

Wpływ położenia prętów zbrojeniowych na ich wiązanie z wysokowartościowym, samozagęszczającym się betonem

Effect of reinforcing bars location on their bond in High Performance Self-Compacting Concrete

Słowa kluczowe: wiązanie betonu z prętami zbrojeniowymi, wysokowartościowy beton samozagęszczający się

Key words: bond of reinforcing bars in Self Compacting concrete, High Performance Self Compacting concrete

1. Wprowadzenie

Nieustanny rozwój technologii betonu spowodował w ostatnich dziesięcioleciach powstanie betonów nowej generacji, o znacznie lepszych właściwościach, nie tylko w zakresie wytrzymałości i trwałości, ale i reologii. Do betonów nowej generacji zaliczamy między innymi samozagęszczający się beton wysokowartościowy, który powstał z rozwoju betonu samozagęszczającego się [BSZ] i wysokowartościowego [BWW]. Beton BSZWW wyróżnia się zdolnością do wypełnienia form, bez potrzeby mechanicznego zagęszczania oraz wysoką wytrzymałością na ściskanie i dużą trwałością. Uzyskanie takich właściwości wymaga specyficznego składu i proporcji składników. Mieszanki betonu BSZWW mają w stosunku do betonów zwykłych zwiększoną zawartość cementu portlandzkiego, domieszek upłynniających oraz reaktywnych dodatków mineralnych, najczęściej pyłu krzemionkowego (1, 2).

W opracowaniach dotyczących betonu samozagęszczającego się (3-5) stwierdzono, że właściwości mechaniczne stwardniałych betonów BSZ zależą przede wszystkim od ich mikrostruktury. Wykazano również, że zależność między mikrostrukturą betonu a jego właściwościami mechanicznymi nie zależy bezpośrednio od przyjętej metody zagęszczania mieszanki. W rezultacie jeśli mikrostruktura betonu zagęszczonego wibracyjnie i samozagęszczającego się będzie podobna to na zbliżonym poziomie pozostaną również ich właściwości mechaniczne. Tego stwierdzenia nie można jednak bezpośrednio odnieść do zjawiska wiązania betonu samozagęszczającego się ze stalą zbrojeniową.

W przypadku BSZ nie przeprowadzono szczegółowych badań dotyczących ich wiązania z prętami zbrojeniowymi, a otrzymane wyniki są częściowo niejednoznaczne. Ogólnie przyjmuje się, że naprężenia wiązania dla BSZ są równe lub większe od naprężeń otrzymywanych dla betonu zagęszczonego wibracyjnie [BZW] (6-8). W przypadku BSZ wykazywano również mniejsze rozrzuty wyników naprężeń wiązania (4, 9). Sztywność wiązania, tj. zmiana

1. Introduction

Concrete technology has recently made great progress and, as a result, various properties of new generation concretes, such as their quality, strength, durability and rheology, have been improved substantially. There are a few types of new generation concretes and, these days in particular, high performance self-compacting concrete [HPSCC] draws a lot of attention. This concrete is a combination of self-compacting concrete [SCC] and high performance concrete [HPC]. It can thus fill forms by itself and no extra mechanical compaction is required as well as exhibits very good strength and durability. The unique properties of HPSCC come from a very precise choice of ingredients and their proportions in the mixture. A juxtaposition of this concrete with ordinary concrete reveals its higher content of Portland cement and superplasticizers. The presence of reactive mineral additives is also increased and silica fume is very commonly chosen for this purpose (1, 2).

According to various researchers investigating SCC (3-5), the mechanical properties of hardened SCC are related to the microstructure of concrete. However, a direct dependence between this relation and the method of mixture compaction has not been found. Consequently, vibration-compacted concrete and self-compacted concrete with the similar composition, will have similar mechanical properties. Nevertheless, this is not necessarily true of the bond between SCC and reinforcement steel.

The bond strength has not been studied very extensively in the case of SCC and the results are partially inconclusive. As far as the bond strength is concerned, SCC has been found to match or even outperform normal vibrated concrete [NVC] (6-8) and offers a lower scatter of results (4, 9). The bond stiffness i.e. the change in the bond strain increment relative to the bar displacement in concrete, in the case of SCC has also been reported to be higher (10-12). Unfortunately, there is little information on the impact of different mixture compositions on the bond phenomenon.

na przyrostu naprężeń wiązania w stosunku do przemieszczania pręta w betonie, w przypadku BSZ jest również większa (10-12). Niewiele jest natomiast danych dotyczących wpływu różnych składów mieszanek na zjawisko wiązania.

Jedną z ważniejszych właściwości wiązania pręta zbrojeniowego z betonem jest tak zwany efekt górnych prętów. Zjawisko to jest znane w literaturze od kilkadziesiąt lat (13, 14), ale tylko w przypadku WBZ. Badania BSZ wykazały, że jakość warunków wiązania ulega pogorszeniu wraz ze wzrostem odległości od dna formy. Wykazano jednak, że strefa tak zwanych „słabych” warunków wiązania praktycznie zanika, lub jej zasięg jest znacznie mniejszy, niż dla betonu zwykłego (6, 15-17). Podobną tendencję stwierdzono w przypadku BWW wysokiej jakości (18).

Dotychczasowe badania wiązania prętów zbrojeniowych z BSZ pozwalają na dość precyzyjne określenie tego zjawiska, dlatego sugeruje się, by dalsze rozważania skupić na BWW (17, 19). Na wiązanie BWW z prętami zbrojeniowymi mogą szczególnie wpływać wszelkie zmiany w składzie świeżej mieszanki, proces produkcji, a także końcowe osiadanie mieszanki betonowej. Wobec tego należy sprawdzić, czy wytyczne normowe i badania, na których opierają się modele projektowania konstrukcji z betonów zwykłych, mogą być również stosowane w przypadku konstrukcji wykonanych z BWW.

2. Wpływ położenia pręta zbrojeniowego – efekt górnych prętów

Położenie zbrojenia jest w ogólności określane jako odległość zbrojenia od dna formy. Z dotychczasowych badań wynika, że wzrost odległości zbrojenia od dna formy, czyli większa warstwa betonu pod prętem, wpływa na zmniejszenie siły wiązania (10, 11). Zjawisko to określane w literaturze jako „efekt górnych prętów” związane jest z procesami sedimentacji i osiadania świeżej mieszanki betonowej. Fizyczne podstawy tego zjawiska związane są ze szczególną formą segregacji, która polega na przemieszczaniu się części wody w kierunku powierzchni górnej mieszanki. Proces ten jest związany z sedimentacją i powoduje powstawanie słabszego betonu w trakcie formowania, o dużej porowatości. Jednocześnie w górnej części elementu pogarsza się wiązanie pręta zbrojeniowego z betonem, w wyniku tworzenia się pustek pod prętami. Pustki te powstają wskutek osiadania świeżej mieszanki betonowej.

Efekt górnych prętów jest uwzględniany w międzynarodowych normach budowlanych. Zgodnie z ACI Building Code (20), pręty poziome, usytuowane w elemencie w części górnej, gdy niżej znajduje się warstwa betonu o grubości większej niż 300 mm, mają gorsze wiązanie, którą należy zrekomensować dłuższą o 30% długością zakotwienia. Eurokod 2 (21) i Model Code 2010 (22) wprowadzają rozróżnienie pomiędzy „dobrymi” i „słabymi” warunkami wiązania. Zgodnie z zaleceniami europejskich norm (21, 22), pręty zbrojeniowe znajdujące się w strefie „słabego” wiązania, należy go zrekomensować przedłużoną o 43% długością zakotwienia.

One of the most important features of the steel-to-concrete bond is the top-bar effect. This phenomenon has been known in the scientific literature for several decades (13, 14), but only in the case of NVC. Research carried out on SCC has shown that the behaviour of such a concrete is either comparable to, or better than the behaviour of NVC for high elements and the top-bar effect is less intense for SCC mixtures (6, 15-17). The results indicate that the elements made of SCC have very similar bond conditions, along their heights. A similar tendency has been observed in high quality HPCs (18). Sufficient data has already been provided by the existing literature to gain confidence in the bond behaviour of SCC mixtures (17, 19). Thus, it has been suggested that further analyses should focus on new composition variations, such as HPSCC. Specifically, any changes in the composition of the mixture, the production process, the placing method and the final settlement of concrete, may play an important role in the resulting bond strength. Therefore, it is important to ensure that all the assumptions and test results, on which the structural design models are based for NVC construction, are also valid for HPSCC construction.

