

Wpływ technologii układania betonu samozagęszczalnego na nośność połączenia beton-beton oraz stal-beton w elementach wykonywanych warstwowo

Effect of self-compacting concrete placement technology on the load-bearing capacity of the concrete-concrete and steel-concrete bond in layered elements

Piotr Dybeł¹

¹AGH University of Krakow

ORCID: 0000-0001-7991-1576

Corresponding author: P. Dybeł, e-mail: dybel@agh.edu.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia badania dotyczące technologii warstwowego wykonywania konstrukcji z betonu samozagęszczalnego. Badania przeprowadzono na elementach panelowych o wymiarach 800×480×160 mm, betonowanych w dwóch warstwach z jednego punktu podawania mieszanki. Założono trzy różne czasy opóźnienia podawania drugiej warstwy mieszanki: 15, 30 oraz 60 minut. Przeanalizowano dwa warianty technologiczne podawania mieszanki: od góry i od dołu formy. Analizowano wpływ technologii układania mieszanki na nośność połączenia warstw betonu oraz pręta zbrojeniowego z betonem. Nośność połączenia warstw betonu określono za pomocą badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, na próbkach rdzeniowych pobranych z elementów panelowych. W dotychczasowej literaturze badanie nośności połączenia warstw było badane na znacznie mniejszych elementach i nie uwzględniały one innej technologii podawania mieszanki niż tradycyjna. Badanie przyczepności pręt zbrojeniowy-beton na styku warstw wykonano metodą pull-out. Wykazano duże różnice w sposobie mieszania się warstw betonu, w zależności od zastosowanej technologii jego podawania. Betonowanie od góry formy powodowało spadek nośności zespolenia warstw jak i zmniejszenie sztywności i nośności połączenia pręt zbrojeniowy-beton wraz ze zwiększeniem czasu opóźnienia podawania drugiej warstwy. Z kolei betonowanie od dołu formy zapewniło uzyskanie nośności zespolenia warstw betonu na poziomie 90% wytrzymałości próbki monolitycznej w całym zakresie badań. Technologia betonowania od dołu została polecona do wykonywania elementów w technologii wielowarstwowej z betonu samozagęszczalnego.

Summary

The article presents a study on the technology of layered execution in self-compacting concrete structures. The research focused on 800×480×160 mm panel elements, cast in two layers from a single mix casting point. Three different delay times for delivering the second layer of mix were considered: 15, 30 and 60 minutes. Two technological variants of mix application were analysed: from the top and from the bottom of the mould. The study investigated the influence of the placement technology on the load bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint and the rebar-to-concrete joint. The load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint was determined through a splitting tensile strength test on core specimens extracted from panel elements. Notably, existing literature has primarily explored the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint on smaller elements and has not accounted for mix placing technologies diverging from the traditional one. A test of the rebar-to-concrete bond at the layer interface was conducted using the pull-out method. Substantial differences were identified in the mixing pattern of concrete layers, contingent on the placing technology employed. Top-down casting led to a reduction in the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer interface, coupled with decreased stiffness and bond strength of the rebar-to-concrete connection as the delay time of the second layer increased. Conversely, bottom-up concreting maintained the load-bearing capacity of the combined concrete layers at 90% of the strength of the monolithic specimen throughout the entire test range. The article recommends the utilization of bottom-up placing technology for executing elements in the multilayer casting of self-compacting concrete.

Słowa kluczowe: warstwowe układanie mieszanki, beton samozagęszczalny, przyczepność, kierunek podawania mieszanki, podawanie mieszanki od dołu

Keywords: multilayer casting, self-compacting concrete, bond, casting direction, bottom-up placing

1. Wprowadzenie

Technologia monolityczna, która polega na wykonywaniu konstrukcji z betonu w przygotowanych deskowaniach, jest obecnie jedną z najchętniej stosowanych ze względu na swobodę rozwiązań konstrukcyjnych i architektonicznych. Otrzymana w ten sposób konstrukcja cechuje się dużą sztywnością, gdyż wszystkie jej elementy stanowią jednolitą całość, a więc wykazują ciągłość struktury betonu oraz tzw. ciągłość konstrukcyjną. Podczas wykonywania obiektów monolitycznych, choć zalecane i wysoce pożądane jest prowadzenie robót w sposób ciągły, często nie ma możliwości wykonania ogółu prac jednorazowo. Wykonawcy zmuszeni są stosować przerwy w układaniu mieszanki betonowej wynikające z opóźnienia dostawy mieszanki czy też z technologii wykonywania danego typu konstrukcji. Przerwy w betonowaniu mogą powodować powstawanie słabych połączeń na styku układanych kolejno warstw mieszanki. W przypadku betonu zbrojonego możliwe jest również osłabienie współpracy betonu ze stalą, gdy styk warstw przebiega w pobliżu zbrojenia. W konsekwencji może to prowadzić do obniżenia nośności konstrukcji oraz pogorszenia jej trwałości. Należy zaznaczyć, że powstałe osłabienia wewnętrznej struktury konstrukcji pozostają jej ukrytą wadą.

W przypadku tradycyjnych betonów, między kolejnymi warstwami mieszanki betonowej wykonuje się proces zagęszczania przy użyciu wibracji (1, 2). Jest to skuteczny sposób na eliminację niepożądanych zjawisk występujących podczas wielowarstwowego układania mieszanki betonowej. Jednak, w przypadku betonu samozagęszczalnego [SCC], ta technika nie może być bezpośrednio zastosowana. Podstawowym założeniem betonu samozagęszczalnego jest usunięcie konieczności stosowania zagęszczania wibracyjnego. Poddanie mieszanki wibracji może spowodować zakłócenie jej stabilności i doprowadzić do wystąpienia segregacji. Dlatego też poszukiwane są rozwiązania technologiczne, które umożliwiają poprawę połączenia kolejnych warstw mieszanki betonowej. Ogólne zalecenia technologiczne zawarte są w wytycznych normowych (2, 3) oraz rekomendacjach (4, 5).

Generalnie zalecane jest układanie kolejnych warstw SCC w sposób zapewniający powierzchniowe zwiększenie plastyczności poprzedniej warstwy, ułatwiając jej połączenie z nowo ułożoną (4, 5). Można to osiągnąć przez powierzchniowe przemieszanie mieszanki lub zastosowanie słabej wibracji. Inne metody to zwiększenie ciśnienia mieszanki w rurociągu lub zwiększenia wysokości, z której jest układana (6). Zalecenia i wytyczne dotyczące SCC wydają się jednak niewystarczające pod względem praktycznego wykonania wskazanych czynności. Sugerują, że należy je określić na podstawie doświadczenia wykonawcy i/lub wstępnych testów. Jednakże aktualnie nie istnieją proste badania kwalifikujące lub ilościowo określające zdolność SCC do wielowarstwowego ukła-

1. Introduction

Monolithic technology, involving the execution of concrete structures in prepared formwork, is presently widely adopted due to its versatility in accommodating structural and architectural designs. The resulting structure boasts high stiffness, as all constituent elements amalgamate into a homogeneous unit, ensuring continuity in the concrete structure and so-called constructional continuity. While it is advisable and preferable to carry out monolithic construction continuously, it is often not possible to complete all the work in a single operation. Contractors need to pause the concrete placement due to delays in mix delivery or constraints related to the specific construction technology. These interruptions in the concreting process may give rise to cold joints at the interface between successive layers of concrete. In the context of reinforced concrete, there exists the potential for a weakened bond between the concrete and steel when the layer interface closely aligns with the reinforcement. Consequently, this weakening has the potential to diminish the load-bearing capacity of the structure and compromise its durability. It is crucial to note that the resulting impairment to the internal structure of the element represents a latent defect.

In conventional concretes, a compaction process using vibration is conducted between successive layers of the concrete mixture (1, 2). This method effectively eliminates undesirable phenomena during the multilayer placement of the concrete mixture. However, in the case of self-compacting concrete [SCC], this technique cannot be directly applied. The basic premise of self-compacting concrete is to eliminate the need for vibratory compaction. Subjecting the mix to vibration can disrupt its internal stability and result in segregation. Therefore, technological approaches are sought to enhance the bond between successive layers of the concrete mixture. General technological instructions are outlined in standard guidelines (2, 3) and recommendations (4, 5).

Overall, it is recommended that successive layers of SCC be placed to ensure superficial increase in plasticization of the previous layer, facilitating its proper integration with the newly laid layer (4, 5). It may be achieved by surface mixing or employing weak vibration. Other methods involve increasing the mix pressure in the pipeline or the height from which it is placed (6). However, recommendations and guidelines for SCC seem insufficient regarding practical procedures for these operations. They suggest that these procedures need to be determined based on the contractor's experience and/or initial testing. However, there are currently no simple tests to qualify or quantify the suitability of SCC for multilayer placing on-site. In contrast, the EN 206 (2) and ACI 237 (3) guidelines exclude multi-layered casting of SCC. They recommend continuous placement of self-compacting concrete, with the delivery frequency adapted to the concreting rate and accepted by the manufacturer.

dania na placu budowy. Z kolei wytyczne EN 206 (2) oraz ACI 237 (3) wykluczają możliwość wielowarstwowego układania SCC, ponieważ zalecają, aby beton samozagęszczalny był układany w sposób ciągły, a częstotliwość dostaw była dostosowana do tempa betonowania i zaakceptowana przez producenta.

Mając na uwadze poprawną pracę oraz trwałość układów warstwowych wykonanych z kompozytów cementowych, w ostatnim czasie coraz częściej podejmowane są działania w kierunku zwiększenia przyczepności przy odrywaniu. Dotyczą one na przykład stosowania specjalnego przygotowania powierzchni podkładu, powodującego zwiększenie efektywnej powierzchni rozwinięcia (7), usunięcie mleczka cementowego lub powierzchniowe odsłonięcie kruszywa (8, 9). Podejmowane działania dotyczą również stosowania środków szepnych oraz modyfikacji struktury porów powietrznych kompozytów cementowych użytych do wykonania poszczególnych warstw (10, 11). W pracy (12) wykazano relację między cechami kompozytów cementowych w strefie zespolenia warstw określanymi w skali makro, a cechami określanymi w skalach mezo, mikro i nano. Zaproponowano skuteczną metodę badań poziomu zespolenia układów warstwowych z kompozytów cementowych w ujęciu wielkoskalowym, w tym wskazanie przydatnych do tego celu metod badawczych i deskryptorów.

