

dr inż. Milena Kucharska^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2805-8768

dr hab. inż. Piotr Dybel, prof. uczelni¹⁾

ORCID: 0000-0001-7991-1576

Influence of casting method on bond performance and self-compacting concrete properties

Wpływ metody podawania mieszanki na właściwości betonu samozagęszczalnego

DOI: 10.15199/33.2026.02.01

Abstract. A self-compacting concrete mixture, due to its specific rheological properties, enables placement methods that differ from those applied in conventional concretes, including placement from the bottom of a form. This paper reports on an experimental investigation into the influence of placing technique (top-down and bottom-up) on the strength properties of self-compacting concrete and on the steel–concrete bond performance. Bond tests were performed using the pull-out method. The bottom-up casting technique was found to enhance the uniformity of concrete strength and bond conditions within the specimens, and to improve bond performance overall, particularly in the upper zones of those elements. Given the increasing practical relevance of self-compacting concrete and its alternative casting methods as well as the encouraging outcomes obtained, further research on this subject is recommended.

Keywords: self-compacting concrete; bond; bond conditions; concreting technology; computed tomography.

Streszczenie. Mieszanka betonu samozagęszczalnego, dzięki swoim specyficznym właściwościom reologicznym, umożliwia zastosowanie metod jej układania, które odbiegają od tradycyjnych rozwiązań stosowanych w przypadku betonów konwencjonalnych, m.in. podawanie od dołu formy. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu technologii układania (od góry i od dołu) na właściwości wytrzymałościowe betonu samozagęszczalnego oraz na przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu. Badania przyczepności zrealizowano metodą wrywania. Stwierdzono, że technologia podawania od dołu przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości betonu i przyczepności w elementach badawczych, szczególnie w górnych strefach tych elementów. Ze względu na coraz większe znaczenie praktyczne betonu samozagęszczalnego i alternatywnych metod jego układania, jak również uzyskane obiecujące wyniki, zaleca się dalsze prowadzenie badań.

Słowa kluczowe: beton samozagęszczalny; przyczepność; warunki przyczepności; technologia betonowania; tomografia komputerowa.

Self-compacting concrete (SCC) mixes flow and consolidate under their own weight while maintaining homogeneity as they fill the designated space, even in the presence of obstacles such as dense reinforcement mesh. Their specific properties (high flowability and stability) enable the application of a distinctive placement technology in which the mix is delivered through valves installed at any height of the formwork. The principal advantages of this technology include improved air release from the mix, reduced risk of segregation, and shortened execution time of structural elements due to continuous pump operation [1]. More effective self-deaeration of the mix directly affects both the quality of the concrete surface finish and the internal structure, including the concrete cover to horizontal reinforcing bars. Within the cover zone of horizontal reinforcing bars, unfavorable phenomena may occur after casting the mix into the form, namely plastic settlement and bleeding (release of free water) [2]. These processes lead to deterioration of the interfacial transition zone beneath the reinforcing bar and, consequently, to a reduction in bond performance between the bar and the concrete. These effects are intensified in the upper regions of tall structural

Mieszanki samozagęszczalne (SCC) rozplywają się i zagęszczają pod ciężarem własnym, zachowując jednorodność przy wypełnianiu żądanej przestrzeni, nawet w obecności przeszkód, takich jak gęsta siatka zbrojenia. Ich szczególne właściwości (duża płynność i stabilność) pozwalają na zastosowanie technologii podawania mieszanki przez zawory umieszczone na dowolnej wysokości deskowania. Wśród zalet tej technologii wymienia się przede wszystkim lepsze odpowietrzenie mieszanki, zmniejszenie ryzyka segregacji czy skrócenie czasu wykonywania elementów ze względu na ciągłą pracę pompy [1]. Bardziej efektywne samoodpowietrzenie mieszanki będzie rzutowało zarówno na jakość powierzchni licowej betonu, jak i struktury, w tym otuliny poziomych prętów zbrojeniowych. Należy podkreślić, że w obrębie otuliny poziomych prętów zbrojeniowych mogą pojawić się niekorzystne zjawiska zachodzące po wbudowaniu mieszanki w formę, takie jak osiadanie plastyczne oraz bleeding, czyli oddawanie wolnej wody [2]. Powodują one pogorszenie jakości strefy kontaktowej pod prętem zbrojeniowym, a w konsekwencji zmniejszenie jego przyczepności do betonu. Zjawiska te są spotęgowane w górnych częściach elementów wysokich, a możliwość ich pojawienia się jest odzwierciedlona normatywnie przez jakość warunków przyczepności [3], w literaturze nazwana efektem

¹⁾ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

^{*)} Correspondence address: kucharska@agh.edu.pl

elements. Their occurrence is reflected in design standards through the classification of bond conditions [3] and, in the literature, is referred to as the top-bar effect. Enhancing the self-deaeration capacity of self-compacting concrete mixes placed from the bottom promotes the reduction of these phenomena within zones of poor bond conditions.

Methods and materials

The assessment of the influence of the self-compacting concrete casting method on the bond properties of reinforcing bars to concrete and on the mechanical properties of hardened concrete was carried out using deep-beam type elements. An element with overall dimensions of $1440 \times 640 \times 160$ mm (length $\times$ height $\times$ thickness) was designed, consisting of cubic modules with a side length of 160 mm (Figure 1a). One deep-beam test element was fabricated for each concrete casting technology.

A ready-mix SCC based on blast-furnace slag cement was used for the production of the elements. The mix composition is presented in Table 1.

Testing of the fresh self-compacting concrete properties was performed immediately prior to placement in the formwork. The slump-flow test was carried out, mix stability was verified, and the L-box test was conducted in accordance with the standards [4–6]. The test elements were made using two casting technologies: top-down (TD) and bottom-up (BU). During casting of the element using the bottom-up method, a red pigment was added to the mix halfway through the concreting process in order to visualize the flow pattern within the form (Figure 1b). The addition of pigment does not affect the final properties of the concrete, as confirmed in previous studies [7]. Each element was divided into modules designated for bond testing (10 specimens), compressive strength testing (13 specimens), splitting tensile strength testing (9 specimens), and computed tomography (4 core specimens), as shown in Figure 1c.

