

mgr inż. Jakub Zajac^{1*)}

ORCID: 0000-0001-6080-2994

prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec¹⁾

ORCID: 0000-0001-9825-6343

mgr inż. Krzysztof Grzyb¹⁾

ORCID: 0000-0001-9039-5015

dr inż. Artur Kisiołek²⁾

ORCID: 0000-0002-8815-6776

Wpływ przekroju poprzecznego styku nadbetonu i prefabrykatu na pracę statyczną belek zespolonych

The influence of the precast and overtopping cross-section joint on the static behaviour of composite concrete beams

DOI: 10.15199/33.2022.04.07

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań zespolonych elementów belkowych. Głównym celem analiz było określenie wpływu kształtu przekroju poprzecznego styku na pracę statyczną układu zespolonego. Rozważano pełne zespolenie styku beton-beton oraz styku, w którym zastosowano środek antyadhezyjny. Badania zasadnicze, które dotyczyły belek o złożonym przekroju styku, poprzedzono testami na elementach o przekroju prostokątnym i o płaskiej powierzchni zespolenia. Udowodniono eksperymentalnie, że belka składająca się z prefabrykatu w kształcie żebra z powierzchnią zespolenia pozbawioną adhezji pracowała od początku badania jako częściowo zespolona. Sztywność na zginanie elementu bez pełnego zespolenia była przed wystąpieniem pierwszej rysy pionowej o 14,9% mniejsza niż belki w pełni zespolonej. W obu belkach doszło do połączenia rysowań pionowych z rysami w styku. Belki utraciły nośność ze względu na zmiążdżenie strefy ściskanej nadbetonu.

Słowa kluczowe: belki zespolone; belki sprężone; zespolenie; zarysowania; praca statyczna.

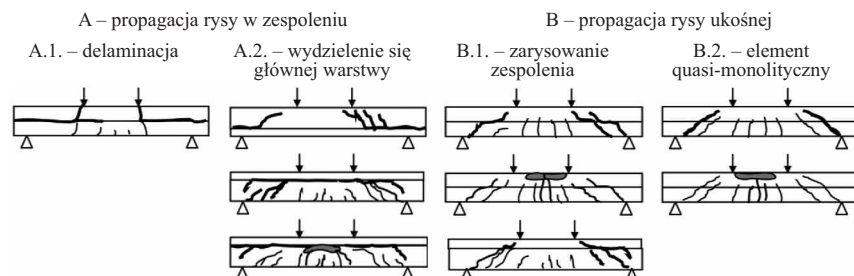
Abstract. The article presents a study of composite prestressed beams. The scope of the research is to determine the influence of the shape of the interface cross-section joint on the static work of the beams. The elements were divided into beams with a natural joint surface and broken adhesion in contact. Preliminary tests were done on the beams with a rectangular cross-section and a flat interface surface. The leading research focused on beams with complex cross-sections. It has been proven experimentally the beam, made of a rib-shaped precast element with broken adhesion, worked as partially composite from the beginning of the test. Before the first vertical crack occurred, the bending stiffness of the element with a broke adhesion interface was 14.9% lower than that of a fully bonded beam. In both beams, vertical cracks connect with cracks in the interface. Beams load capacity were achieved due to the crushing of the compression zone of the concrete overlay.

Keywords: composite concrete beams; prestressed beams; interface; crack; static behaviour.

