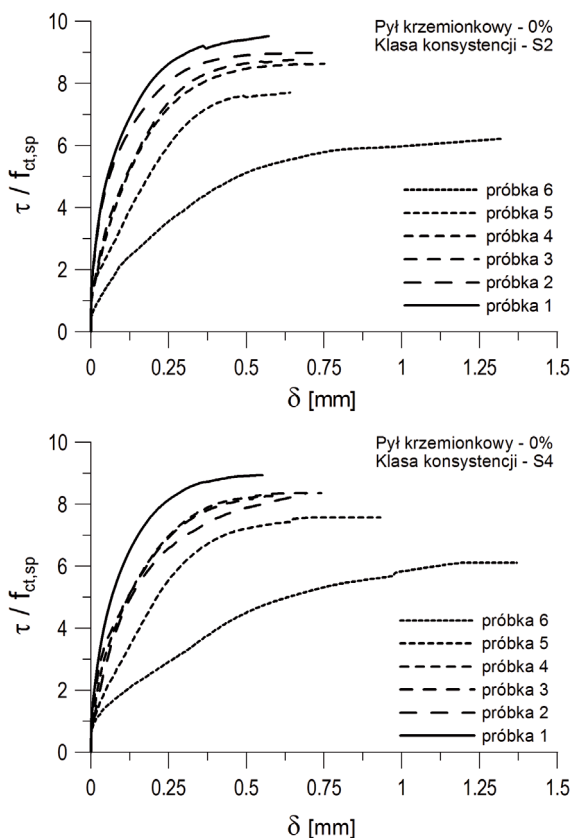
The obtained results are showing that in the case of bars located in the bottom part of elements the influence of silica fume and concrete mix consistency on the bond stiffness is negligible. A tendency was only noticed for the $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ curve slope decrease in the final phase before the steel bar-concrete bond breaking in

4. Wyniki badań

Do interpretacji otrzymanych wyników zastosowano znormalizowane naprężenie przyczepności w stosunku do wytrzymałości betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu ($\tau/f_{ct,sp}$). Naprężenia przyczepności zostały wyznaczone z równania [1]. Przebiegi zależności: znormalizowane naprężenie przyczepności – przemieszczenie ($\tau/f_{ct,sp}-\delta$) przedstawiono na rysunkach 3÷5. Dla każdego elementu betonowego otrzymana zależność $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ była średnią z czterech wyników pomiarów. Poszczególne rysunki obejmują elementy próbne o tej samej zawartości pyłu krzemionkowego i wykonane z mieszanki betonowej o stałej konsystencji.

W celu porównania zmian zależności $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ elementów o różnej zawartości pyłu krzemionkowego naniesiono krzywe próbek wyciętych z dolnej i górnej części elementów na jeden rysunek (rysunek 6).

Z porównania przebiegu krzywych zależności $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ przedstawionych na rysunku 6, wynika że ich kształt i nachylenie oraz wielkość przemieszczeń są zależne od położenia pręta w elemencie betonowym. Dotyczy to przede wszystkim prętów położonych w górnej części elementu, lecz także wykonanych z betonu o dużej zawartości pyłu krzemionkowego. W przypadku pozostałych próbek, wyciętych z elementów betonowych, wpływ zmian składu betonu jest niewielki.