Niemniej jednak w literaturze przedmiotu istnieje niewiele badań, które dotyczyły wpływu opóźnień w procesie układania mieszanki SCC na wytrzymałość połączeń warstwowych. Badania wykonane przy warstwowym betonowaniu elementów płytowych wykazały, że istnieją trzy czynniki, które decydują o spadku nośności połączenia między kolejnymi warstwami. Są one następujące: czas opóźnienia, odległość od miejsca podawania mieszanki oraz technologia przygotowania pierwszej warstwy (13). Największy spadek wytrzymałości połączenia stwierdzono w przypadku wariantu technologicznego, w którym mieszanka swobodnie rozplywała się na już ułożoną warstwę. Dla opóźnień wynoszących 15, 30 i 60 minut, średni spadek wytrzymałości połączeń wzdłuż elementu w porównaniu do wytrzymałości próbki monolitycznej wynosił odpowiednio 2,3%, 17,3% i 28,4%. W wariantcie technologicznym, w którym wcześniej ułożona warstwa była mechanicznie naruszona, średni spadek dla opóźnienia 15 minut nie występował, a dla 30 i 60 minut wynosił odpowiednio 6,0% i 11,4%. Badania przeprowadzone na elementach belkowych (14) wykazały podobne wyniki. Z kolei w badaniach z wykorzystaniem mieszanek o różnym współczynniku tiksotropii (16, 17), stwierdzono że dla opóźnienia wynoszącego 60 minut, wytrzymałość resztkowa połączenia wahała się od 56% do 91% - w przypadku badania wytrzymałości na ścinanie skośne, od 15% do 76% - w przypadku testu wytrzymałości na ścinanie bezpośrednie oraz od 56% do 80% w przypadku testu wytrzymałości na zginanie. Obecnie prowadzone są badania mające na celu ustalenie krytycznego czasu opóźnienia, rozumianego jako najdłuższy czas, po którym wytrzymałość resztkowa wiązania wynosi co najmniej 90% wytrzymałości osiągniętej podczas ciągłego układania SCC (16, 18). Krytyczny czas opóźnienia zależy od współczynnika tiksotropii mieszanki, grubości warstwy oraz chropowatości połączenia między warstwami. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy zalecają minimalizowanie efektów

With a focus on the successful performance and durability of layered systems made of cementitious composites, there has been a growing trend in increasing the pull-off bond. These measures include, for example, dedicated preparation of the substrate surface to enhance the effective development area (7), removal of cement slurry, or surface exposure of the aggregate (8, 9). Additionally, the approaches involve the use of bonding agents and the modification of the air pore structure of the cementitious composites used for the individual layers (10, 11). The study (12) demonstrated the relationship between the characteristics of cementitious composites in the bonded layer zone determined at the macro scale and those determined at the meso, micro, and nano scales. It proposed an effective method for investigating the bond level of cementitious composite layered systems at large scales, including the identification of useful test methods and descriptors for this purpose.

However, a limited number of studies in the literature have addressed the impact of delays in the SCC mix placement process on the strength of layered joints. Studies conducted on the multilayer placing of slab elements have identified three factors contributing to a decrease in the load-bearing capacity of the joint between successive layers. These are as follows: the delay time, the distance from the mix casting point, and the first layer preparation technology (13). The most significant decrease in joint strength was identified in the technological variant where the mix freely flowed over the already placed layer. For delays of 15, 30, and 60 minutes, the average decrease in joint strength along the element, compared to that of the monolithic sample, was 2.3%, 17.3%, and 28.4%, respectively. In the technological variant where the previously laid layer was mechanically disturbed, no average decrease occurred for a delay of 15 minutes, while for delays of 30 and 60 minutes, it was 6.0% and 11.4%, respectively. Similar results were observed in experiments conducted on beam elements (14). Additionally, studies employing mixes with different thixotropy ratios (16, 17) reported that for a delay of 60 minutes, the residual strength of the joint ranged from 56% to 91% - for the inclined shear test, 15% to 76% - for the direct shear test, and 56% to 80% - for the flexural strength test. Ongoing research aims to establish the critical delay time, defined as the longest time after which the residual bond strength is at least 90% of the strength achieved during continuous SCC placement (16, 18). The critical delay time depends on the thixotropy ratio of the mix, the layer thickness, and the roughness of the joint between the layers. Based on the results, the authors recommend minimizing the effects of thixotropic gelling of the mix and using layer thicknesses greater than 100 mm (15, 17, 19). For thicker layers, natural self-mixing of the layers occurs due to their weight. A promising approach to mitigate the effect of mix stiffening at rest during multilayer casting is to use polymeric bonding agents on top of the first layer (20).

2. Experimental program

The literature review revealed a lack of studies on the impact of concrete placement pauses on the load-bearing capacity of the rebar-to-concrete joint when the mix layer interface occurs in the

tiksotropowego żelowania mieszanki oraz stosowanie warstw o grubości przekraczającej 100 mm (15, 17, 19). W przypadku grubszych warstw dochodzi do samoistnego mieszania się warstw mieszanek pod wpływem ich ciężaru. Obiecującym podejściem do złagodzenia efektu sztywnienia mieszanki w spoczynku, podczas wielowarstwowego wykonywania elementów, jest zastosowanie polimerowych środków wiążących na wierzchu pierwszej warstwy (20).

2. Program badań

Przeprowadzony przegląd literatury wykazał brak badań wpływu przerw w betonowaniu na nośność połączenia pręt zbrojeniowy-beton w przypadku wystąpienie styku warstw mieszanki w otulinie betonowej pręta. Nie prowadzono również badań nad wpływem przerw w betonowaniu przy układaniu betonu od dołu formy przez specjalny zawór odcinający w systemie szalunkowym. Metoda ta jest coraz częściej stosowana przy wykonywaniu elementów pionowych, takich jak ściany lub słupy, o skomplikowanej geometrii, gęstym układzie zbrojenia lub z utrudnionym dostępem od góry (21, 22). Mając na uwadze wymienione problemy, jako cel pracy przyjęto doświadczalne zbadanie wpływu przerw w betonowaniu na nośność połączenia pręt zbrojeniowy-beton oraz na nośność połączenia warstw betonu w przypadku zastosowaniu metod układania mieszanki od góry i dołu formy. Temat poruszany w niniejszym artykule ma duże znaczenie dla technologii betonowania elementów z wykorzystaniem betonu samozagęszczalnego. Jest to temat interesujący i istotny dla inżynierów budownictwa, ponieważ dotyczy aktualnego problemu na placach budowy.

2.1. Materiały

2.1.1. Mieszanka betonowa

Do przeprowadzenia badań przygotowano jedną mieszankę betonu samozagęszczalnego, której skład został przedstawiony w tablicy 1. Wykorzystano cement portlandzki z dodatkiem popiołu lotnego CEM II/B-V 32.5R. Kruszywo gruboziarniste składało się z dwóch frakcji żwiru: 2-8 mm i 8-16 mm, natomiast jako kruszywo drobnoziarniste wykorzystano naturalny piasek o frakcji 0-2 mm. Uziarnienie kruszywa spełniało wymagania EN 12620 (23): kruszywo drobne GF85, kruszywo grube GC85/20. Gęstość objętościowa kruszywa żwirowego wynosiła 2,65 g/cm³, piasku 2,63 g/cm³. Do uzyskania odpowiedniej płynności mieszanki zastosowano superplastyfikator w postaci eteru polikarboksylogowego. Skład mieszanki odpowiadał powszechnie stosowanym proporcjom w budownictwie (24). Całkowita zawartość spoiwa wynosiła 450 kg/m³, stosunek wody do spoiwa wynosił 0,36.

2.1.2. Elementy badawcze

Do badań doświadczalnych wykorzystano elementy panelowe o wymiarach 800×480×160 mm [długość×wysokość×szerokość]. Zastosowano dwie różne metody układania mieszanki betonowej - tradycyjnie od góry formy oraz od dołu. Metoda układania od dołu polegała na wykorzystaniu specjalnie przygotowanego układu

cover of the rebar. Additionally, there is a dearth of research on the effects of concreting interruptions when the concrete mix is placed from the bottom of the mould through a special shut-off valve in the formwork system. This method is increasingly employed for vertical elements, such as walls or columns, characterized by complex geometry, dense reinforcement, or challenging access from above (21, 22). Given the aforementioned issues, the aim of this paper was to experimentally investigate the influence of concreting pauses on the load-bearing capacity of the rebar-to-concrete joint and concrete layer-to-layer joint in the case of top-down and bottom-up SCC mix placement methods. The topic addressed in this article is of great importance for the technology of concrete placement of elements using self-compacting concrete. It is a subject of interest and relevance to civil engineers as it pertains to current challenges on construction sites.

2.1. Materials

2.1.1. Concrete mixture

A self-compacting concrete mix was prepared for the study, with the composition detailed in Table 1. Portland cement with fly ash additive CEM II/B-V 32.5R was used. The coarse aggregate consisted of two fractions of gravel: 2-8 mm and 8-16 mm, while natural sand of 0-2 mm fraction served as fine aggregate. The grain size distribution of the aggregate met the requirements of EN 12620 (23): fine aggregate GF85, coarse aggregate GC85/20. The bulk density of the gravel was 2.65 g/cm³, and the sand was 2.63 g/cm³. A superplasticizer in the form of a polycarboxylic ether was used to achieve adequate flowability of the mixture. The composition of the mix corresponded to commonly used proportions in the construction industry (24). The total binder content was 450 kg/m³, and the water-to-binder ratio was 0.36.