Badania doświadczalne zespolenia beton-beton lub stal-beton dotyczą głównie zjawiska redystrybucji sił wewnętrznych w połączeniu elementu głównego z nadbetonem w warunkach obciążeń doraźnych. Dobrze rozpoznano zachowanie się sprężonych płyt kanałowych (typu HC), w których powierzchnia zespolenia w całości znajduje się w jednym poziomie [1 ÷ 4]. Bardziej złożone analizy prowadzono w przypadku styków belek sprężonych o falistym średniku [5]. Testy eksperymentalne pozwoliły na określenie współczynnika powierzchniowego tarcia μ , którego średnia wartość wyniosła 2,66, czyli zdecydowanie więcej niż podana w normie EC-2 w przypadku powierzchni szorstkiej ($\mu = 0,70$). Bada-

nia, analizy teoretyczne i numeryczne przedstawione w [6 ÷ 9] wykazały, że nie można rozdzielać Stanu Granicznego Nośności z uwagi na zespolenie styku od Stanu Granicznego Nośności z uwagi na ścinanie. Wspomniane rozważania dotyczyły badania zespolenia w ramach jednej płaszczyzny (stosowano belki prostokątne i teowe), zmieniając stopień zbrojenia zsiwywającego i adhezji w styku. Efektem badań było określenie mechanizmów zniszczenia w zależności

od ilości zbrojenia w styku oraz lokalizacji płaszczyzny zespolenia w elemencie (rysunek 1). Najbardziej efektywny był mechanizm B2, ale dopuszczono możliwość takiego projektowania, aby belka zniszczyła się zgodnie z mechanizmem B1. Sformułowano obliczeniowy warunek zniszczenia belki zespolonej zgodnie z modelem B. Jest nim powstanie rysy ukośnej przy mniejszym obciążeniu, niż obciążenie powodujące zarysowanie styku.



Rys. 1. Klasyfikacja mechanizmów zniszczenia belki zespolonej [9]
Fig. 1. Classification of failure mechanisms of composite concrete beams [9]

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

²⁾ Wielkopolska Wyższa Szkoła Społeczno-Ekonomiczna; Wydział Ekonomiczny

*) Adres do korespondencji: jakub.zajac@polsl.pl

W [10] potwierdzono możliwość uzyskania nośności elementów bez zespolonego styku, jak w elementach w pełni zespolonych wyłącznie na skutek zakotwienia zbrojenia rozciąganego w nadbetonie. Badania opisane w [11] dotyczyły cyklicznego lub dynamicznego obciążania badanych elementów w celu predykcji amplitudy przemieszczeń przy delaminacji. Zachowanie się elementów o złożonym kształcie powierzchni zespolenia jest słabo rozpoznane, a literatura przedmiotu obejmuje pojedyncze prace, np. opisane w [12] dotyczące badania kształtu styku belki stalowej z nadbetonem, przedstawiające nową koncepcję zespolenia bazującą na zastosowaniu stalowej pionowej blachy będącej przedłużeniem środnika w nadbetonie (model 1). Taki element o powierzchni z wrębami pozwalał na uzyskanie ponad dwukrotnie większej nośności przy kilkakrotnie zwiększonej sztywności zespolenia. Dodatkowo połączenie miało dużą nośność po osiągnięciu maksymalnej siły, kiedy element uległ już zarysowaniu (rysunki 2 i 3). Efekt taki uzyskano na skutek działania mechanizmu wzajemnego docisku generowanego przez element z wrębami, który był blokowany przed poślizgiem podłużnym dzięki

oddziaływaniu nadbetonu (ma on ograniczone możliwości odkształcenia poziomego). Prowadziło to do zwiększenia tarcia (zazębienia się), często pomijanego w przypadku analizy styków poziomych.

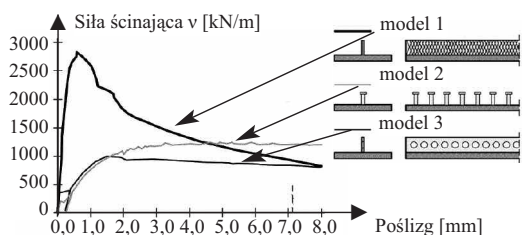
Ze względu na brak dostatecznej znajomości pracy elementów o złożonym kształcie zespolenia autorzy rozpoczęli serię badań sześćdziesięciu elementów belkowych o przekroju zbliżonym do teowego wykonanych w technologii betonu sprężonego. W celu prawidłowego przygotowania styku oraz doboru aparatury pomiarowej poprzedzono je wstępnymi testami na elementach o przekroju prostokątnym i płaskiej powierzchni zespolenia.