The modules intended for bond testing and computed tomography were provided with centrally embedded ribbed reinforcing bars of grade B500SP with a diameter of 16 mm. The location of the modules was designed to reproduce good and poor bond conditions in accordance with Eurocode 2 [3]. In the deep-beam elements, the reinforcing bars were arranged perpendicular to the direction of concrete casting. Bond tests were performed using the pull-out method [8]. Due to the anticipated high compressive strength of the concrete, the bonded length was reduced to 2.5 times the bar diameter in order to prevent steel rupture prior to bond failure. In addition, a separate element consisting of five reference bond-test modules was fabricated, with reinforcing bars oriented parallel to the direction of concreting (Figure 1c). This element represented good bond conditions not affected by adverse phenomena occurring within the bar cover zone [9].

Modules for compressive and splitting tensile strength tests in rows 2 and 3 were arranged in a checkerboard pattern, whereas in rows 1 and 4 the modules were intended exclusively for compressive strength testing. Strength testing of concrete was performed on specimens cut from the test elements in accordance with the applicable standards [10, 11]. Tomographic

górnego pręta. Poprawa zdolności do samoodpowietrzenia mieszanek samozagęszczalnych podawanych od dołu będzie sprzyjała redukcji wymienionych zjawisk w strefie słabych warunków przyczepności.

Metody i materiały

Ocenę wpływu metody podawania mieszanki samozagęszczalnej na przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu oraz właściwości wytrzymałościowe dojrzałego betonu przeprowadzono na elementach typu belka-ściana. Zaprojektowano element o wymiarach $1440 \times 640 \times 160$ mm (długość $\times$ wysokość $\times$ grubość), który składał się z modułów sześciennych o boku 160 mm (rysunek 1a). W przypadku każdej technologii podawania mieszanki betonowej wykonano jeden element badawczy typu belka-ściana. Do produkcji elementów wykorzystano mieszankę betonu towarowego SCC na bazie cementu hutniczego. Skład mieszanki podano w tabeli 1.

Badania właściwości samozagęszczalnej mieszanki betonowej przeprowadzono bezpośrednio przed jej ułożeniem w formie. Wykonano badanie rozplywu, zweryfikowano stabilność mieszanki oraz przeprowadzono test L-pojemnika, zgodnie z normami [4–6]. Elementy do badań wykonano w dwóch technologiach podawania mieszanki: od góry (TD) i od dołu (BU) formy. W połowie betonowania elementu w technologii od dołu, do mieszanki dodano czerwony barwnik, aby zobrazować przepływ mieszanki w formie (rysunek 1b). Dodatek barwnika do mieszanki nie wpływa na końcowe parametry betonu, co zweryfikowano w poprzednich badaniach [7]. Każdy element podzielony był na moduły do badania przyczepności (10 próbek); wytrzymałości na ściskanie (13 próbek); wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (9 próbek) oraz tomografii komputerowej (4 próbki rdzeniowe), które przedstawiono na rysunku 1c.

Moduły do badania przyczepności i tomografii komputerowej miały centralnie osadzone żebrowane pręty zbrojeniowe gatunku B500SP o średnicy 16 mm. Lokalizacja modułów była tak zaprojektowana, aby odwzorować dobre i słabe warunki przyczepności wg wytycznych Eurokodu 2 [3]. Pręty zbrojeniowe w elementach typu belka-ściana ułożono prostopadle w stosunku do kierunku betonowania. Badanie przyczepności wykonano z wykorzystaniem metody wrywania prętów [8]. Ze względu na spodziewaną dużą wytrzymałość betonu, długość odcinka przyczepności zredukowano do 2,5-krotności średnicy, aby nie dopuścić do zerwania stali przed zniszczeniem przyczepności. Dodatkowo wykonano element składający się z pięciu referencyjnych modułów do badania przyczepności z prętami ułożonymi równolegle do kierunku betonowania (rysunek 1c). Element odzwierciedlał warunki dobrej przyczepności, na którą nie wpływają negatywne zjawiska występujące w otulinie pręta [9].

Moduły do badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu w rzędach 2 i 3 rozlokowane były w układzie szachownicowym, a w rzędach 1 i 4 moduły przeznaczone jedynie do badania wytrzymałości na ściskanie. Badania wytrzymałościowe betonu przeprowadzono na próbkach wyciętych z elementów badawczych zgodnie z normami [10, 11]. Do badań tomograficznych wykorzystano tomograf GE Phoe-