2. Effect of rebar position, top-bar effect

One of the most important aspects of the bond between concrete and steel is the so-called top-bar effect. In deep parts of concrete elements, this effect corresponds to a drop in the bond strength, as the depth of concrete under horizontal rebars increases (10, 11). The quality of the bond may be affected by various factors, such as the positions of bars during the concreting process, the composition of concrete and its consolidation method, as well as concrete slumps. Physically speaking, the effect corresponds to a specific form of bleeding, when water became partially elevated and reaches the surface of the concrete mixture. Given the sedimentary nature of the process, the final concrete is highly porous and weaker. Moreover, air bubbles cumulate under the rebars in the upper part of the element and this leads to a reduction of the steel-to-concrete bond.

The top-bar effect is taken into account in international building codes. According to the ACI Building Code (20), the development length should be increased by 30%, to compensate for the reduced bond in the upper part of a concrete element, with at least a 300 mm thick concrete layer, under the bars. Eurocode 2 (21) and Model Code 2010 (22) differentiate between ‘good’ and ‘poor’ bond conditions. According to the recommendations of standard (21, 22), the reinforcing bars located in the ‘poor’ bond condition zone, above 250 or 300 mm of a 600 mm or deeper member, the development length should be increased by 43%.

3. Scope of research

The steel-to-concrete bond is a multi-factors phenomenon which depends on a number of factors, such as: the bar diameter, bar type and principally the effective bond length, the position of the rebars of height – top-bar effect and the cover thickness. The author of this study has attempted to assess the change of the quality of

3. Zakres badań

Wiązanie pręta zbrojeniowego z betonem zależy od wielu czynników, a mianowicie: średnicy pręta, rodzaju pręta i stanu jego powierzchni, jednak przede wszystkim od efektywnej długości wiązania, położenia prętów zbrojeniowych w stosunku do wysokości – efekt górnych prętów, oraz od grubości otuliny.

W pracy podjęto próbę oceny zmiany warunków wiązania wzdłuż długości prętów zbrojeniowych. W szczególności celem niniejszej pracy jest zbadanie zmian wiązania betonu ze stalowymi prętami zbrojeniowymi, wzdłuż monolitycznych elementów o różnej długości, wykonanych z wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych i betonów zagęszczanych wibracyjnie, o tym samym stosunku wodno-spoiwowym, a także wykonanych ze składników o takich samych właściwościach. Uzyskane wyniki porównano z opublikowanymi wynikami badań „pull-out”, które przeprowadzono na próbkach sześciennych wykonanych z BSZ i WBZ. Łącznie wykonano 288 próbek sześciennych z 6 mieszanek i zbadano ich właściwości po upływie 28 dni, wykonując próbę „pull-out”, zgodnie z normą EN 10080:2007 (23).

4. Materiały i metody

4.1. Mieszanki betonowe

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z czterech mieszanek BSZWW, w których zawartość pyłu krzemionkowego, będącego zamiennikiem części cementu, wynosiła 5%, 10% i 15% w stosunku do masy cementu. Natomiast zawartość spoiwa, to znaczy pyłu krzemionkowego i cementu, oraz stosunek wodno-spoiwowy były stałe. Skład mieszanek opracowano na podstawie typowych mieszanek i wytycznych podanych w literaturze (1, 24). Badania przeprowadzono również na betonach referencyjnych zagęszczonych mechanicznie. W analizie uwzględniono dwa składy betonu BWW o takim samym stosunku wodno-spoiwowym i składnikach o takich samych właściwościach jak mieszanki BSZWW. Skład mieszanek betonowych podano w tabelicy 1, a ich właściwości mechaniczne w tabelicy 2. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą EN 12390-3 (25),

Tablica 1 / Table 1

COMPOSITION OF THE MIXES, kg/m³

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH, kg/m³

Ingredients/ Składniki	Recipe denotation/Oznaczenie mieszanek					
	HPC1	HPC2	HPSCC1	HPSCC2	HPSCC3	HPSCC4
Cement CEM I 42.5R	500	455	550	524	500	478
Water	160	160	176	176	176	176
Sand 0/2 mm / Piasek	668	668	790	790	790	790
Basalt aggregate 2/8 mm / Kruszywo bazaltowe	1240	1240	940	940	940	940
Silica fume Pył krzemionkowy	-	45	-	26	50	72
Superplasticizer	3.25	4.05	5.55	5.85	6.15	7.00
Water/binder ratio	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Silica fume content, %	0%	10%	0%	5%	5%	15%

bond conditions along the heights of test elements. In particular, the present study aims to investigate the change in the bond between concrete and steel rebars along monolithic elements of different heights, made of high-performance self-compacting and by vibration consolidated concretes, with the same water/binder (w/b) ratio and made of the components with the same properties. The results are compared with the published results concerning pull-out tests, which were conducted on cubic specimens produced using SCC and NVC mixtures. In total, 288 cubic specimens for 6 mixtures have been cast and tested at the age of 28 days by performing pull-out tests, according to EN 10080:2007 (23).

4. Materials and methods

4.1. Concrete mixtures

The study was performed on samples made of four HPSCC mixtures, in which the content of silica fume varied as 5%, 10% and 15% of cement, replacing part of the cement. However, the binder content i.e. cement and silica fume and the water/binder ratio equal 0.32 was constant. The composition of mixes was developed based on typical mixes and work guidelines (1, 24). The study was also conducted on reference concretes compacted mechanically.

Two HPC mixtures were used, composition with the same water/binder [w/b] ratio and components with the same properties as in the HPSCC mixtures. The properties of the concrete mixes are given in Table 1, and their mechanical properties in Table 2 where 'Cov' corresponds to the coefficient of variation, expressed as a percentage. Compressive strength tests were conducted according to EN 12390-3 (25), using cubic specimens 150 x 150 x 150 mm. The mean values of the compressive strength were determined based on 5 samples, for each concrete mixture. The results of the rheological tests of all fresh HPSCC mixtures and the corresponding classification according to (24), are also shown in Table 2.

4.2. Reinforcing bars

The bond tests were performed for ribbed reinforcing bars [B500SP]. A bar diameter of 16 mm, representative of the so-called mean diameters – 10-20 mm, was used (23).

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻYCH MIESZANEK BETONOWYCH I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU PO 28 DNIACH
FRESH PROPERTIES AND STRENGTH OF THE CONCRETE MIXES, AFTER 28 DAYS

Mix Symbol Oznaczenie mieszanki	Slump Opad stożka, mm	Slump class Klasa konsystencji	Slump flow Rozpływ mm	Slump flow class Klasa konsystencji	Slump flow time Czas rozplywu T ₅₀ , s	Viscosity class Czas rozplywu stożka	Fresh visual stability index Wskaźnik trwałości	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie	
								f _{cm} MPa	Cov %
HPC1	210	S4	-	-	-	-	-	85.2	2.8
HPC2	190	S4	-	-	-	-	-	90.4	4.8
HPSCC1	-	-	700	SF2	2.8	VS2	1	81.5	3.3
HPSCC2	-	-	680	SF2	2.7	VS2	0	90.7	4.7
HPSCC3	-	-	640	SF1	3.4	VS2	0	83.9	3.6
HPSCC4	-	-	670	SF2	3.2	VS2	0	81.4	1.8

na próbkach sześciennych 150 x 150 x 150 mm. Wytrzymałość na ściskanie oznaczała średnią z 5 próbek, dla każdej mieszanki betonowej. Wyniki badań reologicznych wszystkich świeżych mieszanek BSZWW oraz odpowiadająca im klasyfikacja według (24) zostały również przedstawione w tablicy 2.

4.2. Pręty zbrojeniowe

Badania wiązania wykonano dla prętów żebrowanych [B500SP]. Wykorzystano pręty o średnicy 16 mm, reprezentatywnej dla tzw. średnic średnich - 10-20 mm (23).

4.3. Elementy badawcze

Doświadczenia przeprowadzono na czterech typach elementów, o różnych wysokościach. Element referencyjny odpowiadał wymaganiom próbki zalecanym przez RILEM (26) i EN 10080:2007 (23), a pręt zbrojeniowy umieszczono prostopadle do kierunku betonowania. Pozostałe trzy elementy zaprojektowano tak, aby ich wysokość stanowiła wielokrotność modułu referencyjnego. Element niski składał się z 3 modułów referencyjnych, średni z 5, a element wysoki z 10. W przypadku stosowania betonów zagęszczanych wibracyjnie [BZW], betonowanie elementów prowadzono warstwami o wysokości około 50 cm. Każda układana warstwa mieszanki jak i ich powierzchnie kontaktowe zagęszczono mechanicznie, za pomocą buławy wibracyjnej. Zastosowana technologia zagęszczania stanowi podstawową metodę zagęszczania betonu w elementach o znacznej wysokości. Po okresie 21 dni od betonowania elementy zostały pocięte na elementarne części. Schemat elementów badawczych pokazano na rysunku 1. Dla każdej mieszanki betonowej przygotowano 4 próbki do badań, każdego rodzaju: referencyjnego, niskiego, średniego i wysokiego.