Badania

Głównym celem badań było określenie wpływu kształtu elementu prefabrykowanego na pracę statyczną układu zespolonego, w szczególności pracę układu zespolonego po pozabawieniu adhezji oraz czy element nadal pracuje jako zespolony na skutek wzajemnego docisku nadbetonu do prefabrykatu. Badania prowadzono na belkach sprężonych w dwóch wariantach przygotowania powierzchni zespolenia. W pierwszym z nich powierzchnia była nieobrobiona (szorstka), w drugim zaś w płaszczyźnie zespolenia zastosowano środek antyadhezyjny. Dodatkowo wykonano test belki z płaską powierzchnią zespolenia przy ograniczonej szerokości złącza wynoszącej 60 mm.

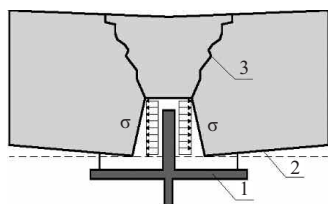
Budowa stanowiska badawczego. Badania wstępne przeprowadzono na sprężonych belkach o szerokości i wysokości 120 mm, z warstwą nadbetonu grubości 40 mm (rysunek 4). Belki wykonano z betonu klasy C40/50, zbrojenie sprężające składało się z trzech splotów 7-drutowych

Ø6,85 mm (1 x Ø2,24 mm + 6 x Ø2,40 mm) ze stali Y2060S7, umieszczonych zgodnie z rysunkiem 4a. Górna powierzchnia belki B1.1.C była nieobrobiona (szorstka). Badany element B3.2.P miał powierzchnię styku ograniczoną do połowy szerokości. Ponadto zastosowano przekładkę z maty PVC niwelującą tarcie. W belce B4.1.O gładką górną powierzchnię zespolenia pokryto środkiem antyadhezyjnym. Badania przeprowadzono w próbie czteropunktowego zginania, z wykorzystaniem stalowego trawersu przekazującego obciążenie w odległości 400 mm od krawędzi podpory (rysunek 5). W przypadku badania głównego stosowano sprężone belki żebrowe o szerokości 200 mm oraz wysokości 120 mm, z warstwą nadbetonu o grubości 45 mm, wykonane z betonu C40/50. Zbrojenie sprężające składało się z czterech splotów 7-drutowych Ø6,85 mm (1 x Ø2,24 mm + 6 x Ø2,40 mm) ze stali Y2060S7, umieszczonych zgodnie z rysunkiem 4b. Powierzchnię styku przygotowano analogicznie jak w belkach do badań wstępnych, gdzie Z1.1.C oznacza belkę w pełni zespoloną, a Z2.1.AB belkę z powierzchnią pozbawioną adhezji. Powierzchnię żeber badanych elementów można sklasyfikować jako szorstką. Badania przeprowadzono w próbie czteropunktowego zginania, z wykorzystaniem trawersu przekazującego obciążenie w odległości 350 mm od krawędzi podpory (rysunek 6). Belki ustawiono z zachowaniem 500 mm odcinka, na długości którego weryfikowano przesunięcie poziome nadbetonu. Odcinek ten stanowił długość zakotwienia siły sprężającej, zapewniając jednocześnie prawidłowe przekazanie sił sprężających. Badanie zaprojektowano w taki sposób, aby możliwa była obserwacja najpierw rysy poziomej wynikającej z utraty zespolenia.