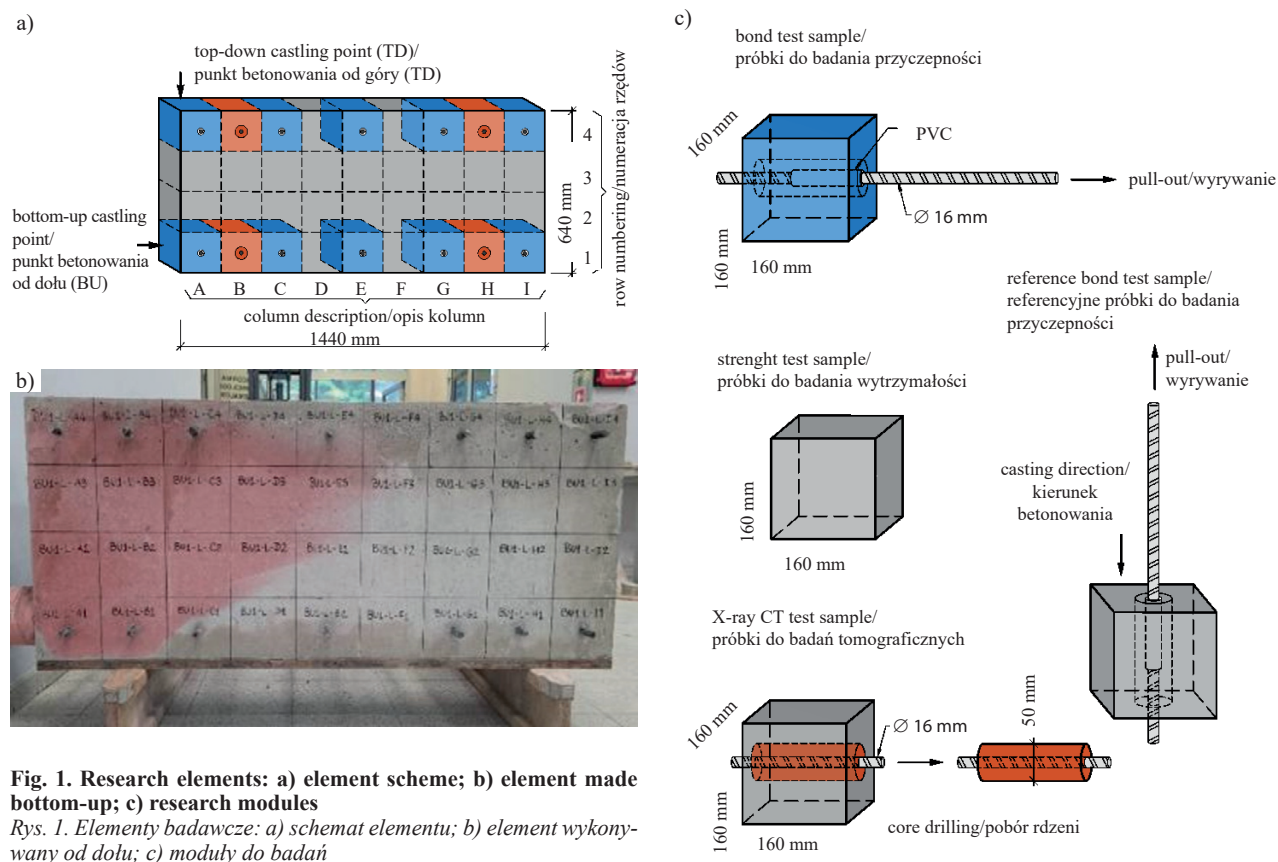


Fig. 1. Research elements: a) element scheme; b) element made bottom-up; c) research modules

Rys. 1. Elementy badawcze: a) schemat elementu; b) element wykonany od dołu; c) moduły do badań

examinations were conducted using a GE Phoenix v|tomex|m scanner equipped with a 300 kV radiation source, providing sufficient energy to penetrate reinforced concrete specimens. The device, together with VGStudio MAX 3.5 software, enables reconstruction and analysis of the internal structure of the tested specimen based on a series of X-ray images acquired during a 360° rotation of the sample. Computed tomography provides valuable information on pore structure, enables tracking of water and air transport through the material, and allows identification of early signs of cracking, degradation, and other damage after specimen loading [12].

Table 1. Composition of SCC mixture for 1 m³
Tabela 1. Skład mieszanki SCC na 1 m³

Component/Składnik	Quantity/Ilość
Cement CEM III/A 42,5N – LH/HSR/NA [kg]	440
Tap water [kg]/Woda wodociągowa [kg]	160
Sand 0–2 mm [kg]/Piasek 0–2 mm [kg]	684
Gravel 2–8 mm [kg]/Żwir 2–8 mm [kg]	510
Gravel 8–16 mm [kg]/Żwir 8–16 mm [kg]	560
Chemical admixtures/Domieszki chemiczne	
Superplasticizer [% of cement mass]/Superplastyfikator [% masy cementu]	1.1
Plasticizer [% of cement mass]/Plastyfikator [% masy cementu]	0.5

nix v|tomex|m wyposażony w źródło promieniowania o mocy 300 kV, które emituje energię wystarczającą do prześwietlenia próbki żelbetowej. Urządzenie wraz z oprogramowaniem VG Studio Max 3.5 umożliwia rekonstrukcję i analizę wewnętrznej struktury badanej próbki na podstawie serii zdjęć rentgenowskich, uzyskanych podczas obrotu próbki o 360°. Badania tomograficzne dostarczają cennych informacji dotyczących struktury porów, umożliwiają śledzenie przepływu wody i powietrza przez materiał, a także wczesnych oznak pęknięcia, degradacji i innych uszkodzeń po obciążeniu próbki [12].

Elementy badawcze, przed podziałem na próbki modułowe, były sezonowane w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 20°C oraz pielęgnowane przez spryskiwanie wodą.

Wyniki badań i dyskusja

Właściwości mieszanki i betonu SCC. Mieszanka spełniła wszystkie wymagania stawiane mieszankom samozagęszczalnym i zaklasyfikowano ją do klasy konsystencji SF1, klasy lepkości VS2, klasy przepływalności PL2 oraz wskaźnika stabilności 1, zgodnie z wytycznymi [4–6].

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu zestawiono w postaci wykresów pudełkowych na rysunku 2. Pudełko reprezentowane jest przez rozstęp ćwiartkowy z medianą, opisaną obok pudełka. Wąsy przedstawiają wartość minimalną i maksymalną próby.

Większe wartości wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu otrzymano w przypadku elementu wykonanego

Prior to being cut into modular specimens, the test elements were cured under laboratory conditions at a temperature of 20°C and maintained by regular water spraying.

Test results and discussion

SCC mix and concrete properties. The mix met all the requirements specified for self-compacting concrete mixtures and was classified as consistency class SF1, viscosity class VS2, passing ability class PL2, and stability index 1, in accordance with the relevant guidelines [4–6].

The results of compressive strength and splitting tensile strength tests are presented in the form of box plots in Figure 2. The box represents the interquartile range with the median value indicated and labelled adjacent to the box. The whiskers denote the minimum and maximum values obtained in the test series.

Higher compressive strength and splitting tensile strength values were observed for the element cast from the bottom of the formwork. In the case of compressive strength results, both box plots exhibit a similar degree of dispersion; however, they differ in the position of the median. For the TD element, the distribution is positively skewed (right-skewed), meaning that the majority of results lie below the median. In the BU element, the median is located closer to the third quartile (Q3), indicating that most results are above it. Nevertheless, in both elements a considerable scatter of results is observed, which is associated with the imperfectly cubic shape of specimens cut from the structural element. For the splitting tensile strength results, a markedly lower dispersion is observed for the element cast from the bottom of the formwork. Moreover, the majority of results are located above the median. This leads to the conclusion that the bottom-up casting technology of self-compacting concrete contributes to both homogenization and enhancement of strength within the deep-beam element. The improvement in mechanical properties of concrete placed from the bottom results from more effective air removal and, consequently, a denser internal structure [13].