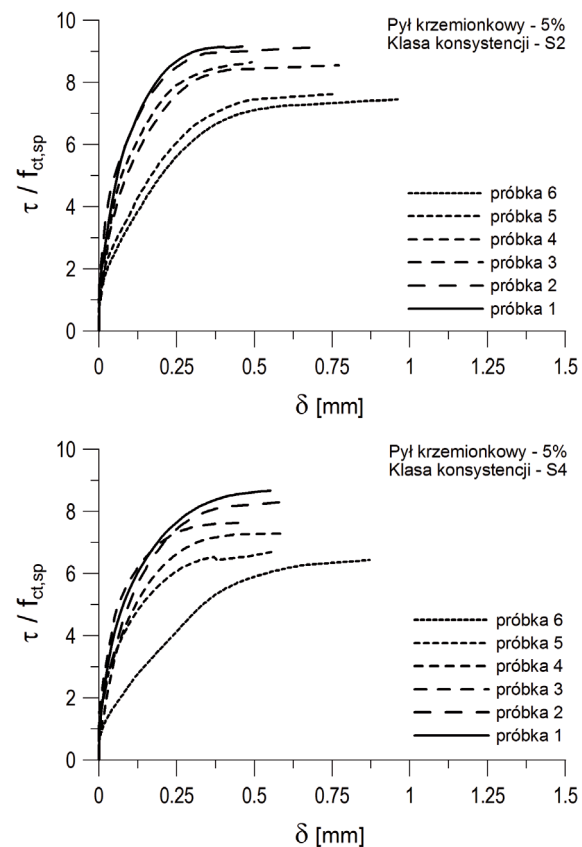
Rys. 3. Krzywe zależności $\tau/f_{ct,sp}-\delta$, zawartość pyłu krzemionkowego 0% (numerację próbek podano na rysunku 2).

Fig. 3. $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ curves for specimens without silica fume (for sample numeration see Fig. 2).

the case of concrete mix consistency increase. The more fluid the mix the poorer the quality of the bar concrete cover. In the case of the bars cut from the elements upper part the effect of concrete mix composition is definitely stronger. The following tendencies can be observed:

- for mixes of consistency class S2 the addition of 5% silica fume improves the steel–concrete bond stiffness; an increase of the silica fume content to 10% of the cement mass results in the same $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ relationship as for concrete specimens without silica fume,
- an increase of superplasticizer content and caused rise of the concrete mix fluidity negatively affects the bond stiffness for concrete with 5% silica fume, while this addition content of 10% by mass of cement makes the tendency reverse; the $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ curve slope becomes significantly higher,
- for mixes of consistency class S2 the 5% and 10% by mass of cement silica fume addition significantly improves the adhesion by 96 and 71%, respectively, while in the case of mix fluidity increase to S4 (higher content of superplasticizer) the bond improvement is low, namely 7 and 15%, respectively.

On the basis of the experimental results it can be stated that the composition of high–performance concrete has a significant effect on the stiffness of steel bars–concrete bond in the top part of the reinforced concrete element. The addition of 5% by mass of cement of silica fume considerably improves the top bars bond stiffness.



Rys. 4. Krzywe zależności $\tau/f_{ct,sp}-\delta$, zawartość pyłu krzemionkowego 5% (numeracja próbek jak na rysunku 2).

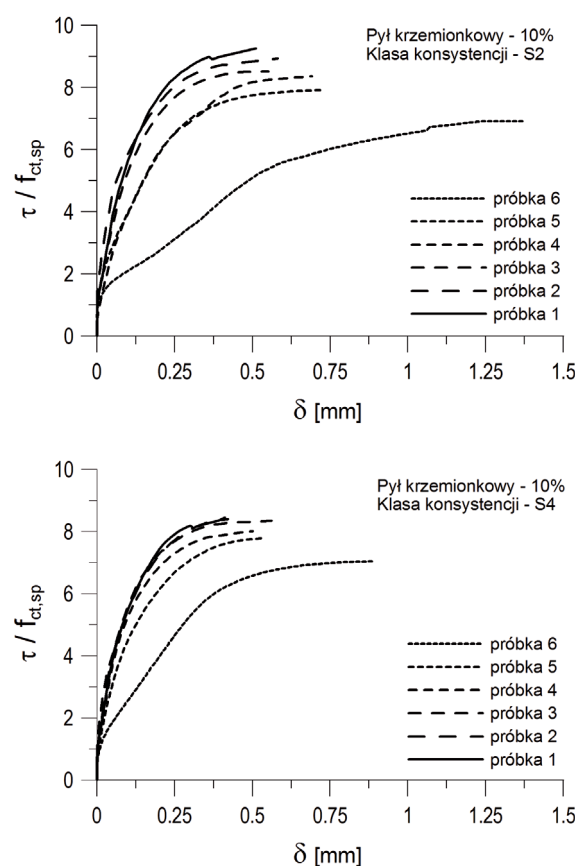
Fig. 4. $\tau/f_{ct,sp}-\delta$ curves for specimens with silica fume content of 5% (for sample numeration see Fig. 2).