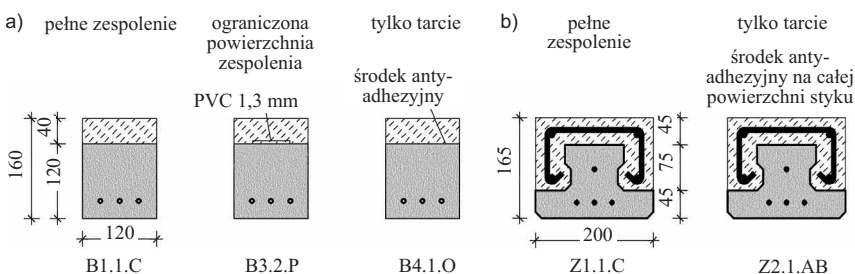
Rys. 2. Porównanie różnych typów zespolenia belki stalowej z nadbetonem: 1 – blacha z wrębami; 2 – bolce nelsona; 3 – blacha perforowana [12]

Fig. 2. Comparison between different connection types of steel beam with a concrete topping: 1 – plate with friction; 2 – headed studs; 3 – perfobond [12]



Rys. 3. Mechanizm niszczenia zespolenia modelu nr 1 – zarysowanie po osiągnięciu siły maksymalnej: 1 – profil stalowy; 2 – nadbeton; 3 – rysa

Fig. 3. Interface failure – post-peak configuration for model no. 1: 1 – steel profile; 2 – overtopping; 3 – crack



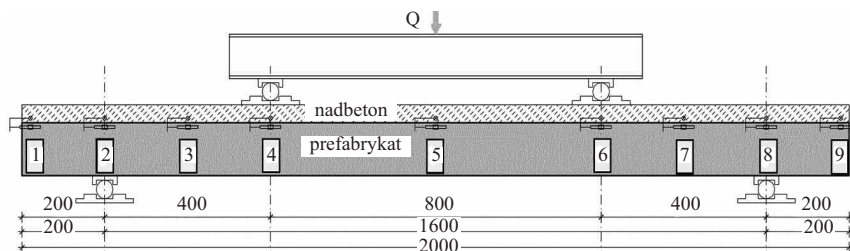
Rys. 4. Badane elementy: a) belki o płaskiej powierzchni styku; b) belki o przekroju zbliżonym do teowego

Fig. 4. Tested elements: a) beams with a flat interface, b) beams with a complex interface cross-section

Przesunięcia poziome styku były rejestrowane za pomocą transformatorowych przetworników przemieszczeń liniowych (LVDT) typu PJX-10 o dokładności wskazań 0,002 mm. Czujniki mocowano do warstwy nadbetonu na styku z elementami prefabrykowanymi (rysunki 5 i 6). Na powierzchni dolnej

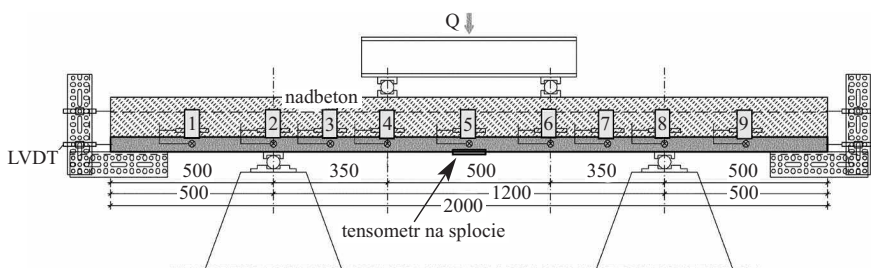
Wyniki badań doświadczalnych

Belki o płaskiej powierzchni zespolenia. Badania belek o płaskiej powierzchni styku położonej w górnej części przekroju, bez zbrojenia zszywającego, prowadzono do momentu uzyskania maksymalnej siły lub rozwarstwienia. Na



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego belek B1.1.C, B3.1.P oraz B4.1.O wraz z rozmieszczeniem czujników LVDT