2.1.2. Test elements

Panel elements measuring 800×480×160 mm [length×height×width] were utilized for the experimental study. Two different methods of placing the concrete mixture were employed - traditionally from the top of the form and from the bottom. Placing from the bottom involved the use of a specially prepared pipe system routed above the top surface of the mould. Following the concept of connected vessels, the concrete mixture filled the formwork from below under its own mass. The casting process was conducted in two phases. In the first phase, a layer of concrete with a height of 240 mm, representing half of the target element height, was placed using one batch of concrete mix - SCC-1. In the second phase, the moulds were filled with the next mix batch - SCC-2, to complete the element until the total height of 480 mm was reached - Fig. 1. To clearly distinguish between batches of mixes, a concrete pigment was added to the supplementary batch. The mixes in each variant were discharged from a single casting point located at the end of the form to simulate the free flow of the SCC mix along the formwork. In order to simulate multilayer casting technology, a delay in the execution of the second phase was introduced. The interruption in the placement of the subsequent

rur, które były poprowadzone powyżej górnej powierzchni formy. Zgodnie z koncepcją naczyń połączonych, mieszanka betonowa wypełniała szalunek od dołu pod własnym ciężarem. Proces wykonania elementu odbywał się w dwóch etapach. W pierwszym etapie, używając jednej partii mieszanki betonu - SCC-1, ułożono warstwę betonu o wysokości 240 mm, co stanowiło połowę docelowej wysokości elementu. W drugim etapie, korzystając z kolejnej partii mieszanki - SCC-2, uzupełniano formy do osiągnięcia całkowitej wysokości elementu, czyli 480 mm - rys. 1. Dla wyraźnego odróżnienia od siebie partii mieszanek do uzupełniającej dodano barwnik do betonu. Mieszanki w każdym wariantie podawano z jednego punktu betonowania znajdującego się przy końcu formy, co miało na celu symulowanie swobodnego rozplywu mieszanki SCC wzdłuż szalunku. W celu zasymulowania technologii betonowania warstwowego, zastosowano opóźnienie w wykonaniu drugiego etapu. Przerwa w układaniu kolejnej warstwy mieszanki została ustalona w trzech różnych interwałach czasowych: 15, 30 i 60 minut. Nie stosowano żadnych zabiegów mających na celu zwiększenie sił wiążących między warstwami. W elementach panelowych wprowadzono pręty zbrojeniowe do badania przyczepności stal-beton w miejscu potencjalnego styku warstw mieszanek. Jeden pręt zbrojeniowy o średnicy 16 mm znajdował się w punkcie podawania betonu [próbka I], drugi został wprowadzony po przeciwnej stronie punktu podawania [próbka II].

Szalunek został rozebrany po 3 dniach dojrzewania betonu. Elementy pozostawiono bez ruchu w kontrolowanym środowisku. Po 21 dniach od betonowania wycięto kostki sześciennie o boku

Tablica 1 / Table 1

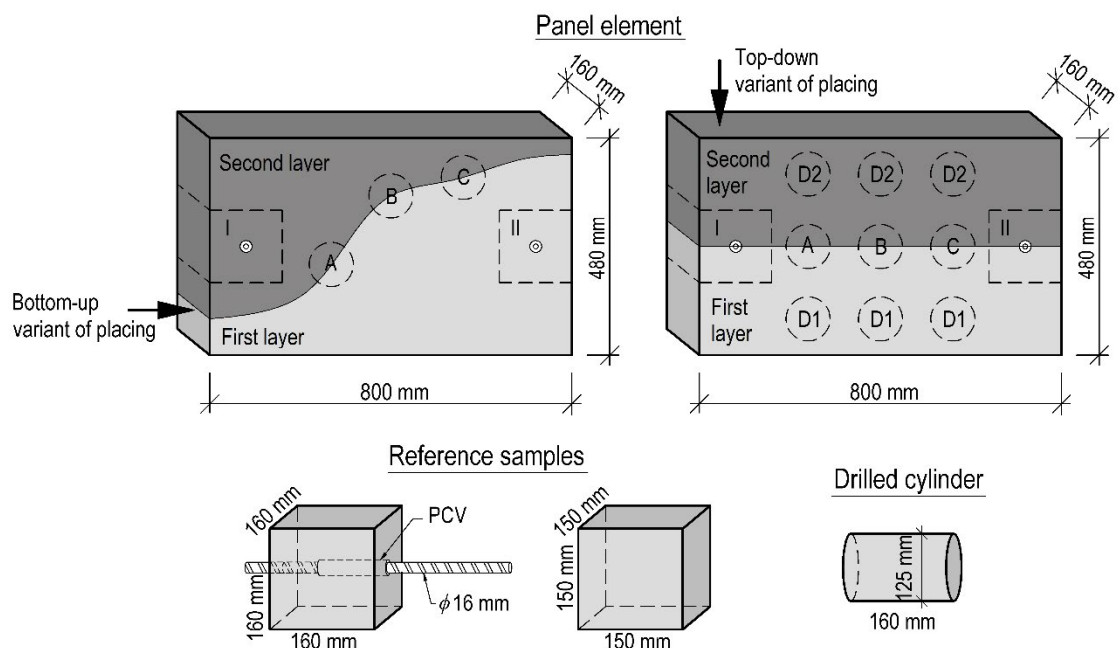
SKŁAD BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO

MIX PROPORTION OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Składniki / Component	kg/m ³
Cement CEM II/B-V 32.5R	360
Woda efektywna / Effective Water	160
Piasek / Sand 0/2 mm	880
Kruszywo drobne / Fine aggregate 2/8 mm	440
Kruszywo grube / Coarse aggregate 8/16 mm	440
Popiół lotny / Fly ash	90
Superplastyfikator / Superplasticizer	3.1

mix layer was defined at three distinct time intervals: 15, 30, and 60 minutes. No treatments were employed to increase the bond forces between the layers. Within the panel elements, reinforcing bars were incorporated to assess the steel-to-concrete bond at the potential interface of the mix layers. Specifically, one rebar with a diameter of 16 mm was positioned at the concrete casting point [sample I], while the other was situated on the opposite side of the casting point [sample II].

The formwork was removed after three days of concrete curing, and the elements were left undisturbed in a controlled environment. 21 days after casting, cubic elements of 160 mm were cut for the rebar-to-concrete bond test, following the recommendations of RILEM TC (25) and EN 10080 (26). From each panel, three concrete cores with a diameter of 125 mm were extracted at the interface of the layers for testing the bond strength between the two layers of SCC - samples A, B, C. In addition, for panel elements cast in the top-down variant, three monolithic reference cores were collected from each concrete layer for splitting tensile strength tests [sam-



Rys. 1. Schematyczny widok panelowych elementów badawczych i próbek referencyjnych

Fig. 1. Schematic view of test panel elements and reference samples

160 mm do badania przyczepności pręt zbrojeniowy-beton zgodnie z rekomendacją RILEM TC (25) i EN 10080 (26). Z każdego panelu pobrano 3 rdzenie betonowe o średnicy 125 mm znajdujące się na styku warstw, przeznaczone do badania nośności zespolenia dwóch warstw betonu - próbki A, B, C. Dodatkowo dla paneli betonowanych od góry pobrano z każdej warstwy betonu 3 monolityczne rdzenie referencyjne do badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu [próbki D1, D2]. Dla każdej serii doświadczalnej wykonano jeden element panelowy. Łącznie przygotowano więc 12 próbek do badania przyczepności pręt zbrojeniowy-beton, 18 rdzeni do badania nośności zespolenia warstw oraz 18 rdzeni do badania wytrzymałości betonu monolitycznego. Dodatkowo przygotowano po 5 próbek referencyjnych sześciennych o boku 150 mm z każdej partii mieszanki do badania wytrzymałości na ściskanie oraz 5 próbek monolitycznych sześciennych o boku 160 mm do badania przyczepności pręt zbrojeniowy-beton.

2.2. Metody badań

W celu określenia właściwości reologicznych mieszanki betonowej przeprowadzono trzy badania. Pierwszym z nich było badanie rozplywu, które służyło do określenia płynięcia i lepkości plastycznej mieszanki (27). Drugim badaniem było określenie zdolności mieszanki do swobodnego przepływu przez ciasne otwory z użyciem L-pojemnika (28). Trzecie polegało na przeprowadzeniu wizualnej oceny odporności na segregację mieszanki (29). Badanie świeżej mieszanki przeprowadzono bezpośrednio przed jej ułożeniem w formie.

Badania wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzono zgodnie z metodą podaną w EN 12390-3 (30). Wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonano zgodnie z metodą opisaną w EN 12390-6 (31). Badanie nośności zespolenia układanych warstw betonu SCC, wykonano na podstawie badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (31). Styk między dwoma warstwami mieszanki usytuowany był pionowo, w osi przykładowych sił. Wartości wytrzymałości styku na rozciąganie obliczono jak dla metody wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu.

Badania przyczepność pręt zbrojeniowy-beton zostały przeprowadzone przy użyciu testu pull-out. Jest to podstawowa metoda oceny zależności przyczepność-przemieszczenie i jest zgodna z wymaganiami i zaleceniami RILEM TC (25) i EN 10080 (26) dla próbek sześciennych. Mierzonymi wielkościami są siła przyłożona do pręta zbrojeniowego i względne przemieszczenia między materiałami. Siła działająca na pręt zbrojeniowy przykładana była stopniowo do osiągnięcia granicznych naprężeń przyczepności. Pomiar przemieszczeń nieobciążonego końca pręta zbrojeniowego względem betonu wykonano za pomocą czujnika przemieszczeń liniowych. Użyto komputerowego systemu gromadzenia danych. Długość odcinka przyczepności została przyjęta jako trzykrotność średnicy pręta. Wszystkie badania przeprowadzono po 28 dniowym okresie dojrzewania próbek w warunkach laboratoryjnych.

ples D1, D2]. One panel element was made for each experimental series, resulting in a total of 12 specimens prepared for the rebar-to-concrete bond test, 18 cores for the concrete layer-to-layer bond test, and 18 cores for the monolithic concrete strength test. Furthermore, five reference cubic specimens with a side length of 150 mm were prepared from each mix batch for compressive strength tests, along with five monolithic cubic specimens with a side length of 160 mm for rebar-to-concrete bond tests.