Bond stress – bar slip relationship. The bond test using the pull-out method enables the determination of the local relationship between bond stress (τ) and rebar slip (s), assuming that the bond stresses are constant along the entire anchorage length. Figure 3 shows the course of the τ – s relationship for the test elements. The relationships for specimens located in zone of good bond conditions (row 1) are marked in the figure with a solid line, and for those located in zone of poor bond conditions (row 4) with a dashed line.

The casting technology of self-compacting concrete from the bottom of the formwork leads to an increase in bond stresses compared to the traditional method, regardless of the bond condition zone or the considered bar slip. The ultimate bond stresses ($\tau_{\max}$) reached at the moment of bond failure were, on average, 35.7% higher in the BU element than in the TD element. Observing the course of the τ – s relationships, it can be noted that specimens located in the poor bond condition zone of the BU element behaved similarly to those in the good bond condition zone of the TD element. They exhibited comparable bond stiffness, i.e., the slope of the curve in the initial stage of bond failure. Significantly lower bond stiffness was observed for specimens

nego od dołu deskowania. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie mają podobne rozproszenie, natomiast różnią się położeniem mediany. W przypadku elementu TD rozkład wyników jest asymetryczny prawoskośny, a więc większość wyników znajduje

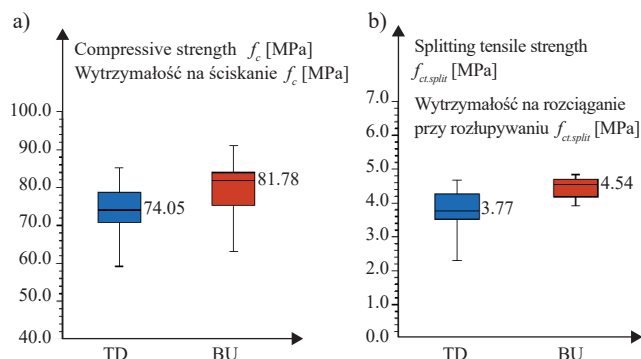


Fig. 2. Concrete strength test results: a) compressive; b) splitting tensile

Rys. 2. Wyniki badań wytrzymałości betonu: a) na ściskanie; b) na rozciąganie przy rozłupywaniu

się poniżej mediany. W elemencie BU, mediana położona jest bliżej trzeciego kwartyłu (Q3), co świadczy o tym, że większość wyników znajduje się powyżej niej. W obu elementach występuje jednak znaczny rozrzut wyniku, który jest związany z nieidealnie sześciennym kształtem próbek wycinanych z konstrukcji.

W przypadku wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, stwierdzono znacznie mniejszy rozrzut wyników w przypadku elementu wykonywanego od dołu deskowania. Ponadto, większość wyników znajdowała się powyżej mediany. Prowadzi to do wniosku, że technologia podawania mieszanki samozagęszczalnej od dołu deskowania wpływa na ujednolicenie i zwiększenie wytrzymałości w obrębie elementu typu belka-ściana. Poprawa właściwości wytrzymałościowych betonu podawanego od dołu jest wynikiem jego lepszego odpowietrzenia i w konsekwencji bardziej szczelnej struktury wewnętrznej [13].

Zależność naprężenie przyczepności – poślizg pręta. Badanie przyczepności metodą wyrywania umożliwia wyznaczenie lokalnej zależności naprężeń przyczepności (τ) i poślizgu pręta (s) przy założeniu, że naprężenia przyczepności są stałe wzdłuż całej długości zakotwienia. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zależności τ – s w przypadku badanych elementów. Zależności dotyczące próbek położonych w strefie dobrych warunków przyczepności (rzęd 1) zostały zaznaczone na rysunkach linią ciągłą, a położonych w słabych warunkach przyczepności (rzęd 4) linią przerywaną.

Technologia podawania mieszanki samozagęszczalnej od dołu deskowania prowadzi do zwiększenia naprężeń przyczepności w porównaniu z technologią tradycyjną, niezależnie od strefy warunków przyczepności czy rozpatrywanego poślizgu pręta. Graniczne naprężenia przyczepności ($\tau_{\max}$) osiągnięte w momencie zniszczenia przyczepności są średnio o 35,7% większe w elemencie BU niż w elemencie TD. Obserwując przebieg zmiany zależności τ – s , stwierdzono, że próbki należące do strefy słabych warunków przyczepności elementu BU zachowują się jak te w strefie dobrych warunków przyczepności elementu TD. Charakteryzują się one podobną sztywnością

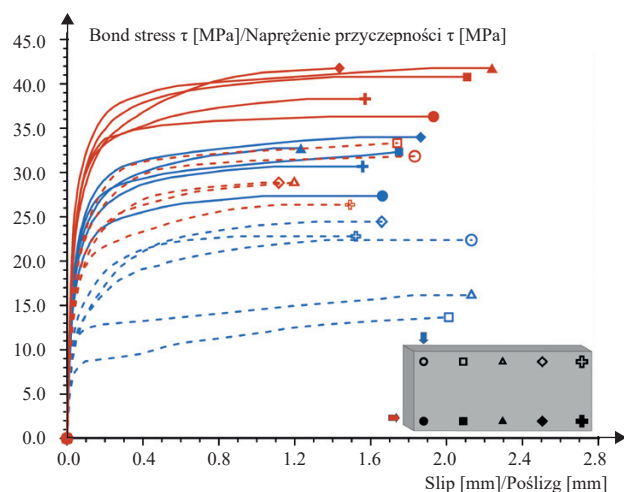


Fig. 3. Bond stress – rebar slip relationship
Rys. 3. Zależność naprężenie przyczepności – poślizg pręta

in the poor bond condition zone of the TD element; compared to the poor bond zone of the BU element, it was on average 39.7% lower. The lower bond stresses and reduced bond stiffness in the top-down cast element resulted from the lower strength properties of the concrete and the inferior quality of the microstructure of the cover surrounding the reinforcing bars.