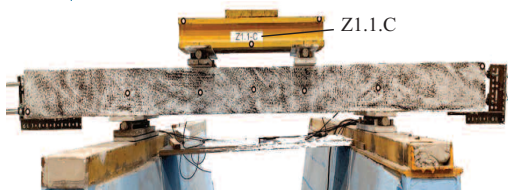
Fig. 5. Research stand model of the B1.1.C, B3.1.P and B4.1.O beams with the location of the LVDT sensors



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego belek Z1.1.C oraz Z2.1.AB wraz z rozmieszczeniem czujników LVDT

Fig. 6. Research stand model of the Z1.1.C and Z2.1.AB beams with the location of the LVDT sensors

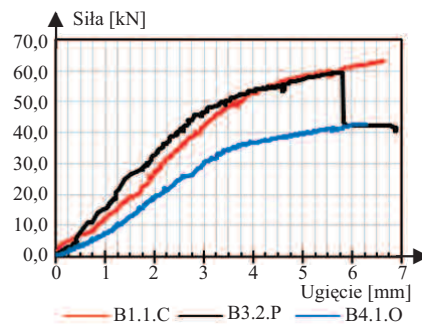
montowano stały punkt odniesienia zamocowany w osi czujnika. Dodatkowe czujniki LVDT założono na końcach badanego elementu w celu pomiaru przemieszczenia splotów sprężających. Efekt wsunięcia zbrojenia był tożsamy z utratą pełnego zakotwienia. Na fotografii 1 pokazano stanowisko badawcze z przygotowaną powierzchnią czołową elementu. Odpowiednie malowanie zapewniało pomiar odkształceń elementu z wykorzystaniem systemu ARAMIS służącego do cyfrowej korelacji obrazu (DIC).



Fot. 1. Stanowisko badawcze belek Z1.1.C z powierzchnią do pomiarów DIC

Photo 1. Research stand model of the Z1.1.C beam with the surface for DIC measurements

rysunku 7 przedstawiono zależność ugięcia belek od przyłożonego obciążenia. Największą nośność uzyskano w przypadku belki B1.1.C i siły równej 63,2 kN oraz przemieszczenia pionowego 6,62 mm. Belka nie uległa rozwarstwieniu aż do zniszczenia. W przypadku belki B3.2.P uzyskano maksymalną siłę 59,5 kN, przy której nastąpiła utrata nośności styku prowadząca do rozwarstwienia na połowie długości belki. Na skutek spadku sztywności elementu przemieszczenie zwiększyło się do 6,7 mm, a maksymalna siła wyniosła 42,5 kN. Wartości te były zgodne z wynikami uzyskanymi w przypadku elementu B4.1.O. Przed przystąpieniem do badania, nadbeton odspoił się od sprężonego prefabrykatu na skutek skurczu. Belka ta pracowała wyłącznie w części pre-

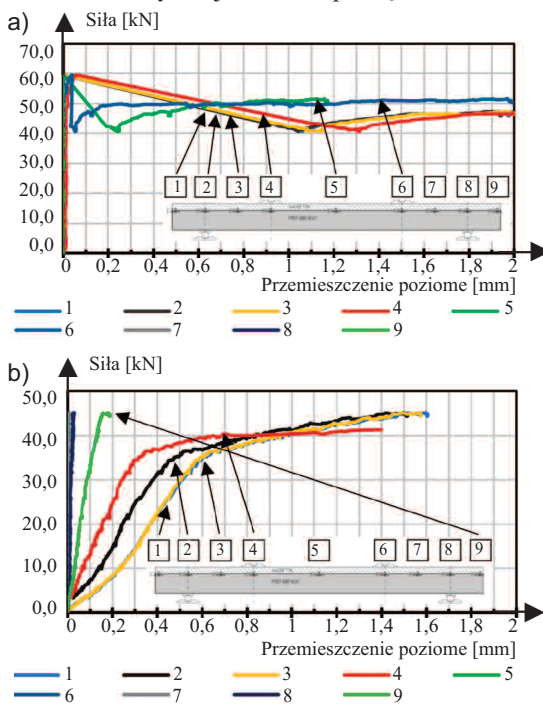


Rys. 7. Ugięcie belek z płaską powierzchnią styku

Fig. 7. Deflection of the beams with flat interface joint

fabrykowanej. W takim wypadku niezespólony nadbeton nie powodował zwiększenia nośności, a stanowił wyłącznie dodatkowe obciążenie prefabrykatu.