2.2. Experimental methods

Three tests were performed to determine the flow properties of the concrete mix. The first was the slump-flow test, which was used to determine the flowability and plastic viscosity of the mix (27). The second test was to determine the ability of the mixture to flow freely through tight openings using an L-box (28). The third consisted of a visual assessment of the segregation resistance of the mix (29). The fresh mix test was carried out directly before it was placed in the mould.

Concrete compressive strength tests were conducted following the method outlined in EN 12390-3 (30). Splitting tensile strength tests were carried out in accordance with the method specified in EN 12390-6 (31). The assessment of the load-bearing capacity of the joint between the layers of SCC was performed based on a splitting tensile strength test (31). The joint between the two layers of the mix was oriented vertically, aligning with the axis of the applied forces. The load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint was calculated using the method for determining the splitting tensile strength of concrete.

The rebar-to-concrete bond tests were conducted using the pull-out test, which is the primary method for assessing the bond-slip relationship and aligns with the requirements and recommendations of RILEM TC (25) and EN 10080 (26) for cubic specimens. The measured values include the force applied to the rebar and the relative displacements between the materials. The force applied to the rebar was gradually increased until the ultimate bond stresses were reached. The displacement of the unloaded end of the rebar relative to the concrete was measured using a linear displacement sensor, and a computer-based data acquisition system facilitated the process. The length of the bond section was set at three times the diameter of the bar. All tests were conducted after the specimens had undergone a 28-day maturation period under laboratory conditions.

3. Results and discussion

3.1. Properties of fresh mix and strength of hardened concrete

Table 2 summarizes the flow properties of the mix batches and the compressive strength results obtained from the reference cubic specimens after 28 days of maturation. The mixes were classified as compliant with European standards for SCC (32) based on the results.

Description Oznaczenie	Slump flow Rozplyw, mm	Slump flow time Czas rozplywu T500, s	L-box ratio Współczynnik L-box, -	Visual stability index Wizualny wskaźnik stabilności	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie	
					f_{cc} , MPa	Standard deviation Odchylenie standardowe, MPa
SCC-1	665±10	2.1	0.88	0	61.9	2.1
SCC-2	670±5	1.8	0.91	0	57.6	3.6

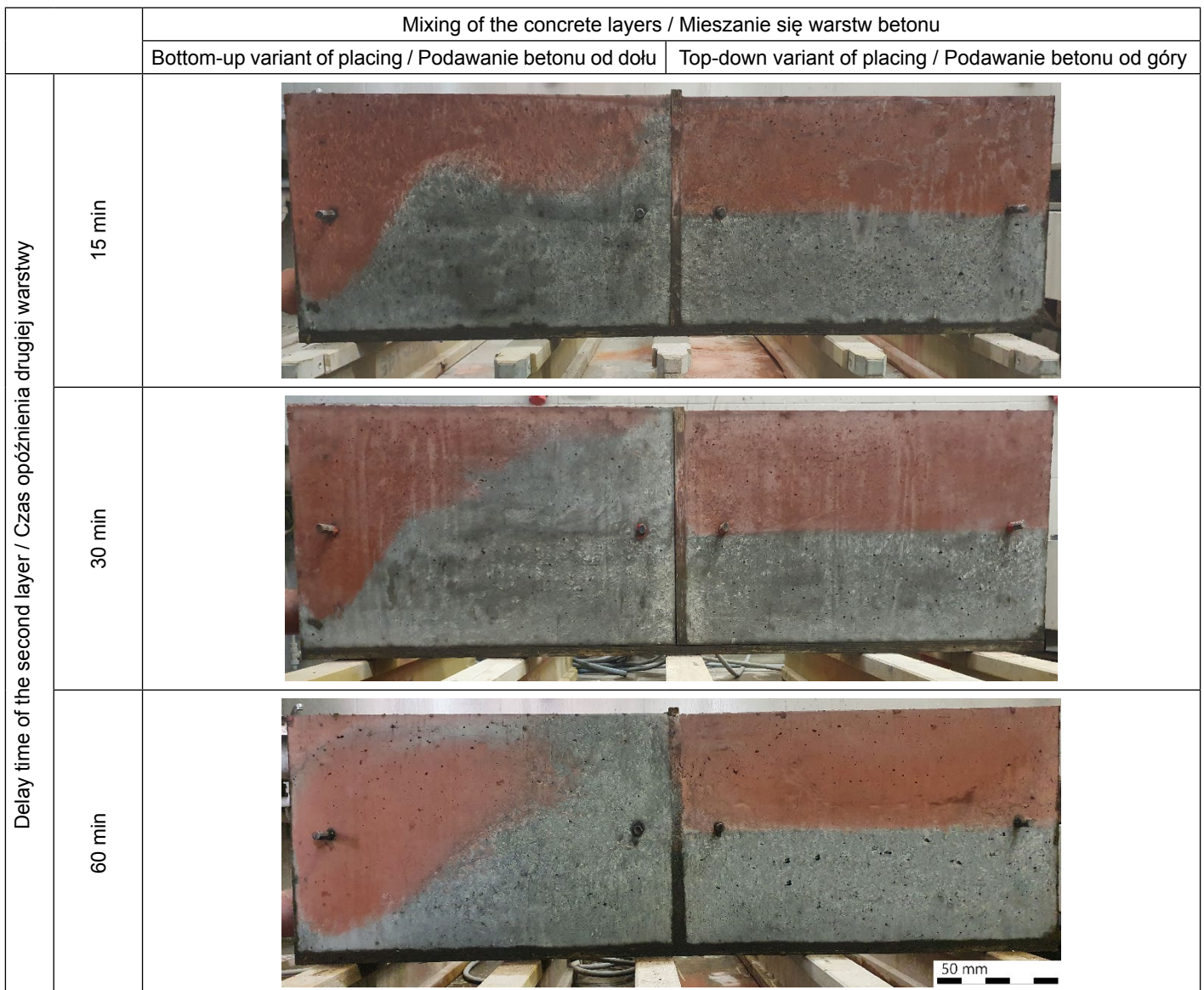
3. Wyniki i dyskusja

3.1. Właściwości świeżej mieszanki i wytrzymałość stwardniałego betonu

W tablicy 2 przedstawiono wyniki badań właściwości reologicznych użytych partii mieszanki oraz wytrzymałości na ściskanie

3.2. Mixing of layers in panel elements

The technology of placing SCC mix from the bottom of the mould involves the introduced mix first spreading along the length of the element until it reaches the height of the opening through which it is cast. Subsequently, the previously injected mixture gradually rises upwards, while simultaneously flowing along the length of the



Rys. 2. Mieszanie się warstw betonu w zależności od czasu opóźnienia

Fig. 2. Mixing of concrete layers depending on delay time

uzyskanej dla próbek sześciennych, referencyjnych po 28 dniach dojrzewania. Na podstawie uzyskanych wyników mieszanki sklasyfikowano jako zgodne z europejskimi standardami dla SCC (32).

3.2. Mieszanie się warstw w elementach panelowych

Technologia betonowania od dołu formy powoduje, że w pierwszej kolejności wprowadzona mieszanka rozplywa się wzdłuż elementu aż do osiągnięcia wysokości otworu, przez który jest podawana. Następnie występuje sukcesywne podnoszenie się w górę uprzednio wprowadzonej mieszanki z jednoczesnym jej rozplywem wzdłuż elementu. Podnoszona warstwa betonu ulega podczas betonowania ciągłemu samozageszczeniu. Podczas podawania drugiej warstwy, wtłaczana mieszanka przesuwala mieszanke pierwszej warstwy na wysokości zaworu i powodowała jej jednoczesne podnoszenie. Opisane zjawisko było niezależne od czasu opóźnienia drugiej warstwy. Jakkolwiek w wyniku efektu sztywnienia mieszanki pozostawionej w spoczynku, końcowy efekt przebiegu styku warstw jest inny [rys. 2]. Dla czasu opóźnienia 15 minut przebieg styku był nieregularny, związany ze swobodnym rozplywem obydwóch warstw. W przypadku opóźnienia 30 i 60 minut efekt sztywnienia mieszanki pierwszej warstwy powodował powstanie styku o przebiegu zbliżonym do liniowego. Należy również zaznaczyć, że na powierzchniach licowych elementów panelowych nie występowały jednakowe wartości pól powierzchni dwóch warstw mieszanek. Druga warstwa mieszanki z barwnikiem stanowiła około 40% powierzchni licowej elementu. Związane jest to z występowaniem mieszania się warstw wewnątrz przekroju elementu. Przebieg linii styku warstw mieszanek nie jest więc tak jednoznaczny jak w przypadku betonowania od góry.

3.3. Nośność zespolenia warstw betonu

W tablicy 3 i 4 przedstawiono wyniki badań nośności zespolenia układanych warstw betonu na podstawie pomiaru rozciągania przy rozłupywaniu. Przedstawiono również parametr opisujący dynamikę spadku nośności połączenia w odniesieniu do jednej minuty. Zależność zmiany nośności złącza od czasu opóźnienia przedstawiono na rys. 3. Na rys. 4 przedstawiono reprezentatywne

element. The lifted concrete layer undergoes continuous self-consolidation during concreting. During the second layer casting, the injected mix displaced the first layer mix at the height of the valve and caused its simultaneous lifting. The phenomenon described was independent of the delay time of the second layer. However, as a result of the stiffening effect of the mixture left at rest, the final course of the contact between the layers is different - Fig. 2. For a delay time of 15 minutes, the course of the contact was irregular, related to the unhindered flow of the two layers. For delay times of 30 and 60 minutes, the stiffening effect of the mixture of the first layer resulted in a contact course that was approximately linear. It should also be noted that the face surfaces of the panel elements did not exhibit equal surface area values for the two mix layers. The second layer of the mixture with the pigment accounted for approximately 40% of the element face surface. This was attributed to the mixing of the layers occurring within the cross-section of the element. Consequently, the course of the contact lines of the mix layers is not as clear as in the case of the top-down variant of concreting.