Top-bar effect. The top-bar effect is associated with a decrease in bond stresses of reinforcing bars located in the upper zone of reinforced concrete elements. A measure of this effect is the casting position factor during concreting, defined as the ratio of bond stresses of specimens in row 1 (τ_{bottom}) to the bond stresses of specimens located in row 4 (τ_{top}). The higher the casting position factor, the greater the reduction in bond stresses of the top bars. Figure 4 presents the casting position factor determined for bars in each column of the deep-beam elements for both concrete placement technologies. The casting position factor was analyzed for the ultimate bond stresses as well as for bond stiffness, represented by the

przyczepności, czyli nachyleniem krzywej w początkowym stadium zniszczenia przyczepności. Znacznie mniejszą sztywność połączenia obserwuje się w przypadku próbek w strefie słabych warunków przyczepności elementu TD. Jest ona średnio o 39,7% mniejsza w porównaniu ze strefą słabych warunków przyczepności elementu BU. Mniejsze naprężenia przyczepności oraz mniejsza sztywność przyczepności elementu betonowanego od góry są wynikiem gorszych właściwości wytrzymałościowych betonu oraz gorszej jakości mikrostruktury otuliny wokół prętów zbrojeniowych.

Efekt górnego pręta związany jest ze spadkiem naprężeń przyczepności prętów umieszczonych w górnej strefie elementów żelbetowych. Miarą tego efektu jest wskaźnik pozycji pręta w czasie betonowania, definiowany jako stosunek naprężeń przyczepności próbek rzędu 1 (τ_{bottom}) do naprężeń przyczepności próbek położonych w rzędzie 4 (τ_{top}). Im większy jest wskaźnik pozycji pręta, tym większy jest spadek naprężeń przyczepności prętów górnych. Na rysunku 4 przedstawiono wskaźnik pozycji pręta wyznaczony w przypadku prętów w każdej kolumnie elementów typu belka-ściana w obu technologiach betonowania. Wskaźnik pozycji pręta przeanalizowano przy granicznych naprężeniach przyczepności oraz sztywności przyczepności reprezentowanej naprężeniami przyczepności przy poślizgu pręta wynoszącym 0,1 mm ($\tau_{0,1}$), zgodnie z literaturą [14].

Stwierdzono większe zróżnicowanie efektu górnego pręta wzdłuż długości elementu w przypadku betonowania od góry niezależnie od analizowanego naprężenia przyczepności. Współczynnik zmienności wskaźnika przyczepności w elemencie TD wyniósł 26,7% w przypadku τ_{max} i 25,9% w przypadku $\tau_{0,1}$, natomiast w elemencie BU wyniósł on odpowiednio 10,0% i 7,3%. Efekt górnego pręta jest więc mniej zauważalny w elemencie betonowanym od dołu, a wskaźnik przyczepności jest mniejszy średnio o 19,8% i 26,0% przy τ_{max} i $\tau_{0,1}$. Redukcję efektu górnego pręta obserwowano również na elementach belkowych wykonanych z wysokowartościowego betonu samozagęszczalnego [14]. Efekt górnego pręta jest rekompensowany

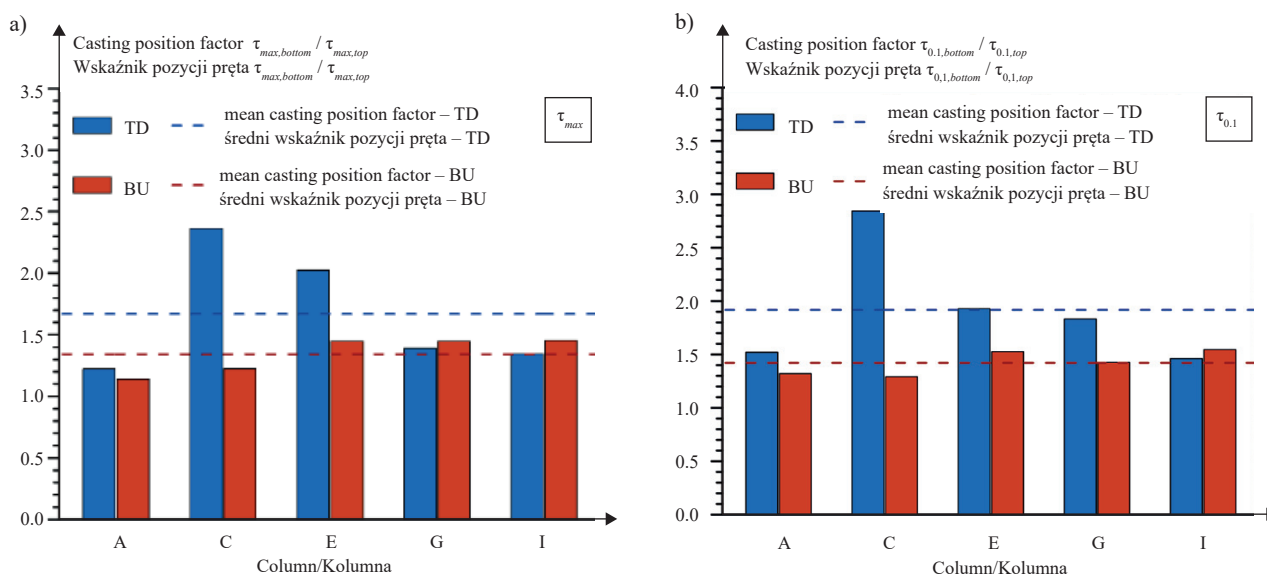


Fig. 4. Casting position factor in each column of the elements: a) ultimate bond stress; b) bond stiffness

Rys. 4. Wskaźnik pozycji pręta w danej kolumnie elementu: a) graniczne naprężenie przyczepności; b) sztywność przyczepności

bond stress at a bar slip of 0.1 mm ($\tau_{0,1}$), in accordance with the literature [14].