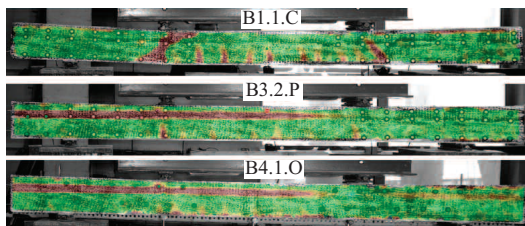
W pełnym zakresie zadanego obciążenia belki B1.1.C nie wykazano przemieszczenia poziomego w płaszczyźnie styku. W przypadku belki z przewężoną powierzchnią zespolenia pomiary również nie wykazały przemieszczeń styku, aż do osiągnięcia siły rozwarstwiającej (rysunek 8). Na skutek utraty nośności styku nastąpił gwałtowny (w czasie krótszym niż 0,5 s) przyrost przemieszczeń poziomych do $0,2 \div 1,3$ mm w punktach od 1 do 6. W przypadku belki z powierzchnią pozbawioną adhezji pomiary czujników od początku badania



Rys. 8. Przemieszczenie w styku: a) belka B3.2.P; b) belka B4.1.O

Fig. 8. Interface slip in joint: a) beam B3.2.P; b) beam B4.1.O

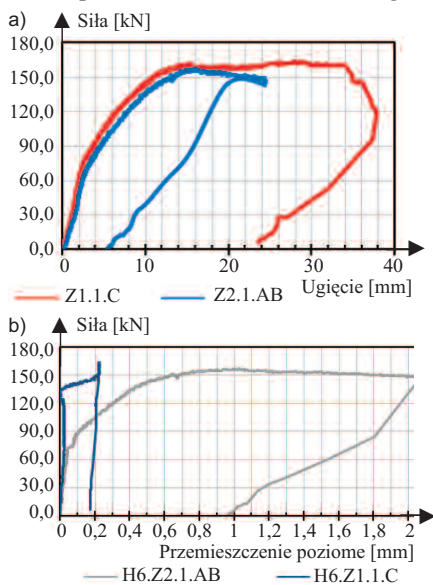
wykazywały stopniowe zwiększenie przemieszczeń poziomych, które w zależności od punktu pomiarowego wynosiły $1,2 \div 1,7$ mm. Przemieszczenia te następowały w jednym kierunku na całej długości styku. Obszary zarysowane na skutek zginania oraz ścinania przedstawiono na fotografii 2 jako mapy odkształceń. Analiza danych pozyskanych z systemu cyfrowej korelacji obrazu



Fot. 2. Morfologia uszkodzeń belek z płaską powierzchnią styku w przypadku maksymalnej siły obciążającej
Photo 2. Crack morphology of beams with a flat contact surface of joint at maximum loading force

umożliwiła zidentyfikowanie poślizgu (wzajemnego przemieszczenia w styku) w miejscu czujników nr 5, 7 oraz 8. Efekt ten nie został zarejestrowany przez czujniki przemieszczeń na przeciwnym boku elementu (rysunek 8b).