3.3. Load-bearing capacity of concrete layer-to-layer joint

Tables 3 and 4 present the results of tests on the load-bearing capacity of the joint between the layers of SCC based on the splitting tensile strength test. Additionally, a parameter describing the dynamics of the decrease in the load-bearing capacity of the joint with respect to one minute is provided. The relationship between the change in the load-bearing capacity of the joint and the delay time is illustrated in Fig. 3. Fig. 4 displays representative sample cross-section surfaces after the splitting tensile test for a delay time of 60 minutes. The cross-section surfaces of the specimens taken from the elements concreted from below revealed the occurrence of layer mixing within the element cross-section. In contrast, specimens taken from elements concreted from above exhibited a linear interface of the layers.

A reduction in the load-bearing capacity of the layer-to-layer joint was found when the mix was cast from above. It was demonstrated

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI POMIARÓW WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU – BETONOWANIE OD GÓRY

RESULTS OF SPLITTING TENSILE STRENGTH TESTS – TOP-DOWN VARIANT OF PLACING

Sample designation Oznaczenie próbek	Time delay in layer placing Opóźnienie czasowe w układaniu warstw											Load-bearing capacity reduction rate Wskaźnik zmniejszenia nośności, MPa/min
	0 min [monolithic sample / próbka monolityczna]		15 min			30 min			60 min			
	f_{ct} , MPa	SD, MPa	f_{ct} , MPa	Mean / Średnia, MPa	SD, MPa	f_{ct} , MPa	Mean / Średnia, MPa	SD, MPa	f_{ct} , MPa	Mean / Średnia, MPa	SD, MPa	
A	3.51	0.12	3.75	3.34	0.44	3.62	3.12	0.40	2.40	2.09	0.28	0.02367
B			2.73			2.64			2.14			
C			3.55			3.09			1.72			

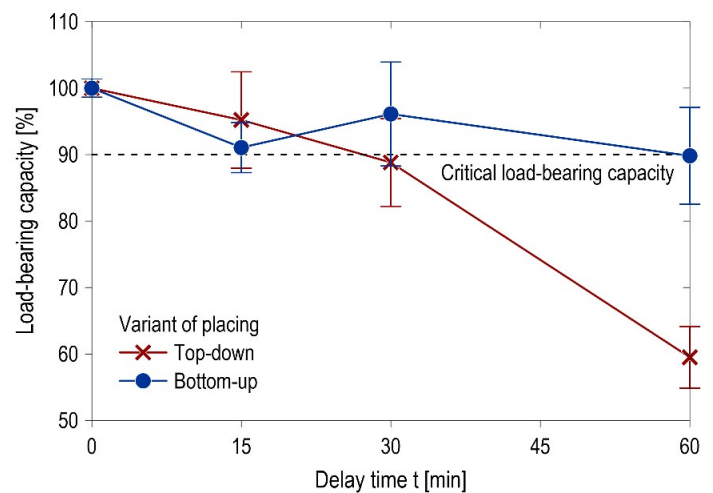
f_{ct} – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu / splitting tensile strength, SD – odchylenie standardowe / standard deviation

Sample designation Oznaczenie próbek (see Fig. 1)	Time delay in layer placing Opóźnienie czasowe w układaniu warstw										Load-bearing capacity reduction rate Wskaźnik zmniejszenia nośności [MPa/min]	
	0 min [monolithic sample / próbka monolityczna]		15 min			30 min			60 min			
	f_{ct} , MPa	SD, MPa	f_{ct} , MPa	Mean / Średnia, MPa	SD, MPa	f_{ct} , MPa	Mean / Średnia, MPa	SD, MPa	f_{ct} , MPa	Mean / Średnia, MPa		SD, MPa
A	3.51	0.12	3.20	3.20	0.23	2.79	3.37	0.48	2.57	3.15	0.44	0.0060
B			3.47			3.38			3.64			
C			2.91			3.95			3.25			

f_{ct} – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu / splitting tensile strength, SD – odchylenie standardowe / standard deviation

przełomy próbek dla czasu opóźnienia 60 minut. Przełomy próbek pobranych z elementów betonowanych od dołu wykazywały występowanie mieszania się warstw wewnątrz przekroju elementu. W przypadku próbek pobranych z elementów betonowanych od góry, styk warstw przebiegał liniowo.

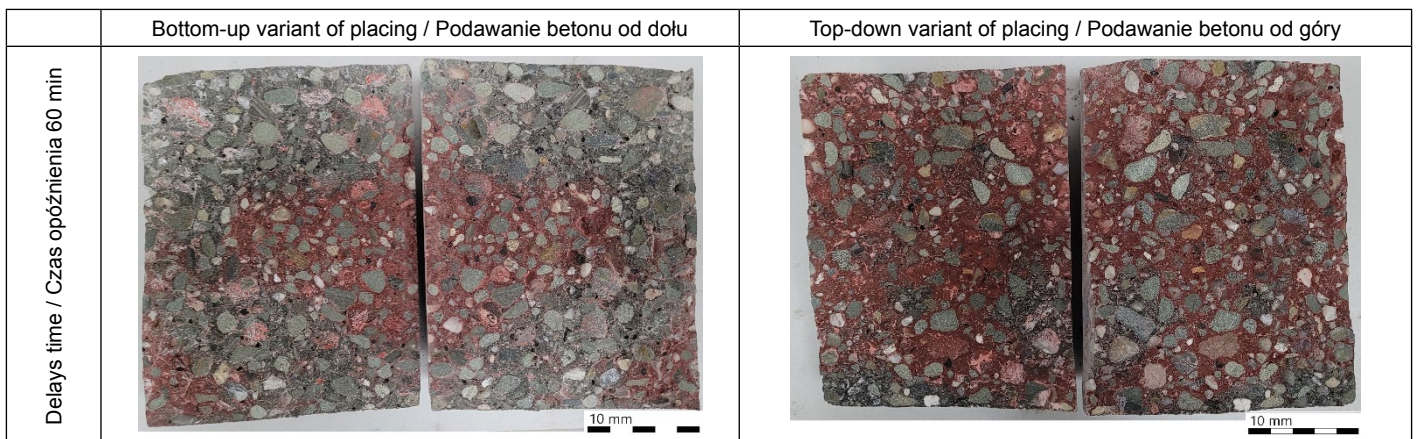
W przypadku podawania mieszanki od góry stwierdzono spadek nośności zespolenia warstw. Wykazano, że im dłuższy był czas opóźnienia to spadek nośności był większy. Potwierdzają to wyniki badań opisane w pracach (13, 16, 17). W niniejszych badaniach dla czasów opóźnienia 15, 30 i 60 minut średni spadek nośności zespolenia w stosunku do próbki monolitycznej wyniósł odpowiednio 4,8%, 11,2% i 40,5%. Wykazano również, że dla czasu opóźnienia 60 minut spadek nośności zespolenia zmienia się wraz z odległością od miejsca betonowania. Wzdłuż elementu panelowego odnotowano spadek na poziomie 28%. Wraz ze zwiększaniem odległości od punktu betonowania rozptylająca się mieszanka wytracała swoją prędkość i nie była w stanie wytworzyć wystarczających naprężeń ścinających na granicy warstw do odwrócenia procesu usztywnienia struktury warstwy pierwszej. W przypadku betonowania od dołu nie zanotowano takiego zjawiska. Technologia podawania mieszanki od dołu była wystarczającym zabiegiem



Rys. 3. Zależność zmiany nośności zespolenia warstw od czasu opóźnienia

Fig. 3. The relation between the load-bearing capacity ratio and delay time

that the longer the delay time, the more significant the decrease in load-bearing capacity, confirming results from previous studies (13, 16, 17). In the present study, for delay times of 15, 30, and 60 minutes, the average decrease in the load-bearing capacity of



Rys. 4. Przykładowe powierzchnie przełomów próbek po próbie rozciągania przy rozłupywaniu dla opóźnienia 60 minut

Fig. 4. Examples of sample surfaces after splitting tensile test for a delay of 60 minutes

do uzyskania nośności złącza na poziomie 90% wytrzymałości osiągniętej podczas ciągłego układania mieszanki, nawet dla opóźnienia 60 minut.

W celu wyjaśnienia zjawisk powodujących spadek nośności zespolenia między dwoma warstwami w przypadku betonowania od góry, wykonano analizę stanu powierzchni zniszczenia po badaniach nośności złącza. Dla czasów opóźnienia 15 i 30 minut płaszczyna zniszczenia przechodziła przez strefę styku zaczynu i kruszywa jak i przez kruszywo. Jest to powszechnie obserwowany mechanizm zniszczenia w przypadku betonów o średniej wytrzymałości. Swobodny rozływ warstwy drugiej umożliwił odwrócenie procesu sztywnienia mieszanki. Również zastosowanie znacznej grubości drugiej warstwy przyczyniło się do dodatkowego przenikania się warstw i poprawy zespolenia. Jednakże przy czasie opóźnienia wynoszącym 60 minut zauważono pojawienie się stref zniszczenia również w wyniku odspojenia styku warstw przechodzącego po powierzchni usztywnienia struktury mieszanki. Przekłada się to na odnotowany znaczący spadek wartości nośności zespolenia warstw [tablica 3, rys. 3].

3.4. Nośność połączenia pręt zbrojeniowy-beton

Otrzymane z badań przebiegi zależności naprężenie przyczepności – przemieszczenie [τ -s] zaprezentowano na rys. 5. Wydajność wiązania można opisać za pomocą różnych reprezentatywnych naprężeń przyczepności. Jedną z możliwości jest naprężenie w momencie zerwania wiązania, τ_{max} (33, 34, 35). Inną opcją jest krytyczne naprężenie przyczepności odpowiadające przemieszczeniu pręta zbrojeniowego wynoszącego 0,25 mm, $\tau_{0,25}$ (35, 36). Jednoczesne porównanie tych naprężeń zapewnia obraz sztywności przyczepności. Tablica 5 i 6 zawiera wyniki badań wiązania dla naprężeń reprezentatywnych τ_{max} i $\tau_{0,25}$. Przedstawiono również parametr opisujący dynamikę spadku naprężeń przyczepności w odniesieniu do jednej minuty. Zależność zmiany nośności połączenia pręt zbrojeniowy-beton od czasu opóźnienia kolejnej warstwy przedstawiono na rys. 6.