4.4. Metody badań

Badanie wiązania pręta przeprowadzono metodą „pull-out” według wytycznych RILEM (26) i EN 10080:2007 (23). Przyjęta metoda badawcza pozwala dokonać oceny wiązania prętów zbrojeniowych z betonem. Naprężenie wiązania oblicza się według następującego wzoru:

4.3. Description of the specimens

The experiments were conducted on four types of elements, of different heights. The reference element, conformed to the requirements for the specimen recommended by RILEM (26) and EN 10080:2007 (23), and the rebar was placed perpendicular to the direction of concreting. The other three elements had rebars perpendicular to the direction of concreting and their heights were multiples of the basic module. The small element comprised 3 basic modules, the medium element comprised 5 basic modules and the tall element comprised 10. The concrete mixture was provided from the upper side of the form. In the case of vibrationally-compacted concretes, placing of the elements was performed in layers having a height of approximately 50 cm. All mixture layers as well as their contacts were compacted mechanically using a vibration poker. The compaction technology applied was a primary method of concrete compaction, in elements of a significant height.

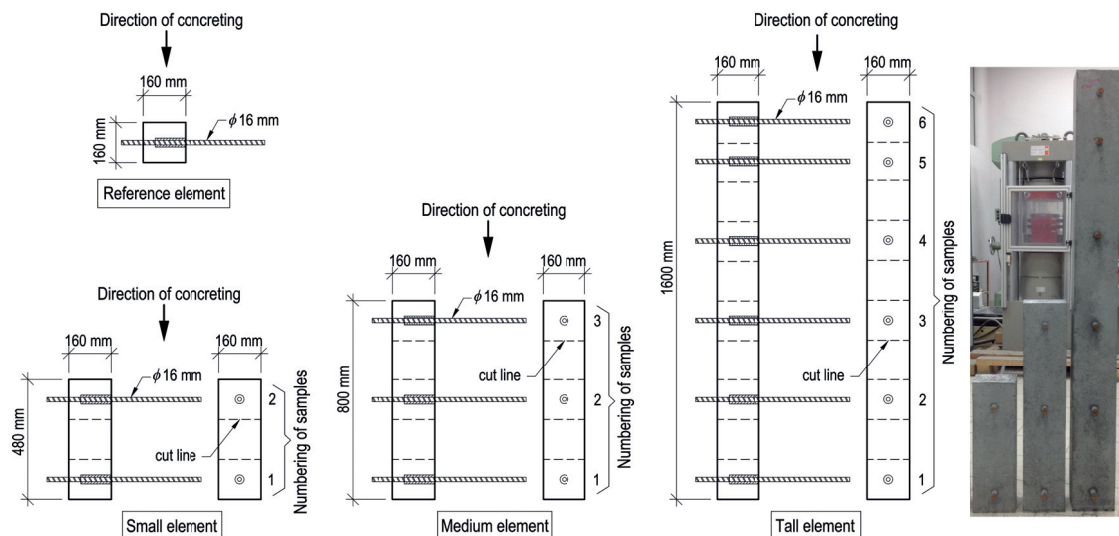
Next, the elements were cut into elementary parts 21 days after placing. A schematic view of the test elements is shown in Fig. 1. For each concrete mix, 4 samples were prepared for each type of elements: reference, small, medium and tall.

4.4. Test methods

The concrete bond tests carried out on the bars were performed using the RILEM (26) and EN 10080:2007 (23) method, based on the pull-out test. This is a fundamental method for the assessment of the reinforcing bars-concrete interaction, which depends on the concretes properties and the type of reinforcing bars. The value of the bond stress is calculated according to the following formula:

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

where: F, ϕ , l are, respectively: the applied load, the diameter of the reinforcing bar and the bond section length. The bond length was reduced to 3 ϕ because of high transferable bond forces in HPSCC and HPC. The pull-out force was applied progressively up to a bond failure and the relative slip of the bar was measured



Rys. 1. Schemat elementów do badań
 Fig. 1. Schematic view of the test elements

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

gdzie: F , ϕ , l oznaczają kolejno: siła działająca na pręt zbrojeniowy, średnica pręta zbrojeniowego oraz długość odcinka, na którym występuje wiązanie z betonem. Długość odcinka, na którym występuje wiązanie zmniejszono do 3ϕ , z uwagi na możliwość przenoszenia znacznych sił przyczepności w betonach BWWSZ i BWW. Siła działająca na pręt zbrojeniowy przykładana była stopniowo do osiągnięcia granicznych naprężeń przyczepności. Pomiar przemieszczeń nieobciążonego końca pręta zbrojeniowego względem betonu wykonano za pomocą dwóch czujników przemieszczeń liniowych (LVDT). Użyto komputerowego systemu gromadzenia danych. Przykładowy wykres zależności naprężenia wiązania - przemieszczenie pręta pokazano na rysunku 2.

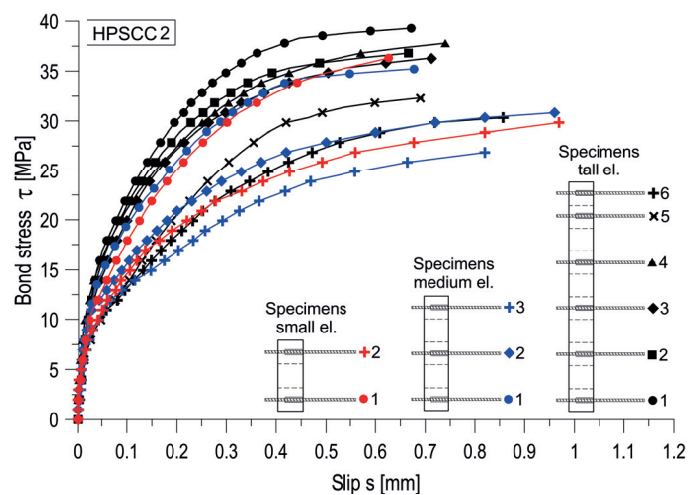
W artykule przyjęto dwie różne wartości reprezentatywne naprężeń wiązania, które często wykorzystywane są w literaturze dotyczącej analizowanego zagadnienia. Przyjęto graniczne naprężenie wiązania odpowiadające zniszczeniu połączenia pręt zbrojeniowy - beton - τ_{max} . Ze względu na jednoznaczną definicję tego kryterium jest ono najczęściej stosowane w literaturze (6-9). Drugą wartością reprezentatywną wiązania stosowaną w pracach (4, 7, 17) i podawaną w zaleceniu RILEM RC 6 (26), jest średnie naprężenie wiązania - τ_m . Oblicza się je według równania 2, jako średnią arytmetyczną naprężeń wiązania $\tau_{0,01}$, $\tau_{0,10}$ i $\tau_{1,00}$, odpowiadających przesunięciom pręta odpowiednio o 0,01, 0,10 i 1,00 mm.

$$\tau_m = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,10} + \tau_{1,00}}{3} \quad [2]$$

Otrzymane z badań przebiegi zależności naprężenie wiązania - przemieszczenie wykazują, że przemieszczenia w chwili osiągnięcia wartości τ_{max} dla betonów BWW i BWWSZ w większości przypadków nie przekraczają 1,00 mm. Podobne wyniki otrzymano w badaniach betonów o wysokiej wytrzymałości (27-29). W celu

using two linear variable displacement transducers (LVDT), connected to the unloaded end of the bar. A data acquisition system was used. Typical plots for all elements made of one mixture are given in the Fig. 2.

Two different representative values of bond stress, that are usually used in the literature dedicated to the problem, are considered here. There is a growing consensus (6-9) that the maximum bond stress, at the bond failure time (τ_{max}), is a good representative value to compare the effect of the rebar location in different concretes, given its straightforward and unambiguous definition. Another representative value, commonly used by researchers (4, 7, 17) and advertised in the RILEM Recommendation RC 6 (26), is the mean bond stress (τ_m). It is calculated following equation 2, as the arithmetic mean of the bond stresses $\tau_{0,01}$, $\tau_{0,10}$ and $\tau_{1,00}$ corresponding to slips of 0.01, 0.10 and 1.00 mm, respectively. Thus, both τ_{max} and τ_m were adopted in this work.



Rys. 2. Typowe krzywe zależności naprężenia wiązania - przemieszczenie pręta

Fig. 2. A typical plot of bond stress as a function of slip

wyznaczenia wartości średniej naprężeń wiązania, odpowiadającej zaleceniom RILEM (26), autor zaproponował dla betonów BWW i BWWSZ zastąpienie we wzorze 2 naprężeń wiązania $\tau_{1,00}$ przez $\tau_{0,5}$ - odpowiadającą przemieszczeniu pręta w stosunku do betonu o 0,5 mm.