Greater variability of the top-bar effect along the element length was observed for top-down casting, regardless of the bond stress considered. The coefficient of variation of the casting position factor in the TD element was 26.7% for τ_{max} and 25.9% for $\tau_{0,1}$, whereas in the BU element it was 10.0% and 7.3%, respectively. Overall, the top-bar effect was less pronounced in the bottom-up cast element, with the bond position factor being on average 19.8% and 26.0% lower for τ_{max} and $\tau_{0,1}$, respectively. A reduction of the top-bar effect has also been observed in beam elements made of high-performance self-compacting concrete [14].

The top-bar effect is accounted for in international standards through factors that consider the bond condition zones. In addition to this phenomenon, in elements of considerable height a tendency for the so-called pressure effect can be observed, characterized by increased bond stresses of bars located in the lower zone of the formwork. Therefore, as an indicator of good bond conditions, recommendations suggest orienting the reinforcing bars parallel to the direction of concreting [9]. Figure 5 shows the differences between the average bond stresses in the reference element and the bond stresses of the top bars in the deep-beam elements.

When analyzing the ultimate bond stresses, a decrease in bond stresses relative to the reference element was noticeable in both casting technologies. However, in the BU element, this decrease was smaller than in the TD element. The average reduction of ultimate bond stresses of the top bars in the BU element relative to the reference element amounted to 30.4%, while in the TD element it was 53.6%. In the element cast from the top, a decrease in the bond stresses of the top bars was also recorded for bond stiffness, compared to the average value in the reference element, amounting to 40.3% on average. In contrast, in the BU element, the bond stresses of the top bars were close to, or even exceeded, the average value in the reference element. This indicates that, despite the occurrence of differ-

wany w międzynarodowych normach przez wskaźniki uwzględniające strefy warunków przyczepności. Obok tego zjawiska, w elementach o dużej wysokości można zaobserwować tendencję do występowania tzw. efektu docisku, polegającego na zwiększeniu naprężeń przyczepności prętów usytuowanych w dolnej strefie deskowania. Z tego powodu jako wyznacznik dobrych warunków przyczepności przyjmuje się położenie pręta równoległe do kierunku betonowania [9]. Na rysunku 5 przedstawiono różnice pomiędzy średnimi wartościami naprężeń przyczepności w elemencie referencyjnym a naprężeniami przyczepności prętów górnych w elementach typu belka-ściana.

Analizując graniczne naprężenia przyczepności, w obu technologiach betonowania stwierdzono spadek naprężeń przyczepności w porównaniu z elementem referencyjnym. W elemencie BU jest on jednak mniejszy niż w elemencie TD. Średni spadek granicznych naprężeń przyczepności prętów górnych elementu BU wyniósł 30,4% w stosunku do elementu referencyjnego, a elementu TD 53,6%. W elemencie wykonywanym od góry odnotowano w przypadku sztywności przyczepności spadek naprężeń przyczepności prętów górnych w porównaniu ze średnią wartością w elemencie referencyjnym średnio o 40,3%. Naprężenia przyczepności prętów górnych elementu BU były natomiast zbliżone do średniej wartości w elemencie referencyjnym, a nawet większe. Świadczy to o tym, że pomimo występowania różnic naprężeń przyczepności pomiędzy dolnymi i górnymi prętami, warunki przyczepności w całym elemencie były lepsze lub zbliżone do określanych jako dobre, przy analizie sztywności przyczepności.

Wpływ podawania mieszanki SCC na przyczepność. Bazując na wynikach badań, stwierdzono wpływ podawania mieszanki SCC na przyczepność pręta zbrojeniowego do betonu. Podawanie mieszanki od dołu sprzyja poprawie samoodpowietrzenia i zachowania stabilności mieszanki, co w konsekwencji będzie przenosić się na lepszej jakości otulinę prętów zbrojeniowych. Prowadzi to do ogólnego zwiększenia naprężeń przyczepności oraz, przede wszystkim, zwiększenia sztywności przyczepności prętów zbro-

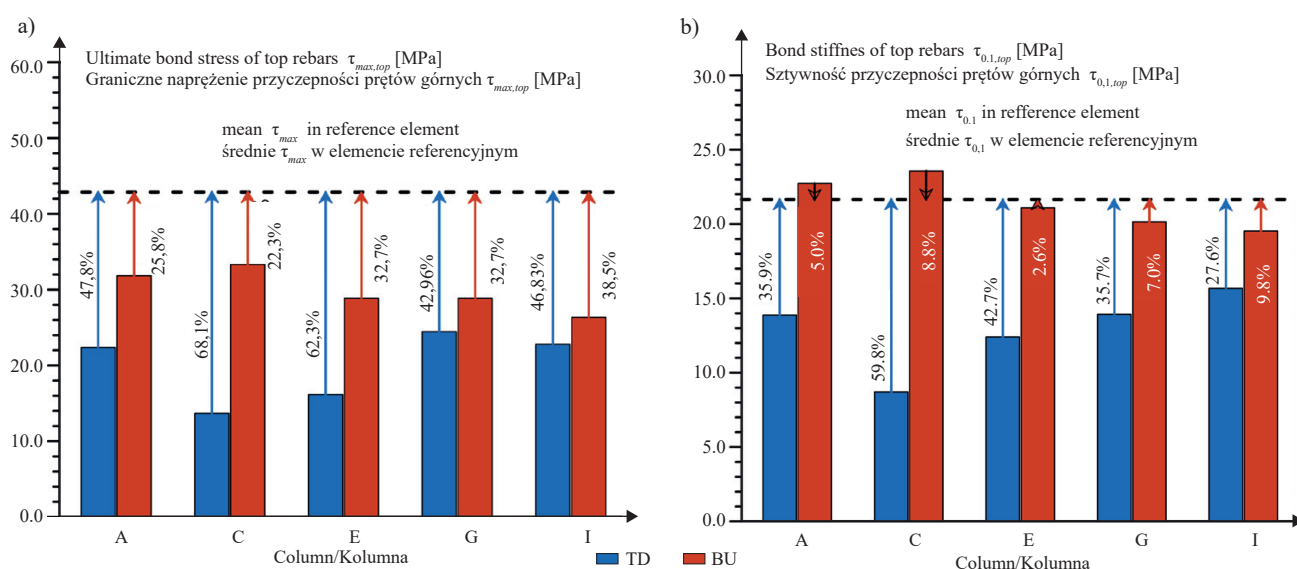


Fig. 5. Bond stresses of top rebars in relations to mean value in reference element: a) ultimate bond stress; b) bond stiffness

Rys. 5. Naprężenia przyczepności prętów górnych w stosunku do średniego w elemencie referencyjnym: a) graniczne naprężenie przyczepności; b) sztywność przyczepności

ences in bond stresses between the lower and upper bars, the bond conditions throughout the entire element were better or close to those classified as good when analyzing bond stiffness.