Uzyskane wyniki pokazują, że w przypadku prętów położonych w dolnej części elementu wpływ pyłu krzemionkowego i konsystencji mieszanki na sztywność połączenia jest pomijalny. Zaobserwowano jedynie tendencję zmniejszania się nachylenia krzywej $\tau/f_{ct,sp} - \delta$ w końcowym okresie przed zerwaniem połączenia pręt stalowy–beton, w przypadku zwiększenia konsystencji mieszanki betonowej. Poprawa płynności mieszanki powoduje pogorszenie jakości otulenia pręta betonem. W przypadku prętów znajdujących się w próbkach wyciętych z górnej części elementu wpływ składu mieszanki betonowej jest zdecydowanie większy. Można zaobserwować następujące tendencje:

- w przypadku mieszanek o klasie konsystencji S2 dodatek 5% pyłu krzemionkowego poprawia sztywność połączenia pręt stalowy–beton; zwiększenie zawartości pyłu krzemionkowego do 10% masy cementu powoduje taki sam przebieg krzywej $\tau/f_{ct,sp} - \delta$ jak dla elementów betonowych nie zawierających pyłu krzemionkowego,
- zwiększenie zawartości superplastyfikatora i spowodowany tym wzrost ciekłości mieszanki wpływa niekorzystnie na sztywność przyczepności w przypadku betonów zawierających 5% pyłu krzemionkowego, natomiast gdy wynosi on 10% masy cementu tendencja jest odwrotna; następuje znaczny wzrost nachylenia krzywej $\tau/f_{ct,sp} - \delta$,
- w przypadku mieszanek o klasie konsystencji S2 dodatek pyłu krzemionkowego w ilości 5 i 10% masy cementu znacznie poprawia przyczepność pierwotną odpowiednio o 96 i 71%; a w przypadku zwiększenia stopnia ciekłości mieszanki do S4 (zwiększona zawartość superplastyfikatora) poprawa przyczepności jest niewielka i wynosi odpowiednio 7 i 15%.

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, że skład betonów o dużej wytrzymałości ma znaczny wpływ na sztywność połączenia stali zbrojeniowej z betonem w górnej części elementu żelbetowego. Dodatek pyłu krzemionkowego w ilości 5% masy cementu powoduje znaczną poprawę sztywności przyczepności prętów górnych. Związane jest to prawdopodobnie ze wzrostem spójności betonu, zmniejszeniem segregacji składników i wydzielania „mleczka” w górnej części elementu. Zwiększenie zawartości pyłu krzemionkowego do 10% masy cementu przynosi jednak efekt odwrotny. Następuje obniżenie sztywności przyczepności. Jak już wspomniano we wstępie, można przypuszczać (8), iż zwiększenie zawartości pyłu krzemionkowego do 10% masy cementu powoduje zmniejszenie tarcia między boczną powierzchnią pręta i betonem. Wzrasta wtedy składowa siła przyczepności prostopadła do pręta zbrojeniowego powodując zwiększenie naprężeń rozciągających przy czole żebra. Powoduje to przyspieszenie propagacji rys poprzecznych wokół zbrojenia i zmniejszenie sztywności połączenia prętów stalowych z betonem.