W przypadku elementu panelowego betonowanego od góry utrata przyczepności pręt zbrojeniowy-beton wszystkich próbek następowała nagle przez rozłupanie otuliny betonowej. Pęknięcie próbki przechodziło każdorazowo przez styk warstw betonu [rys. 7]. Zauważone uszkodzenia połączenia pręt zbrojeniowy-beton

Tablica 5 / Table 5

REPREZENTATYWNE NAPRĘŻENIA PRZYCZEPNOŚCI – BETONOWANIE OD GÓRY

RESPECTIVE BOND STRESSES – TOP-DOWN VARIANT OF PLACING

Sample designation Oznaczenie próbek (see Fig. 1)	Time delay in layer placing / Opóźnienie czasowe w układaniu warstw										Bond reduction rate Wskaźnik redukcji przyczepności	
	0 min [monolithic sample / próbka monolityczna]				15 min		30 min		60 min		τ_{max} , MPa/min	$\tau_{0,25}$, MPa/min
	τ_{max} , MPa	SD, MPa	$\tau_{0,25}$, MPa	SD, MPa	τ_{max} , MPa	$\tau_{0,25}$, MPa	τ_{max} , MPa	$\tau_{0,25}$, MPa	τ_{max} , MPa	$\tau_{0,25}$, MPa		
I	35.70	2.37	33.23	1.42	33.75	31.80	33.57	31.41	29.84	27.67	0.0984	0.0978
II					31.75	30.85	33.04	32.69	27.71	27.36		

SD – odchylenie standardowe / standard deviation

the concrete layer-to-layer joint in relation to the monolithic sample was 4.8%, 11.2%, and 40.5%, respectively. It was also noted that, for a delay time of 60 minutes, the reduction in load-bearing capacity of the joint varied with the distance from the casting point. A decrease of 28% was recorded along the panel element. With the increasing distance from the casting point, the spreading mixture lost its velocity and could no longer generate sufficient shear stresses at the layer interface to counteract the stiffening of the first layer structure. In the case of bottom-up variant of placing, no such phenomenon was observed. The technology of placing the SCC mix from below was sufficient to obtain a joint load capacity of 90% of the strength reached during continuous placing of the mix, even for a delay of 60 minutes.

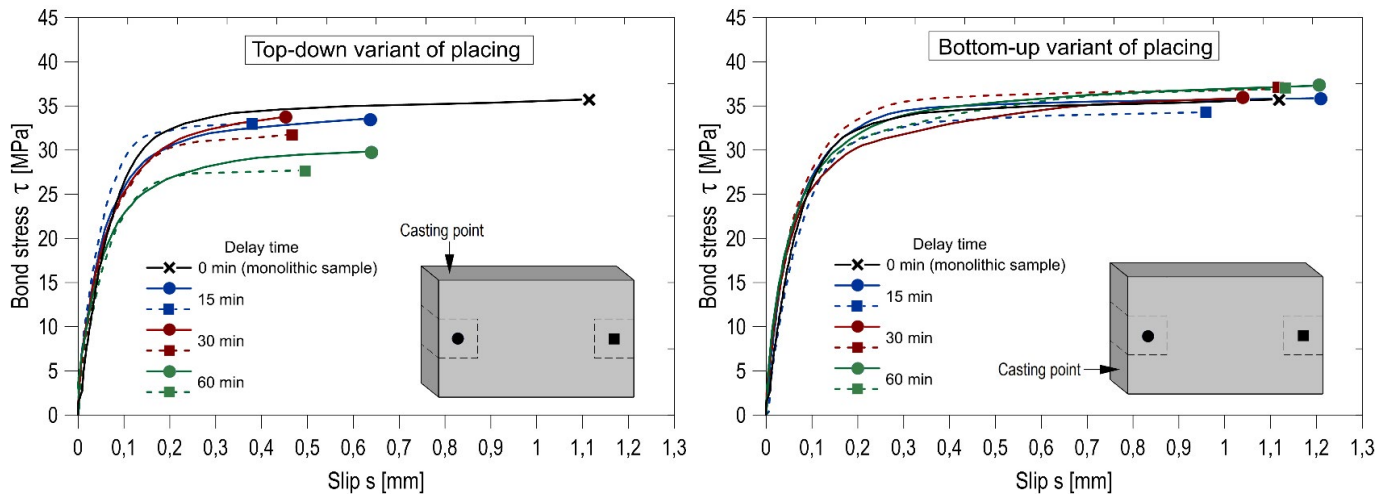
In order to clarify the phenomena responsible for the decrease in the load-bearing capacity of the joint between the two layers when concreting from above, an analysis of the failure surface condition after the splitting tensile tests was conducted. For delay times of 15 and 30 minutes, the failure plane passed through the interface between the matrix and aggregate as well as the aggregate. This is a commonly observed failure mechanism for concretes of medium strength. The unrestricted flow of the second layer provided an opportunity to reverse the stiffening process of the mix. Also, the use of a substantial second layer thickness contributed to additional interpenetration of the layers and improved bonding. However, at a delay time of 60 minutes, the formation of failure zones due to layer interface debonding passing over the stiffened surface of the mix structure was also observed. This translates into a recorded significant decrease in the value of the layer-to-layer load-bearing capacity [Table 3, Fig. 3].

3.4. Load-bearing capacity of steel-to-concrete joint

The bond stress-slip relationships [τ -s] obtained from the tests are presented in Fig. 5. The bond performance can be described by different representative bond stresses. One option is the stress at bond failure, τ_{max} (33, 34, 35). Another option is the critical bond stress corresponding to a rebar displacement of 0.25 mm, $\tau_{0,25}$ (35, 36). The simultaneous comparison of these stresses provides a depiction of bond stiffness. Tables 5 and 6 show the results of the bond test for representative stresses τ_{max} and $\tau_{0,25}$. A parameter describing the dynamics of the decrease in bond stress with respect to one minute is also presented. The dependence of the change

Sample designation Oznaczenie próbek (see Fig. 1)	Time delay in layer placing / Opóźnienie czasowe w układaniu warstw										Bond reduction rate Wskaźnik redukcji przyczepności	
	0 min [monolithic sample / próbka monolityczna]				15 min		30 min		60 min		T_{max} , MPa/min	$T_{0.25}$, MPa/min
	T_{max} , MPa	SD, MPa	$T_{0.25}$, MPa	SD, MPa	T_{max} , MPa	$T_{0.25}$, MPa	T_{max} , MPa	$T_{0.25}$, MPa	T_{max} , MPa	$T_{0.25}$, MPa		
I	35.70	2.37	33.23	1.42	35.88	31.18	35.88	33.77	37.30	33.08	-	0.0025
II					36.94	34.76	34.29	32.05	36.94	32.09	-	0.0189

SD – odchylenie standardowe / standard deviation

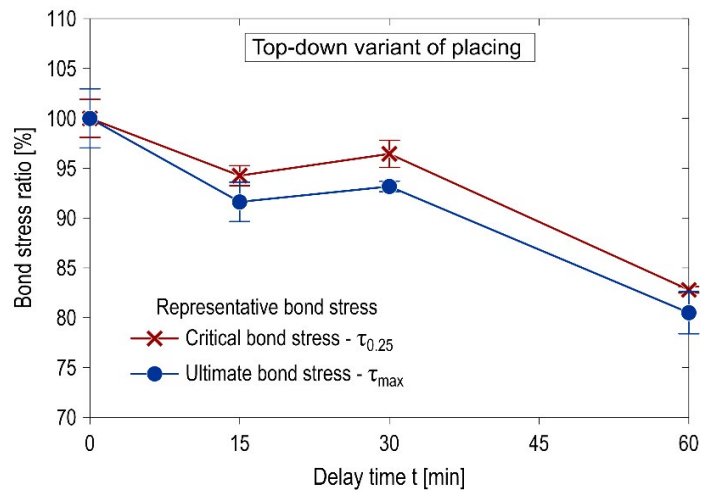


Rys. 5. Zależność naprężenie przyczepności – przemieszczenie

Fig. 5. Bond stress vs. corresponding slip

w przypadku podawania betonu od góry, były związane z typowym przekroczeniem nośności na rozciąganie w pierścieniu betonowym wokół pręta zbrojeniowego (36, 37, 38). Duża wytrzymałość betonu na ściskanie ograniczyła możliwość kruszenia betonu przy powierzchni czołowej żeber. Wynikająca z tego duża koncentracja naprężeń rozciągających w betonowym pierścieniu wokół pręta powodowała pojawienie się podłużnych pęknięć. Pęknięcia te rozwijały się promieniowo od pręta zbrojeniowego na zewnątrz, prowadząc do przedwczesnej utraty nośności połączenia pręt zbrojeniowy-beton w wyniku rozłupania najbliższego miejsca styku warstw betonu.

Elementy betonowane od dołu, a także referencyjne, wykazywały mechanizm zniszczenia w wyniku wyrwania pręta z betonu, zgodnie z przyjętym modelem badawczym. Należy zaznaczyć, że w przeprowadzonym teście w wyniku mieszania się kolejnych partii betonu przez otulinę betonową prętów zbrojeniowych nie przechodził w tym wariantcie styk warstw. Od strony podawania mieszanki pręt zbrojeniowy znajdował się w warstwie drugiej, natomiast drugi pręt w warstwie pierwszej. Próbkę te były więc monolityczne. Potwierdza to przebieg charakterystyk τ - s jak i wartości reprezentatywnych naprężeń przyczepności, które są tożsame z otrzymanymi dla próbek monolitycznych.