5. Wyniki i dyskusja

5.1. Warunki przyczepności

W przeprowadzonych doświadczeniach elementy badawcze były tak zaprojektowane, aby umożliwić analizę wpływu położenia prętów zbrojeniowych – odległość prętów od dna formy, w zależności od składu i właściwości mieszanek betonowych. Wyniki badań w tym zakresie przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Na osi odciętych tych rysunków wprowadzono wskaźnik wiązania w funkcji pozycji pręta, rozumiany jako stosunek wiązania betonu z prętami zbrojowymi rozmieszczonymi na poszczególnych poziomach – odległościach od dna formy, do siły wiązania betonu z prętami zbrojowymi, uzyskanymi dla próbki dolnej. Na rysunku 6 porównawczo przedstawiono stosunek naprężeń wiązania prętów górnych do dolnych. W betonach BWWSZ, BWW, tak jak i w betonach zwykłych, jakość warunków powstawania wiązania ulega pogorszeniu wraz ze wzrostem odległości od dna formy. Niemniej jednak zmodyfikowana mikrostruktura oraz odmienne właściwości mechaniczne betonów BWWSZ i BWW powodują, że strefa tak zwanych „słabych” warunków wiązania praktycznie zanika, lub jej zasięg jest znacznie mniejszy niż znajdowano w betonach zwykłych (13, 14).

Przeprowadzone obserwacje stanu powierzchni betonu wokół zbrojenia pozwoliły na ustalenie występowania strefy „słabego” wiązania, pod powierzchnią prętów zbrojeniowych. Stwierdzono lokalne „osłabienie” betonu na skutek uwięzienia pęcherzyków powietrza pod powierzchnią zbrojenia, powstawania pustek po nie związanej wodzie oraz osiadania świeżej mieszanki betonowej [rysunek 3]. Wymienione zjawiska występowały niezależnie od położenia zbrojenia w świeżej mieszance betonowej, z tendencją do nasilania się w górnej części elementu. W wyniku zastąpienia części cementu przez pył krzemionkowy wyżej wymienione zjawiska występowały w mniejszej skali.

5.1.1. Graniczne naprężenia wiązania

Maksymalny spadek granicznych naprężeń wiązania, między górną i dolną częścią elementów, zależał od składu mieszanki BWWSZ i wynosił od 5% do 22% dla elementu niskiego, od 14% do 32% dla elementu średniego oraz od 15% do 34% w przypadku elementu wysokiego. W przypadku betonów BWW otrzymano następujące zmniejszenie granicznych naprężeń wiązania odpowiednio dla BWW2 i BWW1: element niski 12% oraz 19%, średni 23% i 32%, wysoki 16% i 37%. Uzyskane wartości były wyraźnie uzależnione były od zawartości pyłu krzemionkowego w mieszance betonowej. Należy zaznaczyć, że otrzymane maksymalne zmniejszenie siły wiązania były przypisane zawsze mieszance bez dodatku pyłu

$$\tau_m = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,10} + \tau_{1,00}}{3} \quad [2]$$

As demonstrated by the relations between the bond stress and displacement, the slip at τ_{max} in the case of HPC and HPSCC, is typically not higher than 1.0 mm. Many other works on high-strength concretes have provided similar results (27, 28). In the current work, the bond stress $\tau_{1,00}$ in formula 2, was replaced with $\tau_{0,5}$ corresponding to slips of 0.5 mm. This modification allowed the authors to find the mean bond stress following the RILEM guidelines (26) in the case of HPC and HPSCC.

5. Results and discussion

5.1. Bond conditions

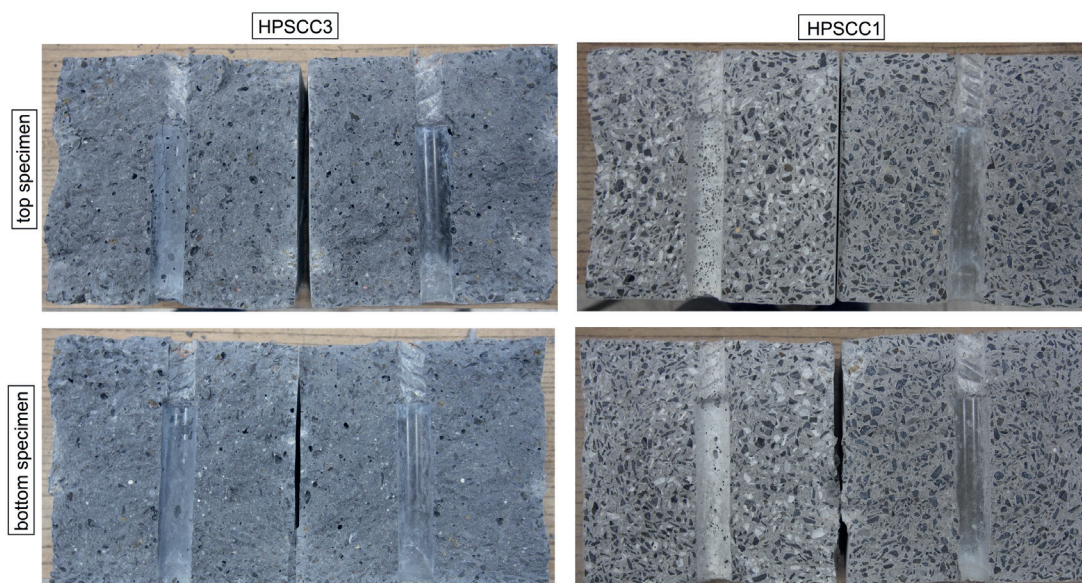
In this experiment, the tested elements were designed to allow analysis of the rebar position – the reinforcement distance from the lower element surface, depending on the composition and properties of the concrete mixtures. The test results in this respect are presented in Figs. 3 and 4. The abscissae in the Figs. correspond to the rebar position to bond efficiency ratio, meant to be the relation between the concrete bond with the rebar positions at specific levels – distances from the bottom of the form, and the concrete bond to the rebars, obtained for the lower sample. In Fig. 5, the top-to-bottom bond stress ratios of all mixtures are comparatively presented.

In HPSCC, HPC, as well as for ordinary concretes, the quality of bond conditions is subject to deterioration with an increase in the distance from the bottom of the form. However, the modified microstructure and different mechanical properties of HPSCCs and HPCs make the zone of the so-called ‘poor’ bond conditions practically disappeared, or its range is significantly lower, than in the ordinary concretes (13, 14).

An inspection of the concrete surface condition around the reinforcement revealed the presence of a ‘poor’ bond zone, under the surface of the rebars. Local weakening of the concrete, as a result of air bulbs, captured under the reinforcement surface and the formation of voids after the free water and settlement of the fresh concrete mixture was observed. The phenomena listed here were present, regardless of the reinforcement location in the fresh concrete mixture, with a tendency to increase in the upper part of the element. As a result of replacing a part of the concrete with silica fume, these phenomena were present in a lower scale.

5.1.1. Ultimate bond strength

The maximum reduction in the ultimate bond strength, between the upper and lower zones of the elements, depended on the composition of the HPSCC mixture and was between 5% and 22% for the small element, 14% and 32% for the medium element, and 15% to 34%, for the tall element. In the case of the HPCs, the following values of the borderline ultimate bond strength reduc-



Rys. 3. Powierzchnia betonu pod i nad prętem zbrojeniowym - przykład dla elementu o średniej wysokości

Fig. 3. The concrete surface under and above the reinforcing bar – example for the element of medium height

krzemionkowego. Mieszanki BWWSZ i BWW bez dodatku pyłu krzemionkowego są bardziej podatne na zmniejszenie siły wiązania w górnej części elementów badawczych. Brak takiego efektu w przypadku betonów modyfikowanych pyłem krzemionkowym związany jest ze wzrostem spójności betonu, zmniejszeniem segregacji składników i wydzielaniem wody wolnej (4, 17).

Prezentowane w literaturze wyniki badań odnoszące się do BNW mają spadek siły wiązania między górną i dolną częścią elementu o średniej wysokości (1,0 m) do 39% (6), a dla elementu wysokiego (1,5 m) do 55% (4). W przypadku BNW odnotowywano zmniejszenie siły wiązania dla elementu o średniej wysokości (1,0 m) do 50% (6), a dla elementu wysokiego (1,5 m) do 74% (4).