Belki o złożonej powierzchni zespolenia. Na rysunku 9 przedstawiono zależność ugięcia belek od obciążenia. Badania prowadzono aż do znacznego

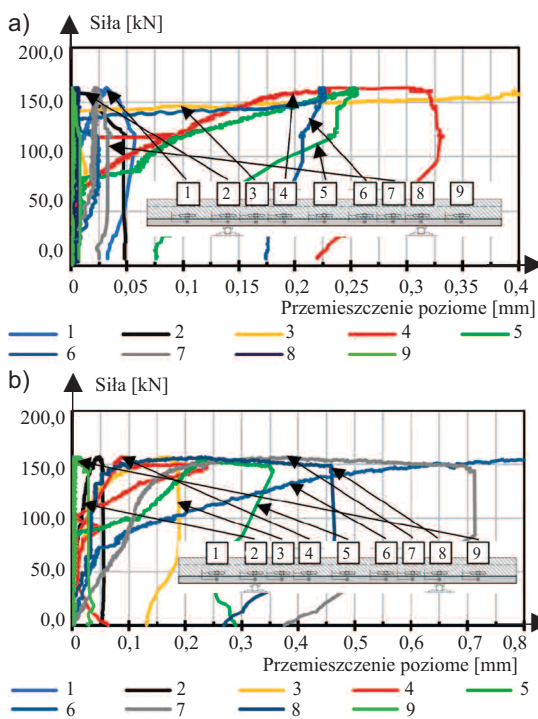


Rys. 9. Wyniki badania belek ze złożoną powierzchnią styku: a) ugięcie belek Z1.1.C oraz Z2.1.AB; b) wzajemne przemieszczenie w styku w przypadku punktu nr 6 w belkach Z1.1.C oraz Z2.1.AB

Fig. 9. Research results of beams with a complex-shaped interface joint: a) deflection of beams Z1.1.C and Z2.1.AB; b) interface slip in joint at point 6 for beams Z1.1.C and Z2.1.AB

spadku siły przy narastającym przemieszczeniu. W przypadku belki Z1.1.C oznaczało to powstanie rysy dominującej od zginania, natomiast w belce Z2.1.AB rysy dominującej od zginania w bezpośrednim sąsiedztwie rysy w styku oraz rysy ukośnej w nadbetonie. Największą siłę (nośność) uzyskano w przypadku belki Z1.1.C (163,6 kN przy ugięciu 29,1 mm).

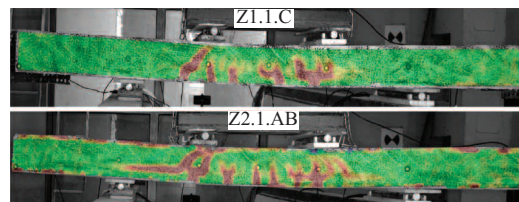
Na podstawie pomiarów w punkcie nr 4 oraz 5 zarysowanie styku wystąpiło przy sile 80,3 kN (rysunek 10), a przy sile 140,2 kN w przypadku punktu nr 6, 143,6 kN – punktu nr 3 oraz 163,6 kN – punktów nr 1, 2 i 7. W punktach pomiarowych nr 8 oraz 9 nie zarejestrowano zarysowania styku. W przypadku belki Z2.1.AB największa przyłożona siła wynosiła 157,3 kN,



Rys. 10. Zależność przemieszczenia od siły: a) belka Z1.1.C; b) belka Z2.1.AB

Fig. 10. Force dependence of displacement: a) beam Z1.1.C; b) beam Z2.1.AB

co odpowiadało jej ugięciu o wartości 16,06 mm. Następnie doszło do systematycznego przyrostu ugięcia, powiązanego ze zmniejszeniem siły. Badanie belki Z2.1.AB zakończono w przypadku siły wynoszącej 146,8 kN i ugięciu elementu 24,4 mm. Od początku badania pomiary czujników nr 7 i 8 nie wykazały przemieszczenia w styku. Były to miejsca



Fot. 3. Morfologia uszkodzeń belek z złożoną powierzchnią styku w przypadku maksymalnej siły obciążającej

Photo 3. Crack morphology of beams with a complex shaped interface of joint at maximum loading force

występowania największych sił tnących, generujących największe naprężenia styczne. Przy obciążeniu $73,8 \div 83,9$ kN przemieszczenia styku pojawiały się w miejscu czujników nr 2, 3, 4, 5, 6, a w przypadku 154,5 kN – czujnika nr 9. Tylko czujnik w punkcie nr 1 nie wskazał na zarysowanie styku, a nr 2 oraz 9 odnotowały przemieszczenie w styku mniejsze niż 0,05 mm. Mapy odkształceń przy maksymalnej przyłożonej sile pionowej przedstawiono na fotografii 3.