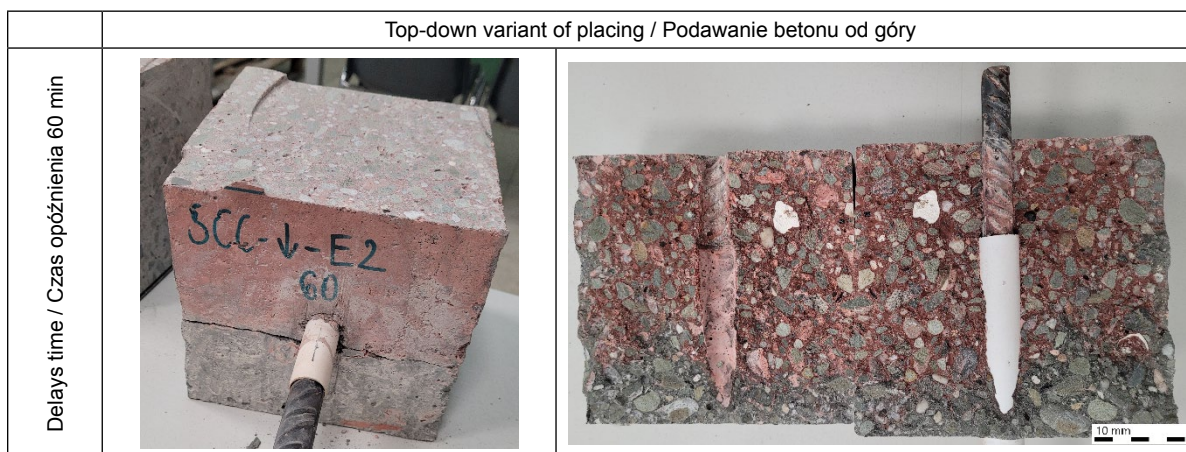


Rys. 6. Zależność zmiany naprężenia przyczepności od czasu opóźnienia

Fig. 6. The relation between the bond stress ratio and delay time

in the resistance of the rebar-to-concrete joint on the delay time of the subsequent layer is shown in Fig. 6.

In the case of a panel element cast from above, the impairment of rebar-to-concrete bond of all specimens occurred abruptly by splitting of the concrete cover. The cracking of the specimen passed through the concrete layer interface each time - Fig. 7. The



Rys. 7. Przykładowa powierzchnia próbek po badaniach pull-out dla opóźnienia 60 minut

Fig. 7. Examples of sample surfaces after pull-out tests for a delay of 60 minutes

W przypadku podawania mieszanki od góry stwierdzono spadek nośności i sztywności połączenia pręt zbrojeniowy-beton funkcji czasu opóźnienia kolejnej warstwy. Dla czasów opóźnienia 15, 30 i 60 minut średni spadek naprężeń τ_{max} w stosunku do próbki monolitycznej wyniósł odpowiednio 8,4%, 6,8% i 19,5%. Dla naprężeń $\tau_{0,25}$ odnotowano zbliżone wartości spadku odpowiednio 5,7%, 3,6% i 17,2%. Nie odnotowano natomiast tendencji spadku reprezentatywnych naprężeń przyczepności w zależności od położenia próbki względem punktu betonowania.

Przy wykonywaniu elementów w technologii podawania mieszanki od góry, niektóre poziome pręty zbrojeniowe mogą znajdować się w strefach kontaktu warstw na znacznej długości. Wytworzone w ten sposób połączenie pręt zbrojeniowy-beton, jak wykazały badania, wyróżnia się słabszymi właściwościami wiązania. W konsekwencji może to prowadzić do powstania ciągłego strukturalnego osłabienia konstrukcji.

4. Rekomendacje

Występowanie sztywnienia mieszanki SCC, która jest pozostawiona w spoczynku, może mieć istotne znaczenie dla nośności połączenia między kolejnymi warstwami przy wykonywaniu betonowania zgodnie z międzynarodowymi wytycznymi (3-5). Wytyczne zalecają wykorzystywanie technologii betonowania z jednego punktu podawania mieszanki betonowej, aż deskowanie zostanie całkowicie wypełnione lub minimalizację punktów podawania. Wykazano, że w przypadku betonowania od góry swobodny rozpliw mieszanki po warstwie pierwszej nie powoduje jej odpowiedniego upłynnienia przy wydłużonych czasach opóźnienia [≥ 60 minut]. Dodatkowo wykazano, że zastosowanie drugiej warstwy o grubości znacznie powyżej wskazanej w rekomendacjach [100 mm] (15), nie wystarczyło do uzyskania efektu ścinania pomiędzy dwoma warstwami dla czasu opóźnienia 60 minut. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań oraz literatury (13, 14, 16, 17), zaleca się, aby kolejne warstwy mieszanki o grubości ≥ 100 mm w elementach belkowych, ściennych układać z nie większą zwłoką niż 30 minut. W przypadku dłuższych przerw należy ograniczyć

observed failures of the rebar-to-concrete interface when concrete was placed from above were associated with a typical exceeding of the tensile strength in the concrete ring around the rebar (36, 37, 38). The high compressive strength of the concrete limited the possibility of concrete crushing at the face of the ribs. The resulting high concentration of tensile stresses in the concrete ring around the bar resulted in the appearance of longitudinal cracks. These cracks developed radially from the rebar outwards, leading to a premature loss of load-bearing capacity of the rebar-to-concrete joint as a result of splitting at the weakest point - the interface between the layers of concrete.

Both the bottom-up cast and reference elements exhibited a failure mechanism involving the pull-out of the rebar from the concrete, in accordance with the adopted test model. It is important to note that, in this test, the interface between layers did not traverse the concrete cover of the reinforcing bars due to the mixing of successive batches of concrete in this variant. At the mix casting point side, the reinforcing bar was located in the second layer, while the other bar was in the first layer. These specimens were therefore monolithic. This confirms the course of the τ -s curves as well as the values of the representative bond stresses, which are the same as those obtained for the monolithic specimens.

When the mix was placed from the top, a reduction in the load-bearing capacity and stiffness of the rebar-to-concrete joint was found as a function of the delay time of the subsequent layer. For delay times of 15, 30 and 60 minutes, the average reduction in stress τ_{max} relative to the monolithic specimen was 8.4%, 6.8% and 19.5%, respectively. In the case of $\tau_{0,25}$ stresses, similar decrease values of 5.7%, 3.6% and 17.2% were recorded, respectively. However, there was no trend of a reduction in representative bond stresses as a function of the specimen position relative to the casting point.

In the execution of elements using top-down placing technology, it is possible for some horizontal reinforcing bars to be located within the interface zones of the layers over a considerable length. The reinforcing bar-to-concrete joint thus produced, as studies have shown, is distinguished by its inferior bond properties. Consequ-

możliwość swobodnego rozplywu mieszanki po wcześniej ułożonej warstwie. Zaleca się, aby wcześniej ułożona mieszanka była każdorazowo uplastyczniona na powierzchni, co poprawi jej wiązanie z nowo ułożoną mieszanką.

W celu całkowitego wyeliminowania negatywnych skutków wielowarstwowego układania betonu w przypadku konstrukcji belkowych, ściennych z SCC, rekomenduje się zastosowanie technologii betonowania od dołu. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, technologia ta jest wystarczającym zabiegiem do uzyskania nośności zespolenia warstw na poziomie 90% wytrzymałości osiągniętej podczas ciągłego układania mieszanki, nawet dla opóźnienia 60 minut. Dodatkowo przebieg styku warstw jest nieregularny i występuje mieszanie się warstw wewnątrz przekroju elementu. Ogranicza to możliwość wytworzenia się ciągłego strukturalnego osłabienia konstrukcji. Może być to potencjalnie ważne dla konstrukcji o specjalnym przeznaczeniu, od których wymaga się większej trwałości i/lub niezawodności takie jak: konstrukcje oporowe, mostowe, sprężone, itp. Ponadto inne badania (39) wskazują, że podawanie mieszanki betonowej od dołu formy powoduje ogólną poprawę wiązania betonu z prętami zbrojeniowymi jak i samej struktury betonu.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania wpływu technologii betonowania na nośność połączenia warstw betonu oraz pręt zbrojeniowy-beton w elementach wykonanych warstwowo, dostarczyły interesujących wyników i obserwacji:

- Badania wykazały, że istnieją istotne różnice w sposobie mieszania się warstw betonu, w zależności od zastosowanej technologii podawania mieszanki. W przypadku betonowania od dołu przebieg styku warstw był nieregularny i występowało mieszanie się warstw wewnątrz przekroju elementu. Wytworzone w ten sposób połączenie warstw ogranicza możliwość powstania ciągłego strukturalnego osłabienia konstrukcji. W przypadku betonowania od góry przebieg styku warstw był liniowy.
- Betonowanie od góry formy powodowało spadek nośności zespolenia warstw wraz ze wzrostem czasu opóźnienia podawania drugiej warstwy. Dla czasu opóźnienia 60 minut, spadek nośności wyniósł aż 40,5% w porównaniu do próbki monolitycznej. Wykazano również spadek nośności i sztywności połączenia pręt zbrojeniowy-beton. Dla czasów opóźnienia 15, 30 i 60 minut średni spadek naprężeń granicznych $[T_{max}]$ w stosunku do próbki monolitycznej wyniósł odpowiednio 8,4%, 6,8% i 19,5%. Dla naprężeń krytycznych $[T_{0,25}]$ stwierdzono zbliżone wartości spadku odpowiednio 5,7%, 3,6% i 17,2%. Utrata przyczepności pręt zbrojeniowy-beton następowała nagle przez rozłupanie otuliny betonowej na styku warstw.
- W przypadku wielowarstwowego układania betonu SCC od góry formy istnieje ryzyko powstania osłabienia wewnętrznej struktury konstrukcji w wyniku efektu sztywnienia mieszanki SCC pozostawionej w spoczynku. W przypadku dłuższych

ently, this can lead to a continuous structural deterioration of the structure.

4. Recommendations

The presence of a stiffening of the SCC mix when left at rest, may be crucial to the load-bearing capacity of the joint between successive layers when casting concrete mix according to international guidelines (3-5). The guidelines recommend the use of single-point casting technology for placing the concrete mixture until the formwork is completely filled or minimising the casting points. It was demonstrated that, in the case of concreting from above, the free flow of the mix over the first layer did not lead to sufficient liquefaction for extended delay times $[\geq 60 \text{ minutes}]$. Additionally, it was found that applying a second layer with a thickness significantly exceeding that recommended $[100 \text{ mm}]$ (15) was not adequate to achieve a shear effect between the two layers during a delay time of 60 minutes. Considering both the outcomes of this research and findings in the literature (13, 14, 16, 17), the recommendation is to place successive layers of SCC mix in beam and wall elements with a thickness of $\geq 100 \text{ mm}$, allowing a delay of up to 30 minutes. In cases of longer delays, it is advisable to limit the free flow of the mix over the previously laid layer. Additionally, it is recommended to superficially plasticize the previously cast mix before each new layer to enhance its bond with the freshly laid mix.