Przeprowadzone badania wykazały, że zmiana warunków wiązania wzdłuż wysokości elementów wykonanych z BWWSZ i BWW przebiega podobnie [rysunek 4]. Betony BWWSZ i BWW uzyskały również bardzo zbliżone maksymalne wartości zmniejszenia granicznych naprężeń wiązania między górną i dolną częścią elementów. Wynika to z wysokiej jakości mieszanek BWWSZ i BWW – mała zawartość wody, duża zawartość cementu wysokiej klasy, dodatki modyfikujące, korzystny udział drobnego kruszywa, która powoduje, że zjawiska związane z segregacją składników mieszanki betonowej ulegają zmniejszeniu i spowolnieniu. Tym samym warunki wiązania w górnej części elementów wykonanych z BWWSZ i BWW nie ulegają znacznemu pogorszeniu. Wcześniejsze badania (4, 16) wykazały, że BSZ wykazuje inne zachowanie niż BNW. BSZ wykazywał około 35% mniejszy spadek granicznych naprężeń wiązania między górną i dolną częścią elementu, w porównaniu z BNW.

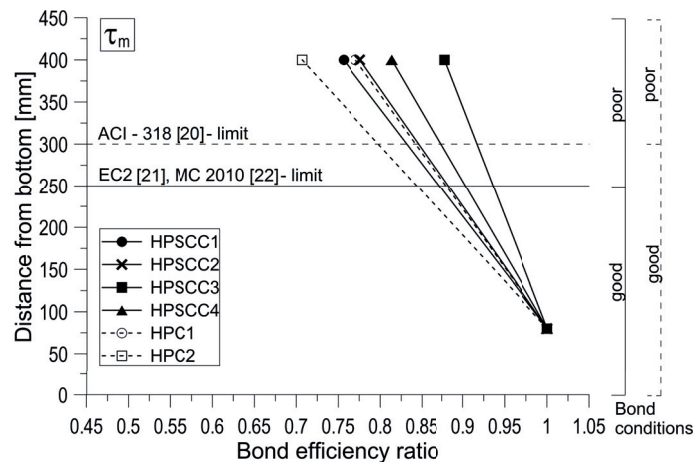
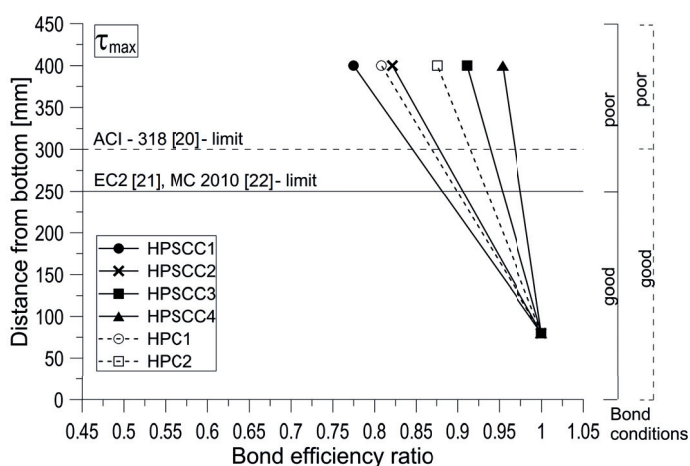
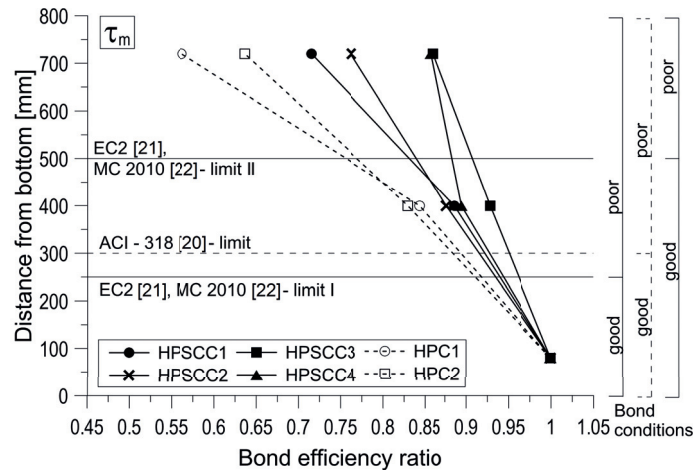
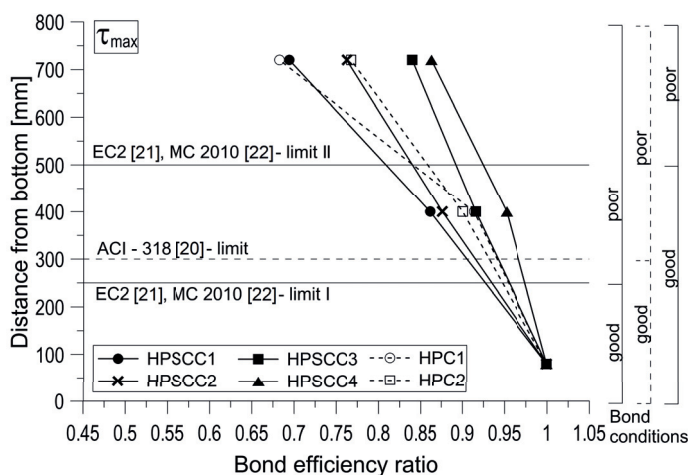
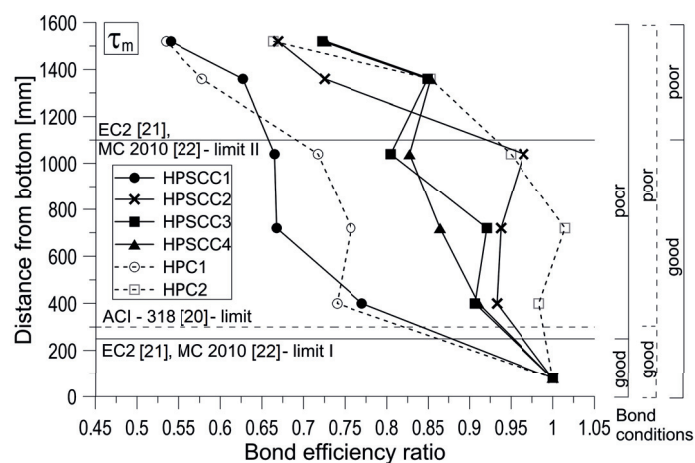
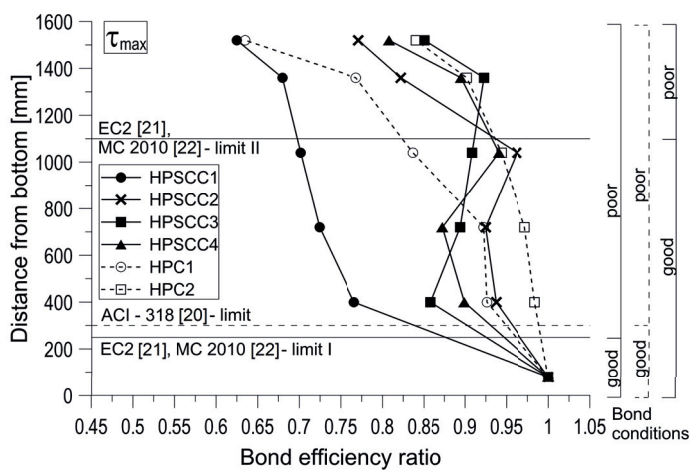
5.1.2. Średnie naprężenia wiązania

Maksymalny spadek średnich naprężeń wiązania między górną i dolną częścią elementów zależał od składu betonu BWWSZ oraz wysokości elementu. Uzyskano następujące wartości zmniejszenia

tion were obtained for HPC2 and HPC1, respectively: the small element - 12% and 19%, the medium one - 23% and 32%, the tall element - 16% and 37%. The values obtained clearly depended on the silica fume content in the concrete mixture. It is important to stress that the maximum bond reduction were attributed each time to the mixture without silica fume. The HPSCC and HPC mixtures without silica fume addition are more prone to a bond reduction, in the upper zones of the elements. A lack of such an effect, in the case of the concretes modified with silica fume, is associated with an increase in concrete strength, a decrease of porosity and in component segregation as well as the release of concrete bleeding water (4, 17).

Studies results presented in the literature applying to SCCs, give the values of the bond reduction for elements of a medium height = 1.0 m of up to 39% (6) and up to 55% for tall elements = 1.5 m (4). In the case of NVCs, a bond reduction was noted for elements of a medium height = 1.0 m) as being up to 50% (6), and up to 74% for tall elements = 1.5 m (4).