Influence of casting method of SCC on bond. Based on the test results, the influence of SCC casting on the bond between reinforcing bars and concrete can be observed. Bottom-up casting of the mixture promotes improved self-deaeration and stability of the mix, which consequently results in a higher-quality concrete cover around the reinforcing bars. This leads to an overall increase in bond stresses and, in particular, to higher bond stiffness of reinforcing bars in zones of poor bond conditions, compared to the traditional casting method. Crack formation causes a local loss of the initial bond, which initiates secondary bond mechanisms and rebar slip; therefore, the magnitude of slip is commonly associated with crack width. For serviceability limit state phenomena, an increase in bond stiffness is therefore beneficial.

To verify the actual quality of the concrete microstructure in the deep-beam elements, computed tomography of the reinforcing bar cover was performed. The results of the porosity analysis around the top reinforcing bars are presented as three-dimensional images in Figure 6.

The computed tomography images of the cover around the top reinforcing bars in the deep-beam elements show significant differences. In the TD element, continuous voids were observed beneath the top bars, resulting from the combined effects of plastic settlement and bleeding. In such cases, only the upper ribs of the bar participate in transferring the pull-out load, leading to a non-uniform stress distribution in the concrete cover and a substantial reduction in bond stresses. In the BU element, primarily individual larger air voids adjacent to the lower surface of the bar are visible, both in the zones between and beneath the ribs; however, these voids do not connect into a continuous discontinuity. This arrangement favors the maintenance of high bond stresses during the initial stage of bar pull-out.

Conclusions

This article addressed the influence of bottom-up casting of self-compacting concrete on the properties of concrete and the bond between reinforcing bars and concrete. **The experimental investigations conducted allow the following conclusions to be drawn:**

- Bottom-up casting of the concrete mix influences the homogenization and increases the compressive and splitting tensile strength of concrete in the investigated deep-beam test element.
- More effective air removal in the bottom-up cast mix results in a higher-quality microstructure of the concrete cover around the reinforcing bars, which promotes the maintenance of high bond stresses throughout the entire bond failure process. An average increase of approximately 36% in ultimate bond stresses was observed in the bottom-up cast element compared to the top-down cast element.
- The beneficial effect of bottom-up casting is especially noticeable at small bar slips, which is important for the analysis of serviceability limit state phenomena. The bond stiffness of the top bars in the bottom-up cast element is close to the average value of these stresses in the reference element.

jeniowych w strefach słabych warunków przyczepności w porównaniu z technologią tradycyjną. Tworzenie się zarysowania powoduje lokalną utratę przyczepności pierwotnej, która inicjuje mechanizmy przyczepności wtórnej oraz poślizg zbrojenia, dlatego też wielkość poślizgu jest zwyczajowo kojarzona z szerokością zarysowania. W przypadku zjawisk w stanie granicznym użyteczności korzystne będzie więc zwiększenie sztywności przyczepności. W celu zweryfikowania rzeczywistej jakości mikrostruktury betonu w elementach typu belka-ściana wykonano badania tomograficzne otuliny prętów zbrojeniowych. Wyniki analizy porowatości wokół górnych prętów zbrojeniowych przedstawiono na rysunku 6 w formie trójwymiarowych obrazów.

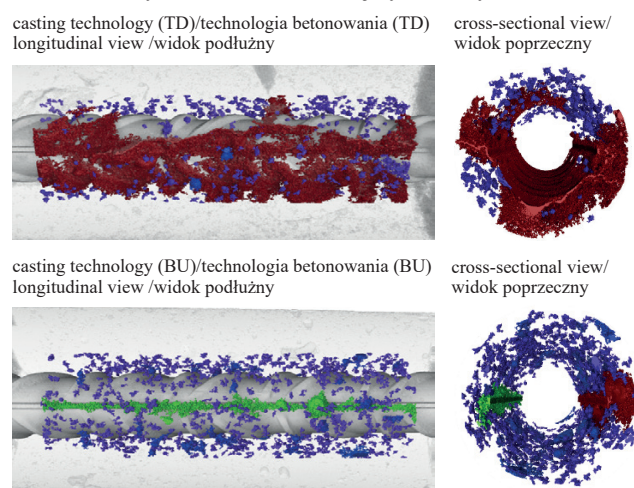


Fig. 6. Tomographic images of voids within the concrete cover around the top rebars

Rys. 6. Obrazy tomograficzne pustek w strukturze otuliny górnych prętów zbrojeniowych

Na obrazach tomograficznych otuliny prętów górnych elementów typu belka-ściana zauważalne są znaczne różnice. Pod prętami górnymi elementu TD znajdują się ciągle pustki będące wynikiem łącznego działania osiadania plastycznego i bleedingu. W takiej sytuacji w przenoszeniu obciążenia wyrywającego biorą udział jedynie żebra górne pręta, co powoduje niejednorodny rozkład naprężeń w otulinie betonowej i znaczne zmniejszenie naprężeń przyczepności. W przypadku elementu BU stwierdzono przede wszystkim pojedyncze duże pory powietrzne przylegające do powierzchni dolnej pręta, w strefach zarówno między, jak i pod żebrami, ale niełączące się w jedną nieciągłość. Sprzyja to zachowaniu dużych naprężeń przyczepności w początkowym stadium wyrywania pręta.