To entirely mitigate the adverse effects of multilayer concrete placement in beam and wall structures made of SCC, it is advisable to adopt the bottom-up placement technology. Based on conducted studies, this approach proves effective in achieving a joint load-bearing capacity of 90% of the strength attained during continuous mix placement, even with a delay of 60 minutes.

Furthermore, the course of the layer interface is irregular, and mixing of layers within the cross-section of the element occurs. This limits the potential for continuous structural impairment to develop. This finding holds particular significance for specialized structures requiring enhanced durability and reliability, such as retaining structures, bridges, and prestressed structures, etc. Moreover, studies (39) suggest that the bottom-up placement of SCC mixture yields a comprehensive enhancement in the bond between concrete and reinforcing bars, along with improvements in the structure of concrete itself.

5. Conclusions

The study investigating the impact of SCC casting technology on the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint and the rebar-to-concrete joint in layered elements provided intriguing results and observations.:

- The study revealed notable distinctions in the mixing pattern of SCC layers, contingent on the mix placing technology employed. Bottom-up casting exhibited an irregular course of the layer contact, accompanied by mixing within the cross-

przerw w betonowaniu zaleca się, aby wcześniej ułożona warstwa mieszanki była każdorazowo powierzchniowo uplastyczniona, co poprawi jej związanie z nowo ułożoną.

- Betonowanie od dołu formy zapewniło uzyskanie nośności zespolenia warstw betonu na poziomie 90% wytrzymałości próbki monolitycznej w całym zakresie badanych czasów opóźnień podawania drugiej warstwy. Technologia betonowania od dołu umożliwia całkowite wyeliminowanie negatywnych skutków wielowarstwowego układania mieszanek SCC i może być rekomendowana do wykonywania elementów belkowych i ściennych.

Badania mające na celu poprawę nośności zespolenia warstw betonu stanowią interesujący i ważny obszar badań. Autor sugeruje konieczność rozszerzenia badań w aspekcie: innych składów mieszanek samozagęszczalnych, prędkości układania oraz zróżnicowanych grubości warstw, w celu dokładnej weryfikacji wpływu technologii układania na nośność połączenia warstw betonu oraz pręt zbrojeniowy-beton.

Literatura / References

1. EN 13670: The Execution of Concrete Structures, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.
2. EN 206: Concrete - Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2016.
3. ACI 237 R-07: Self-Consolidating Concrete, American Concrete Institute, 2007.
4. EFNARC Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. European federation of specialist construction chemicals and concrete system, 2002.
5. RILEM TC 188-CSC, Casting of Self Compacting Concrete, A. Skarendahl, P. Billberg, RILEM Publications, 2006.
6. J. Szwabowski, J. Gołaszewski, Technologia betonu samozagęszczalnego, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.
7. C.M. Stolz, A.B. Masuero, D.T. Pagnussat, A.P. Kirchheim, Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars. *Constr. Build. Mater.*, **128**, 298–307 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.097>
8. E.N.B.S. Julio, F.A.B. Branco, V.D. Silva, Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. *Constr. Build. Mater.*, **18**(9), 675-681 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.023>
9. P.M.D. Santos, E.N.B.S. Julio, V.D. Silva, Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. *Constr. Build. Mater.*, **21**(8), 1688–1695 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.044>
10. H. Beushausen, B. Höhlig, M. Talotti, The influence of substrate moisture preparation on bond strength of concrete overlays and the microstructure of the OTZ. *Cem. Concr. Res.*, **92**, 84-91(2017). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.017>Get rights and content
11. Ł. Sadowski, A. Żak, J. Hoła, Multi-sensor evaluation of the concrete within the interlayer bond with regards to pull-off adhesion, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **18**(2), 573-582 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.09.008>

section of the element. This interlayer bonding diminishes the likelihood of continuous structural deterioration. Conversely, in top-down concreting the course of the interface between the layers was linear.

- Concreting from the top of the mould resulted in a progressive reduction in the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint with an increasing delay time for the second layer. The load-bearing capacity decreased by 40.5% compared to the monolithic specimen when the delay time was 60 minutes. Furthermore, a decline in both the load-bearing capacity and stiffness of the rebar-to-concrete bond was observed. For delay times of 15, 30, and 60 minutes, the average reduction in ultimate bond stress [T_{max}] relative to the monolithic specimen was 8.4%, 6.8%, and 19.5%, respectively. Similarly, for the critical bond stress [$T_{0.25}$] comparable decreases of 5.7%, 3.6%, and 17.2% were found, respectively. The loss of rebar-to-concrete bond occurred abruptly through the splitting of the concrete cover at the interface of the layers.
- When placing SCC mix in multiple layers from the top of the form, there is a risk of internal structural impairment due to the stiffening effect of the SCC mix left at rest. In instances of extended pauses in concrete placement, it is advisable to superficially plasticize the previously placed layer of the mix each time to enhance its bond with the newly placed one.
- Bottom-up casting of SCC ensured that the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint maintained 90% of the strength of the monolithic specimen across all tested ranges of second layer placing delay times. The bottom-up casting technology offers complete mitigation of the adverse effects associated with multilayer placement of SCC mixtures and is thus recommended for the construction of beam and wall elements.

Research aimed at enhancing the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer joint represents a noteworthy and crucial area of study. The author recommends further exploration into aspects such as different compositions of self-compacting mixtures, varying placement speeds, and layer thicknesses to precisely ascertain the impact of placement technology on the load-bearing capacity of the concrete layer-to-layer and rebar-to-concrete joint.

12. Ł. Sadowski, *Adhesion in Layered Cement Composites*, Springer Nature Switzerland 2019.
13. P. Dybel, M. Kucharska, Effect of multilayer casting technology of self-compacting concrete slabs on the load-bearing capacity of a layer-to-layer joint. *J. Build. Eng.*, **64**, 1-11 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105655>
14. P. Dybel, M. Kucharska, Effect of Placement Technology on the Bond Strength between Two Layers of Self-Compacting Concrete. *Materials*, **13**, (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13153330>
15. N. Roussel, F. Cussigh, Distinct-Layer Casting of SCC: The Mechanical Consequences of Thixotropy. *Cem. Concr. Res.*, **38**, 624–632 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.023>
16. W.A. Megid, K.H. Khayat, Bond Strength in Multilayer Casting of Self-Consolidating Concrete. *ACI Struct. J.*, **114**, 467–476 (2017). <https://doi.org/10.14359/51689597>
17. W.A. Megid, K.H. Khayat, Effect of Structural Buildup at Rest of Self-Consolidating Concrete on Mechanical and Transport Properties of Multilayer Casting. *Constr. Build. Mat.*, **196**, 626–636 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.112>
18. I. Navarrete, M. Lopez, Y. Kurama, Multi-Layer Casting of Self-Consolidating Concrete: Influence of Mortar Rheology and Casting Parameters on the Inter-Layer Bond Strength. *Construction and Building Materials*, **303**, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124492>
19. A.A. Shirzadi Javid, P. Ghoddousi, G. Ghodrati Amiri, K.A. Donyadi-deh, A New Photogrammetry Method to Study the Relationship between Thixotropy and Bond Strength of Multi-Layers Casting of Self-Consolidating Concrete. *Constr. Build. Mat.*, **204**, 530–540 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.204>
20. J.J. Assaad, Y. Daou, Bonding Agents to Mitigate Interfacial Strength Loss during Multi-Layer Concrete Casting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, **174**, 195–205 (2021). <https://doi.org/10.1680/jcoma.18.00077>
21. L.N. Thrane, C.V. Nielsen, C. Pade, *Guidelines for Execution of SCC*, Danish Technological Institute, Concrete Centre, Taastrup, 2008.
22. S. Tichko, G. De Schutter, P. Troch, J. Vierendeels, R. Verhoeven, K. Lesage, N. Cauberg, Influence of the viscosity of self-compacting concrete and the presence of rebars on the formwork pressure while filling bottom-up, *Eng. Struct.*, **101**, 698–714 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.008>
23. EN 12620: *Aggregates for Concrete*, Belgium, 2010.
24. G. De Schutter, P.J.M. Bartos, P. Domone, *Self-Compacting Concrete*, Whittles Publishing, Dunbeath, 2008.
25. 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.
26. EN 10080: *Steel for the Reinforcement of Concrete*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.
27. EN 12350-8: *Testing fresh concrete, Part 8: Self-compacting concrete — Slump-flow test*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.
28. EN 12350-10: *Testing fresh concrete, Part 10: Self-compacting concrete — L-box test*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.
29. ASTM International *ASTM C1611: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*, 2018.
30. EN 12390-3: *Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009.
31. EN 12390-6: *Testing Hardened Concrete. Tensile Splitting Strength of Test Specimens*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009.
32. The Self-Compacting Concrete European Project Group *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, 2005.
33. ACI 318-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2005.
34. M. Valcuende, C. Parra, Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes. *Constr. Build. Mater.*, **23**, 162–170 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.007>
35. 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. *Constr. Build. Mater.*, **24**, 520–530 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.007>
36. Task group bond model. *Bond of Reinforcement in Concrete: State-of-the-Art Report; Bulletin 10 (fib Fédération internationale du béton); International Federation for Structural Concrete: Lausanne, Switzerland, 2000.*
37. F. Moccia, M. Fernández Ruiz, G. Metelli, A. Muttoni, G. Plizzari, Casting position effects on bond performance of reinforcement bars. *Struct. Concr.*, **22**, 1612–1632 (2021). <https://doi.org/10.1002/suco.202000572>
38. K. Lundgren, Bond between ribbed bars and concrete. Part 1: Modified model. *Mag. Concr. Res.*, **57**, 371–382 (2005). <https://doi.org/10.1680/mac.2005.57.7.371>
39. P. Dybel, Effect of bottom-up placing of self-compacting concrete on microstructure of rebar-concrete interface. *Constr. Build. Mater.*, **299**, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124359>