The studies performed in this work were showing that the change in the quality of bond conditions, along the height of the tested elements made of the HPSCC and HPC, has a similar course (Fig. 3). Moreover, the HPSCCs and HPCs exhibit very similar maximum values of the ultimate bond strength reduction, between the upper and lower zones of the elements. This is caused by the high quality of both the HPSCC and HPC mixture, principally low water content, high content of cement, modifying additives, optimized content of fine aggregate, which result in phenomena associated with the concrete mixture component segregation being decreased and slowed down. Thus, the quality of the bond conditions in the upper zone of the elements made of the HPSCC and HPC, is not subject to significant deterioration. Earlier studies (4, 16) have shown that SCC presents a different behaviour, compared to NVC. The SCC had an approximately 35% lower reduction in the ultimate bond



Rys. 4a. Zmiana wskaźnika wiązania w zależności od lokalizacji zbrojenia [graniczne naprężenia wiązania]

Fig. 4a. Variation of maximum bond stress with height

średnich naprężeń wiązania: dla elementu niskiego od 12% do 24%, dla elementu średniego od 14% do 28%, a dla elementu wysokiego od 27% do 46%. W przypadku BWW uzyskano następujące zmniejszenie, odpowiednio dla BWW2 i BWW1: element niski 29% i 23%, element średni 36% i 44% oraz element wysoki 34% i 47%. Zmiana średnich naprężeń wiązania wzdłuż wysokości elementów wykonanych z HPSCC jest bardziej jednorodna niż w przypadku HPC.

Rys. 4b. Zmiana wskaźnik wiązania w zależności od lokalizacji zbrojenia [średnie naprężenia wiązania]

Fig. 4b. Variation of mean bond stress with height

strength, between the upper and lower zones of the elements, compared to NVC.

5.1.2. Mean bond strength

The maximum reduction in the mean bond strength, between the upper and lower zones of the elements, depended on the composition of the HPSCC as well as of the height of the element analyzed. The following values of the mean bond strength reduction were obtained: the small element - between 12% and 24%, the

5.1.3. Wpływ warstwy betonu pod prętem zbrojeniowym

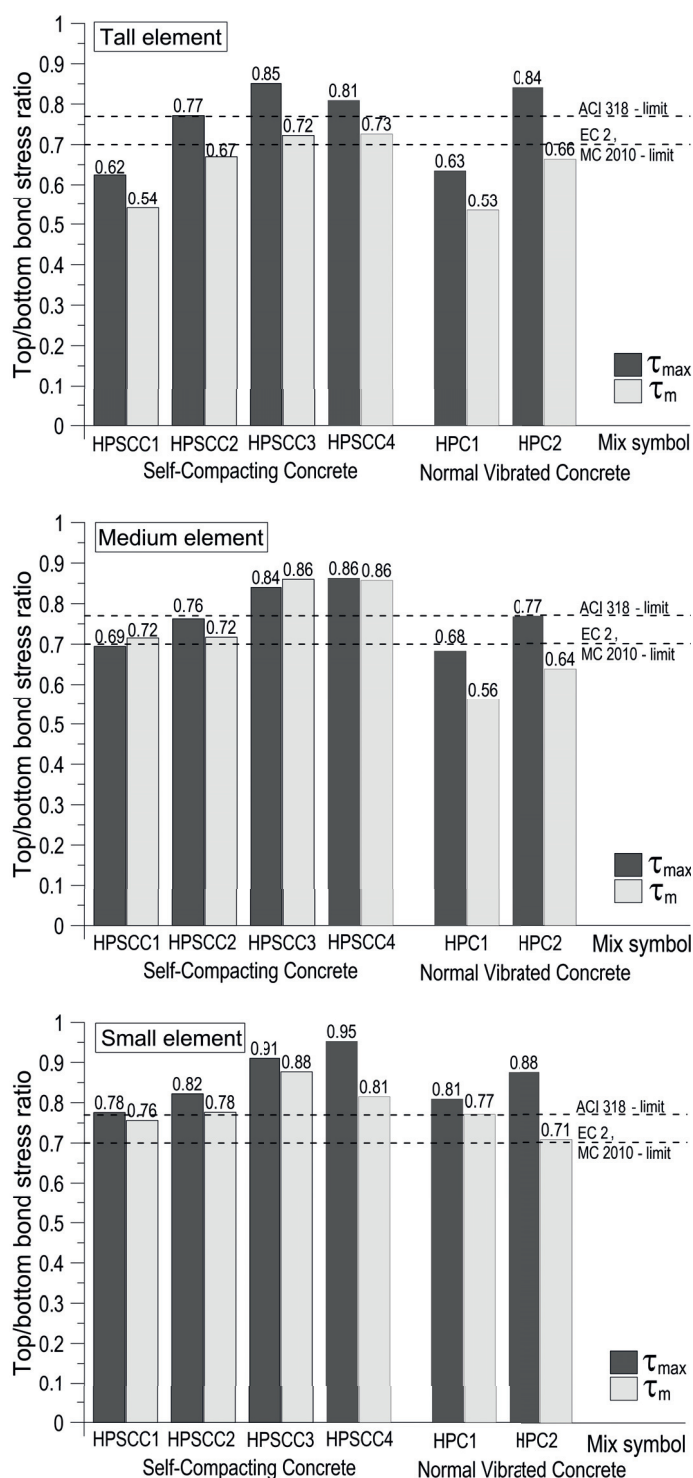
Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku mieszanki bez dodatku pyłu krzemionkowego, występuje wyraźny spadek granicznych i średnich naprężeń wiązania wraz ze wzrostem warstwy betonu pod prętem zbrojeniowym [rysunek 6]. Ta tendencja nie występuje w przypadku mieszanek modyfikowanych pyłem krzemionkowym. Wyniki doświadczeń wykazują, że zwiększenie zawartości mieszanki BWWSZ, w wyniku zastąpienia części cementu pyłem krzemionkowym, prowadzi do stopniowego wzrostu wskaźnika τ_{top}/τ_{ref} w przypadku granicznych naprężeń wiązania odpowiednio dla elementu niskiego od 0,81 do 0,99, średniego od 0,75 do 0,92, a dla elementu wysokiego od 0,70 do 0,98. Jest to spowodowane segregacją składników betonu wynikającą z grawitacji, która ma większy wpływ w przypadku mieszanek o mniejszej zawartości. Podobne wyniki wystąpiły w przypadku średniej wartości wiązania. Wzrost wskaźnika τ_{top}/τ_{ref} wyniósł dla elementu niskiego od 0,79 do 0,97, średniego od 0,75 do 1,02, a dla elementu wysokiego od 0,70 do 0,95. Analogiczne wyniki uzyskano również dla betonu BWW.

5.1.4. Wpływ warstwy betonu nad prętem zbrojeniowym

W przeprowadzonych badaniach wartości wskaźnika τ_{bot}/τ_{ref} dla granicznych naprężeń wiązania były uzależnione od wysokości warstwy betonu zalegającej powyżej badanej próbki. Nie stwierdzono jednak wpływu rodzaju mieszanki jak i jej składu na rozpatrywany wskaźnik [rysunek 7]. Średnia wartość wskaźnika τ_{bot}/τ_{ref} dla granicznych naprężeń wiązania w przypadku betonu BWWSZ wyniosła dla elementu niskiego 1,07, dla średniego 1,08, a dla wysokiego 1,14. Podobne wyniki uzyskano dla betonu BWW. Wskaźnik τ_{bot}/τ_{ref} dla średnich naprężeń wiązania uzyskał wartości dla elementu niskiego i średniego około 1,10. Znaczący wzrost wskaźnika τ_{bot}/τ_{ref} do wartości 1,28 odnotowano w przypadku elementu wysokiego. Stwierdzony wzrost wskaźnika dla średnich i granicznych naprężeń wiązania można przypisać wystąpieniu w dolnej części wysokiego elementu znacznego obciążenia betonem, powodującego wzrost gęstości mieszanki. Wpływa to na znaczną poprawę jakości otulenia pręta betonem.