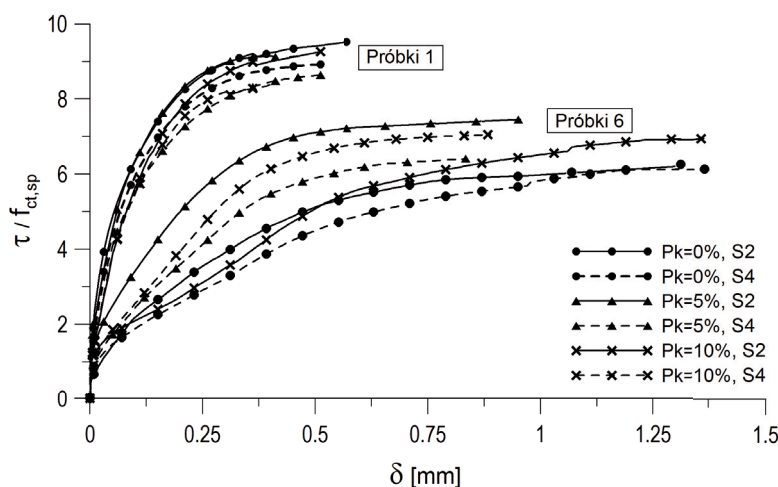
Zwiększenie ciekłości mieszanki spowodowane zwiększeniem ilości superplastyfikatora w przypadku betonów bez dodatku pyłu krzemionkowego oraz z dodatkiem wynoszącym 5% powoduje zmniejszenie sztywności po-



Rys. 5. Krzywe zależności $\tau/f_{ct,sp} - \delta$, zawartość pyłu krzemionkowego 10% (numeracja próbek jak na rysunku 2).

Fig. 5. $\tau/f_{ct,sp} - \delta$ curves for specimens with silica fume content of 10% (for sample numeration see Fig. 2).

This is probably connected with concrete cohesion increase, reduction of concrete components segregation and bleeding, in the upper part of the concrete element. Further increase of the silica fume content to 10% by mass of cement, however, causes a reverse effect and the bond stiffness decreases. As aforementioned in the introduction it can be supposed (8) that the silica fume content increase up to 10% by mass of cement causes the lowering of friction of lateral bar surface with concrete. In these conditions,



Rys. 6. Krzywe zależności $\tau/f_{ct,sp} - \delta$ w przypadku próbek wyciętych z dolnej i górnej części elementów betonowych.

Fig. 6. The curves plot of $\tau/f_{ct,sp} - \delta$ relationship for the bottom and top specimens.

łączenia stal–beton prętów górnych. W przypadku zastosowania 10% dodatku pyłu krzemionkowego zmniejszenia sztywności przyczepności nie stwierdzono.

5. Uwagi i wnioski końcowe

Przeprowadzone badania wykazały znaczny wpływ dodatku pyłu krzemionkowego na sztywność połączenia prętów stalowych z betonem o dużej wytrzymałości. Stwierdzono również wpływ konsystencji mieszanki betonowej, którą zmieniano zawartością superplastyfikatora.

Dodatek pyłu krzemionkowego do betonu miał większy wpływ w przypadku prętów położonych w górnej części betonowanego elementu. Wyniki badań wykazują, że sztywność przyczepności w rozpatrywanej części elementu jest zróżnicowana i zależy od proporcji między zawartością pyłu krzemionkowego i superplastyfikatora. Największą sztywność przyczepności osiągnięto w przypadku 5% zawartości pyłu krzemionkowego w mieszance betonowej o klasie konsystencji S2 i 10% pyłu dla mieszanek o klasie S4.

W przypadku prętów położonych w dolnej części betonowanego elementu zawartość pyłu krzemionkowego nie ma większego wpływu na sztywność połączenia prętów stalowych betonem. Jest to przypuszczalnie spowodowane większym samozagęszczeniem się mieszanki betonowej w dolnej części elementu. Wpływa to na znaczną poprawę jakości otulenia pręta betonem, w związku z tym efekt związany z modyfikacją strefy przejściowej pręt stalowy – beton, traci na znaczeniu.