Wnioski

W artykule omówiono wpływ podawania mieszanki samozagęszczalnej od dołu na właściwości betonu i przyczepność pręt zbrojeniowy-beton. **Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wyciągnięto następujące wnioski:**

- podawanie mieszanki od dołu deskowania ma wpływ na ujednolicenie i zwiększenie wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu w analizowanym elemencie badawczym typu belka-ściana;

- Bottom-up casting reduces the occurrence of adverse phenomena in the cover of the top bars, decreasing the total volume of voids beneath the bar by an average of 73% compared to the top-down cast element.

Due to the limited scope of the study, formulating definitive recommendations or conclusions is premature. However, the promising nature of the results encourages further investigations over a broader range of cases (e.g., influence of mix components, variable cover thickness, geometry, or test model). Current standards are based on studies of conventional concrete, and accounting for a potential reduction in the size of the poor bond zone in new generation concretes could lead to reduced reinforcement consumption in this zone, and consequently lower costs of reinforced concrete structures. Such an approach aligns with the principles of sustainable construction, aiming to minimize material use and reduce the carbon footprint.

- bardziej efektywne odpowietrzenie mieszanki podawanej od dołu przekłada się na lepszą jakość mikrostrukturę otuliny betonowej wokół prętów zbrojeniowych, co sprzyja utrzymaniu dużych naprężeń przyczepności w trakcie całego procesu niszczenia przyczepności. Stwierdzono zwiększenie granicznych naprężeń przyczepności w elemencie betonowanym od dołu średnio o 36% w porównaniu z elementem betonowanym od góry;

- korzystne oddziaływanie podawania mieszanki od dołu jest widoczne w postaci małych poślizgów pręta, co jest istotne w analizie zjawisk w stanie granicznym użytkowności. Sztywność przyczepności prętów górnych elementu betonowanego od dołu jest zbliżona do średniej wartości tych naprężeń w elemencie referencyjnym;

- podawanie mieszanki od dołu deskowania ogranicza występowanie negatywnych zjawisk w otulinie prętów górnych, powodując zmniejszenie łącznej objętości pustek pod prętem o średnio 73% w porównaniu z elementem betonowanym od góry.

Ze względu na ograniczony zakres badań, formułowanie ostatecznych zaleceń czy wniosków jest przedwczesne. Obiecujący charakter wyników zachęca do kontynuowania analiz w szerszym zakresie przypadków (wpływ składników mieszanki, zmienna grubość otuliny, geometria czy model badawczy). Obecne wytyczne normowe bazują na badaniach betonów zwykłych, a uwzględnienie w nich potencjalnego zmniejszenia wielkości strefy słabych warunków przyczepności w betonach nowej generacji może prowadzić do zmniejszenia zużycia stali zbrojeniowej w tej strefie, a w konsekwencji obniżenia kosztów wykonania konstrukcji żelbetowej. Takie podejście jest zgodne z koncepcją budownictwa zrównoważonego, które dąży do minimalizacji zużycia materiałów oraz śladu węglowego.

The research was funded by Grant No. 2023/49/N/ST8/01835 from the National Science Centre (Narodowe Centrum Nauki). The authors would like to thank the Steel Quality Promotion Centre (CPJS) for their material support.

Received: 10.11.2025
Revised: 30.12.2025
Published: 20.02.2026

Badania zostały sfinansowane ze środków grantu nr 2023/49/N/ST8/01835 Narodowego Centrum Nauki. Dziękujemy Centrum Promocji Jakości Stali (CPJS) za wsparcie materiałowe.

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.11.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.12.2025 r.
Opublikowano: 20.02.2026 r.

Literature

- [1] De Schutter G, Feys D, Verhoeven R. „Ecological Profit for a Concrete Pipe Factory due to Self-Compacting Concrete Technology”, w Second International Conference on sustainable Construction Materials and Technologies, 2010.
- [2] Powers TC. The Properties of Fresh Concrete. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, 1968.
- [3] PN-EN 1992-1-1:2024-05: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne oraz reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich. 2024.
- [4] PN-EN 12350-8: Badania mieszanki betonowej – Część 8: Beton samozagęszczalny – Badanie konsystencji metodą rozplywu stożka. Warszawa, 2019.
- [5] PN-EN 12350-10: Badania mieszanki betonowej – Część 10: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą L-pojemnika. Warszawa, 2012.
- [6] ASTM International, ASTM C1611. Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. West Conshohocken, PA, 2018.
- [7] Dybel P. „Effect of self-compacting concrete placement technology on the load-bearing capacity of the concrete-concrete and steel-concrete bond in layered elements”, Cement, Wapno, Beton, t. 28, nr 4, s. 210–224, 2023, DOI: 10.32047/CWB.2023.28.4.1
- [8] PN-EN 10080: Stal do zbrojenia betonu. Spajalna stal zbrojeniowa: Postanowienia ogólne. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2007.
- [9] Task group bond model, Bond of Reinforcement in Concrete: State-of-the-art report. w Bulletin 10 (fib Fédération internationale du béton). Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2000.
- [10] PN-EN 12390-3: Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań. Warszawa, 2011.
- [11] PN-EN 12390-6: Badania betonu. Część 6: Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań. Warszawa, 2011.
- [12] Kaczmarczyk GP, Cała M. „Possible Application of Computed Tomography for Numerical Simulation of the Damage Mechanism of Cementitious Materials – A Method Review”, Buildings, t. 13, nr 3, mar. 2023, DOI: 10.3390/buildings13030587
- [13] Feys D, Verhoeven R, De Schutter G. „Pumping of self-compacting concrete: a new, fast and reliable production process for structural elements”, Concrete Plant International, s. 46–53, 2007.
- [14] Moccia F, Fernández Ruiz M, Metelli G, Muttoni A, Plizzari G. „Casting position effects on bond performance of reinforcement bars”, Structural Concrete, nr September 2020, s. 1–21, 2021, DOI: 10.1002/suco.202000572
- [15] Dybel P, Kucharska M. „Effect of bottom-up placing on bond properties of high-performance self-compacting concrete”, Constr Build Mater, t. 243, s. 118182, 2020, DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118182.