5.2. Wpływ wysokości elementu na wiązanie

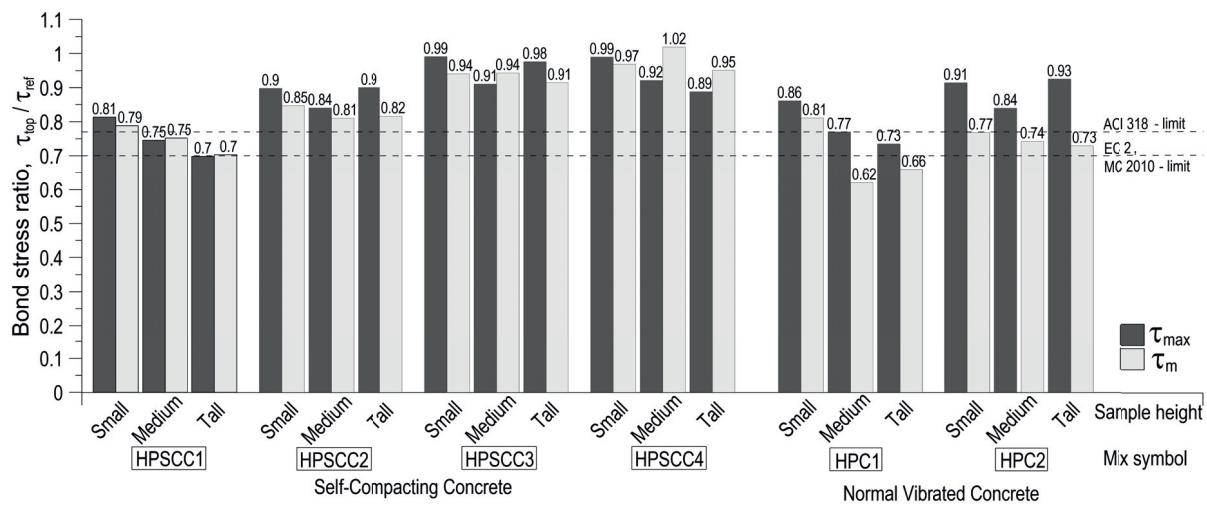
Przeprowadzona analiza w punkcie 5.1. wykazała, że „dobre” warunki wiązania mają względne znaczenie, uzależnione między innymi od wysokości elementu. Wraz ze wzrostem wysokości elementu wzrasta również siła wiązania prętów dolnych. Wzrost siły wiązania jest uzależniony od wysokości warstwy betonu położonej nad prętem zbrojeniowym. W związku z tym elementy o znacznej wysokości wykazują większą różnicę między siłą wiązania prętów górnych i dolnych. Usunięcie tego efektu można uzyskać dokonując porównania otrzymanych wartości naprężeń wiązania względem wartości uzyskanych dla elementu referencyjnego, wykonanego zgodnie z zaleceniami normy (23). Przy tak przeprowadzonej analizie maksymalne wartości zmniejszenia granicznej i średniej siły wiązania górnych prętów są znacznie mniejsze niż w podejściu klasycznym, zaprezentowanym w punkcie 5.1 oraz na



Rys. 5. Współczynnik porównujący naprężenia przyczepności próbek górnych do dolnych

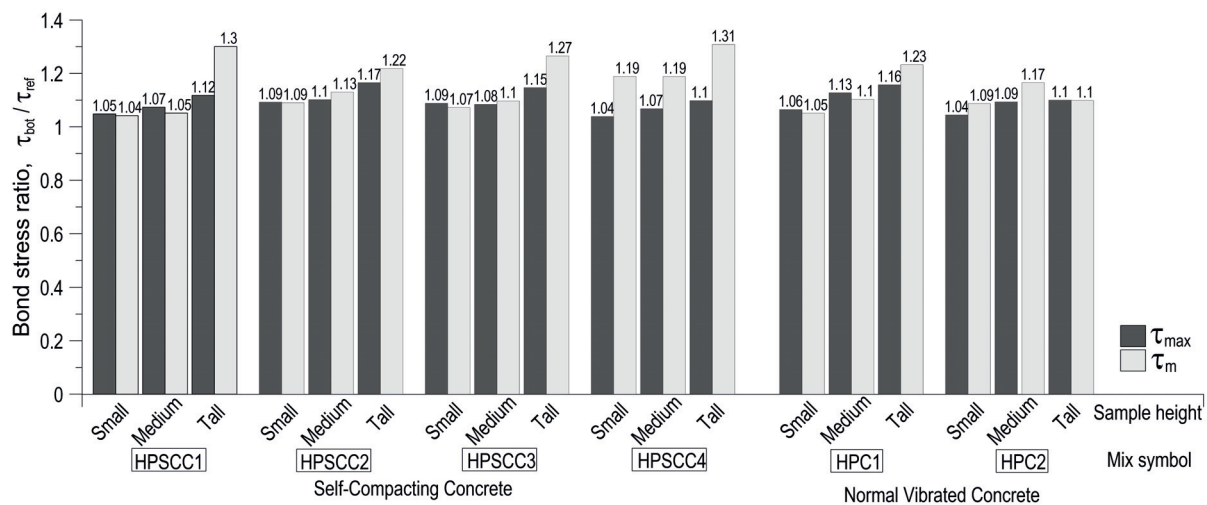
Fig. 5. Top-to-bottom bond stress ratio

medium element - between 14% and 28%, and the tall element - between 27% and 46%. In the case of HPCs, the following values of reduction were obtained for HPC2 and HPC1, respectively: the small element - 29% and 23%, the medium element - 36% and 44%, and the tall element - 34% and 47%. The mean bond strength changes along the height of the elements, made of the HPSCC which is more homogeneous than in the case of the HPC.



Rys. 6. Współczynnik porównujący naprężenia wiązania próbek górnych do referencyjnych

Fig. 6. Top-to-reference bond stress ratio



Rys. 7. Współczynnik porównujący naprężenia wiązania próbek dolnych do referencyjnych

Fig. 7. Bottom-to-reference bond stress ratio

rysunku 5. Spadek granicznych naprężeń wiązania próbek górnych w stosunku do referencyjnych zależał ściśle od składu mieszanki betonowej BWWSZ. W przypadku betonu bez dodatku pyłu krzemionkowego zmniejszenie to wyniosło dla elementu niskiego 19%, średniego 25%, a dla elementu wysokiego 30%. Betony BWWSZ z dodatkiem pyłu krzemionkowego, wynoszącego 5%, 10% i 15% masy cementu, osiągały następujące zmniejszenia: element niski od 1% do 10%, element średni od 8% do 16%, element wysoki od 2% do 11%. W przypadku betonów BWW otrzymano następujące zmniejszenie granicznych naprężeń wiązania odpowiednio dla BWW2 i BWW1: element niski 8% i 14%, średni 16% i 23%, wysoki 7% i 27%.

6. Wnioski

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena zmian siły wiązania pręta zbrojeniowego do betonu, w elementach wykonanych z betonu BWWSZ. Uzyskane wyniki porównano z odpowia-

5.1.3. Impact of the underlying layer

As can be seen [Fig. 6], for the mixture without the silica fume addition, there is an evident decrease in the ultimate and mean bond strength along with an increase in the concrete layer under the rebar. The found tendency does not occur in the case of the mixtures, modified with silica fume. The experimented results show that an increase in the HPSCC mixtures coherence, as a result of replacing part of cement with silica fume, leads to a gradual increase in the τ_{top}/τ_{ref} ratio in the case of the ultimate bond strength: the small element - between 0.81 and 0.99, the medium element - between 0.75 and 0.92, and the tall element - between 0.70 and 0.98, respectively. This is thought to result from static segregation due to gravity, which is more intense for mixtures with lower coherence. Similar results were noted in the case of the mean bond strength. The increase in the τ_{top}/τ_{ref} ratio was: for the small element - between 0.79 and 0.97, the medium element - between 0.75 and 1.02, and the tall element - between 0.70 and 0.95. Analogous results were obtained for the HPC.

dającymi im wartościami siły wiązania w przypadku elementów wykonanych z betonu BWW, o podobnych wytrzymałościach na ściskanie. Z wyników tych doświadczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- Niezależnie od zastosowanego betonu – BWWSZ lub BWW stwierdzono, że siła wiązania pręta zbrojeniowego jest tym mniejsza im większa jest grubość warstwy betonu pod prętem.
- Zmiana granicznego naprężenia wiązania wzdłuż wysokości elementów badawczych wykonanych z BWWSZ i BWW przebiega podobnie, a otrzymane zmniejszenie naprężeń wiązania są porównywalne. W górnej części elementów graniczne naprężenia wiązania były mniejsze niż w strefie dolnej od 5% do 34% w przypadku BWWSZ i od 12% do 37% dla BWW. W przypadku średnich naprężeń wiązania stwierdzono spadek od 12% do 46% dla BWWSZ i od 23% do 47% w przypadku BWW.
- Wykazano, że zmniejszenie granicznego naprężenia wiązania pomiędzy górną częścią elementów badawczych, a próbkami referencyjnymi jest znacznie mniejsze niż między górną i dolną częścią tych elementów. W przypadku betonu bez dodatku pyłu krzemionkowego zmniejszenie wyniosło 19% dla elementu niskiego, 25% dla elementu średniego i 30% dla elementu wysokiego. Betony BWWSZ z dodatkiem pyłu krzemionkowego, wykazywały następujące zmniejszenie granicznych naprężeń wiązania: element niski od 1% do 10%, element średni od 8% do 16%, element wysoki od 2% do 11%.
- W przypadku betonów o wysokiej jakości BWWSZ i BWW, zawierających dodatek pyłu krzemionkowego, siła wiązania wzdłuż wysokości elementów jest prawie stała. Obowiązujące przepisy normowe wydają się być niedostosowane do tych betonów. Wyniki badań i analiz przedstawionych w niniejszym opracowaniu, wskazują na konieczność ustalenia nowych kryteriów oceny wiązań betonu z prętami zbrojącymi, w przypadku betonów o wysokich właściwościach.