W artykule wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych w ramach Projektu nr N N506 213840 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Literatura / References

1. A. Azizinamini, M. Stark, J. J. Roller, S. K. Ghosh, Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete. *ACI Structural Journal*, **90**, 5 (1993).
2. CEB-FIP, Task group bond model. Bond of reinforcement in concrete. State-of-art report. Bulletin No. 10, 2000.
3. P. Dybeł, Wpływ składu i właściwości betonów wysokowartościowych na przyczepność do stalowych prętów zbrojeniowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2013.
4. O. E. GjØrv, P. J. M. Monterko, P. K. Mehta, Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond. *ACI Materials Journal*, **87**, 6 (1990).
5. A. Goldman, A. Bentur, Bond effects in high-strength silica-fume concretes. *ACI Materials Journals*, **86**, 5 (1989).
6. B. S. Hamad, M. S. Itani, Bond Strength of Reinforcement in High-Performance Concrete: The Role of Silica Fume, Casting Position, and Superplasticizer Dosage. *ACI Material Journal*, **95**, M47 (1998).
7. K. Holschemacher, F. Dehn, D. Weiße, Influence of the Rebar Position on the Bond Behaviour in Hight Strenght Concrete. Leipzig annual civil engineering report, No. 7, 2002.

the bond force component perpendicular to the reinforcing bars is rising, which increases the tensile stress at the ribs side-surfaces. It results in the acceleration of transverse cracks propagation around the reinforcement and the decrease of the bond stiffness of steel bars with concrete.

The rise of concrete mix fluidity, due to the increase of superplasticizer addition increase, in the case of concrete without silica fume and with 5% of this additive, causes the reduction of steel bar–concrete bond stiffness in the top bars. In the case of 10% of silica fume the lowering of the bond stiffness was not found.

5. Remarks and final conclusions

The tests results have shown the significant influence of silica fume addition on the steel bars–high performance concrete bond stiffness. The influence of concrete mix consistency, changed by the superplasticizer addition, was also found.

The influence of silica fume addition to concrete was the highest in the case of bars located in the top part of the element. The test results show that the bond stiffness in the examined part of the element is diversified and depends on the silica fume to superplasticizer ratio. The highest bond stiffness was obtained at 5% silica fume content in the concrete, replacing Portland cement, and the mix consistency class S2 and at 10% addition for the mixes of consistency class S4.

In the case of the steel bars located in the bottom part of the element the silica fume addition to concrete does not have a significant effect on steel–concrete bond stiffness. It is probably caused by additional self–consolidation of the concrete mix in the bottom part of the element, which considerably improves the quality of bars concrete cover, due to which the effect of modification of the interfacial transition zone steel bars–concrete is of much lower importance.

Acknowledgments

In the paper the results of research performed in the framework of N N506 213840 Project financed by the Narodowe Centrum Nauki (the National Centre for Science) were used.

8. S. Hwang, Y. Lee, C. Lee, Effect of Silica Fume on the Splice Strength of Deformed Bars of High-Performance Concrete. *ACI Structural Journal*, **91**, 3 (1994).
9. J. O. Jirsa, J. E. Breen, J. J. Luke, B. S. Hamad, Effect of Casting Position on Bond. Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete. Paisley, UK 1982.
10. C. O. Orangun, J. O. Jirsa, J. E. Breen, Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices. *ACI Journal*, **74**, 3 (1977).
11. RILEM/CEB/FIP: Technical recommendations for the testing and use of construction materials. E&FN Spon, UK 1983.
12. R. Tepfers, Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. *Mag. of Concr. Res.*, **31**, 160 (1979).
13. K. L. Scrivener, A. Bentur, P. L. Pratt, *Adv. Cem. Res.*, **1**, 801 (1985).