Literatura / References

1. H. T. Le, M. Müller, K. Siewert, H.-M. Ludwig, The mix design for self-compacting high performance concrete containing various mineral admixtures, *Materials and Design*, 72, 51–62 (2015).
2. M. Gesoğlu, E. Güneşli, E. Özbay, Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Construction and Building Materials*, 23, 1847–1854 (2009).
3. P. L. Domone, A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 29, 1, 1–12 (2007).
4. M. Valcuende, C. Parra, Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes, *Construction and Building Materials*, 23, 162–170 (2009).
5. G. de Schutter, P. J. M. Bartos, P. Domone, J. Gibbs: *Self-compacting concrete*. Whittles Publishing, Dunbeath 2008.
6. A. Castel, T. Vidal, K. Viriyametanont, R. François, Effect of reinforcing bar orientation and location on bond with self-consolidating concrete, *ACI Structural Journal*, 103, 4, 559–567 (2006).

5.1.4. Impact of the overlying layer

In the conducted studies, the values of the $\tau_{\text{bot}}/\tau_{\text{ref}}$ ratio for the ultimate bond strengths, depended on the overlying concrete layer above the tested sample. However, no effect of the mixture type and the composition on the analyzed ratio was found [Fig. 7]. The mean value of the $\tau_{\text{bot}}/\tau_{\text{ref}}$ for the ultimate bond strength in the case of the HPSCC was 1.07 for the small element, 1.08 for the medium element, and 1.14 for the tall element. Similar results were obtained for the HPC. The $\tau_{\text{bot}}/\tau_{\text{ref}}$ ratio for mean bond strengths had values of about 1.10 for the small and medium elements. A significant increase in the $\tau_{\text{bot}}/\tau_{\text{ref}}$ ratio, up to a value of 1.28, was noted for the tall element. The found increase of the ratio for the mean and ultimate bond strength may be explained by significant concrete pressure which occurred in the lower part of the tall element, causing an increase in the mixture density. This results in a significant improvement in the quality of the concrete lagging around the rebar.

5.2. The effect of the elements height on bond conditions

The analysis described in point 5.1 showed that 'good' bond conditions is a relative term dependent on, for example, the element height. The lower rebar bond also increases with the element height. The value of the bond increase is dependent on the height of the overlying concrete layer. As a result, the elements with a significant height are showing the larger difference between the upper and lower rebar bonds. Elimination of the presented effect can be obtained by comparing the bond conditions with the values found for the reference element, made according to the recommendations (23). With an analysis performed as such, the maximum and mean ultimate bond strength reduction values for the top rebars are much lower than with the classic approach, presented in point 5.1 and in the Fig. 5. The maximum reduction in the ultimate bond strength between the upper zones of the elements and the reference samples, clearly depended on the composition of the HPSCC mixture. In the case of the concrete without silica fume addition, the reduction was 19% for the small element, 25% for the medium element and 30% for the tall element. The HPSCCs with a silica fume addition of 5%, 10% and 15% by mass of cement, achieved the following strength reduction: the small element - between 1% and 10%, the medium element - between 8% and 16%, and the tall element - between 2% and 11%. In the case of the HPCs, the following values of the borderline ultimate bond strength reduction were obtained for HPC2 and HPC1, respectively: the small elements – 9% and 14%, the medium elements – 16% and 23% and the tall elements – 7% and 27%.

6. Conclusions

The main scope of the present study was to assess changes in the bond of bars in elements made of HPSCC. The results were compared with the corresponding bond values of HPC mixtures, with similar compressive strengths. The following conclusions can be drawn from the results of these experiments:

7. P. Desnerck, G. De Schutter, L. Taerwe, Bond behaviour of reinforcing bars in self-compacting concrete: Experimental determination by using beam tests, *Materials and Structures*, **43**, 53–62 (2010).
 8. A. A. A. Hassan, K. M. A. Hossain, M. Lachemi, Bond strength of deformed bars in large reinforced concrete members cast with industrial self-consolidating concrete mixture, *Construction and Building Materials*, **24**, 520–530 (2009).
 9. Y. W. Chan, Y. S. Chen, Y. S. Liu, Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete, *ACI Structural Journal*, **100**, 4, 490–498 (2003).
 10. G. Wang, J. Zheng, Bond behaviors of self-compacting concrete, in: Z. Yu, C. Shi, K.H. Khayat, Y. Xie (Eds.), *Proc. First Int. Symp. Des. Perform. Use Selfconsolidating Concr.*, pp. 465–471, China 2005.
 11. A. Schiessl, K. Zilch, The effects of the modified composition of SCC on shear and bond behaviour. In: Ozawa K, Ouchi M, editors. *Proceedings of second international RILEM symposium on selfcompacting concrete*, pp. 501–506, Tokyo 2001.
 12. G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, D. Weibe, Bond of reinforcement in self-compacting concrete (SCC) under monotonic and cyclic loading. In: Wallevik O, Nielsson I, editors. *Proceedings of third international RILEM symposium on self-compacting concrete*, pp. 939–947, Reykjavik 2003.
 13. J. J. Luke, B. S. Hamad, J. O. Jirsa, The influence of casting position on development and splice length of reinforcing bars. *Research Report No. 242-1*, Austin 1981.
 14. P. R. Jeanty, D. Mitchell, M. S. Mirza, Investigation of “top bar” effects in beams. *ACI Materials Journal*, **85**, 3, 251–257 (1988).
 15. W. J. Long, K. H. Khayat, G. Lemieux, S. D. Hwang, F. Xing, Pull-out strength and bond behavior of prestressing strands in prestressed self-consolidating concrete, *Materials* (2014).
 16. K. H. Khayat, K. Manai, A. Trudel, In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete, *ACI Material Journal*, **94**, 6, 491-500 (1997).
 17. K. G. Trezos, I. P. Sfikas, K. Orfanopoulos, Bond of self-compacting concrete incorporating silica fume: Top-bar effect, effects of rebar distance from casting point and of rebar-to-concrete relative displacements during setting, *Construction and Building Materials*, **73**, 378–390 (2014).
 18. P. Dybel, K. Furtak, The effect of ribbed reinforcing bars location on their bond with high-performance concrete, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**, 4, 1070–1077 (2015).
 19. I. P. Sfikas, K. G. Trezos, Effect of composition variations on bond properties of Self-Compacting Concrete specimens, *Construction and Building Materials*, **41**, 252–262 (2013).
 20. ACI 318-11, Building code requirements for structural concrete (ACI318-11) 2011.
 21. EN-1992-1-1, Eurocode 2 - Design of concrete structures, Part 1-1 Gen. Rules Rules Build., 2008.
 22. FIB, Model Code 2010, *Fib Model Code Concr. Struct.* 2010. (2011).
 23. EN 10080, Steel for the Reinforcement of Concrete, 2007.
 24. The European Guidelines for Self Compacting Concrete: Specification, Production and Use, 2005.
 25. EN 12390-3, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 2009.
 26. 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.
- Regardless of the concrete type, a reduction of the bond stress with an increase of the distance from a rebar to the bottom of the form was found.
 - The changes of the bond along the height of the elements made of the HPSCC and the HPC are similar. Moreover, the maximum values of the ultimate bond reduction obtained are comparable. Depending on the mix, the loss in the ultimate bond stress between the upper and lower zones of the elements varies between 5% and 34% in the HPSCC and between 12% and 37% in the case of HPC.
 - The changes of the mean bond strength along the height of the elements made of the HPSCC is more homogeneous than in the case of the HPC. Depending on the mix, the loss in the mean bond between the upper and lower zones of the elements varies between 12% and 46% in the HPSCC, and between 23% and 47% in the HPC.
 - A comparison of the bond condition with the reference element showed that the reduction of the ultimate bond stress between the upper zones of the elements and the reference samples is much lower than between the upper and lower zones of the elements. In the case of the concrete without silica fume addition, the reduction is 19% for the small element, 25% for the medium element and 30% for the tall element. The HPSCCs with the silica fume addition exhibit the following reduction of bond: the small element - between 1% and 10%, the medium element - between 8% and 16%, and the tall element - between 2% and 11%.
 - In high-quality HPSCCs and HPCs, containing the powder addition such as silica fume, the strength of bond along the elements height is nearly constant. The code provisions appear to be inappropriate for HPSCC and HPC. The results of the studies and analyses presented in this paper, indicate that new criteria for the assessment of the bond strength should be established for HPSCC and HPC.

27. P. Dybeł, K. Furtak, Influence of silica fume content on the quality of bond conditions in high-performance concrete specimens, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **17**, 4, 795–805 (2017).
28. P. Dybeł, D. Walach, K. Ostrowski, The top-bar effect in specimens with a single casting point at one edge in high-performance self-compacting concrete, *Journal Advanced Concrete Technology*, **16**, 282–292 (2018).
29. Z. Huang, B. Engström, J. Magnusson, 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.