Analiza wyników

Badania wstępne belek z płaskim stykiem potwierdziły możliwość całkowitego usunięcia adhezji dzięki zastosowaniu środków antyadhezyjnych. Element B4.1.O pracował jako niezespolony z nadbetonem pełniąc jedynie rolę obciążenia. Podczas badania przyrost przemieszczeń w styku był proporcjonalny do przemieszczenia elementu pionowego (ugięcia). Zgodnie z przewidywaniami największe przemieszczenia odnotowano na jednym z końców belki, przy którym utracono pełne zespolenie elementów na skutek oddziaływania siły poprzecznej.

Belka B3.2.P z ograniczoną o połowę szerokością styku pracowała w początkowej fazie jako element zespolony, a po zarysowaniu styku jak belka B4.1.O. Po utracie zespolenia, ugięcia zwiększyły się jak w przypadku belki bez adhezji. Belka o nieobrobionej powierzchni styku pracowała w całym zakresie obciążenia jak element monolityczny, a zniszczenie nastąpiło na skutek zmiążdżenia strefy ści-

skanej w nadbetonie. Pierwsze zarysowania pionowe w belkach Z1.1.C oraz Z2.1.AB zaobserwowano przy sile ponad 60 kN. W tabeli przedstawiono sztywność belek w przypadku siły równej 60 kN. Była to największa wartość, przy której nie zaobserwowano rys pionowych (zarówno w ocenie makroskopowej elementu, jak również z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu). Sztywność początkowa belki z usuniętą adhezją w styku była o 14,9% mniejsza niż elementu o nieobrobionej powierzchni styku.

Porównanie sztywności belek o złożonym przekroju zespolenia przy 60 kN

Comparison of the stiffness of beams with a complex shape interface cross-section at 60 kN

Belka	Przemieszczenie [mm]	Sztywność giętą [kN/m]
Z1.1.C	2,01	29850,8
Z4.1.AB	2,36	25423,8

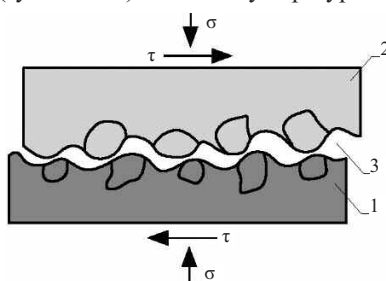
W belce Z4.1.AB od początku badania odnotowywano przyrost przemieszczeń w styku w punkcie pomiarowym nr 7 i 8. Przemieszczenie uzyskane w przypadku pozostałych punktów wynosiło do 0,8 mm w momencie osiągnięcia maksymalnej siły. Wyniki te są zgodne z rezultatami uzyskanymi w pracy [12], w której największa siła ścinająca (w badaniu bezpośredniego ścinania) została osiągnięta przy wartości 1,0 mm. Belkę Z4.1.AB można uznać za element częściowo zespolony, w którym mała sztywność wynika z poślizgu warstw względem siebie. Na podstawie wyników przemieszczeń poziomych w analogicznych elementach i punktach pomiarowych (H2-Z1.1.C, H3-Z1.1.C oraz H7-Z4.1.AB i H6-Z4.1.AB) można stwierdzić, że w elemencie Z1.1.C doszło lokalnie do pozbawienia adhezji i następnie pracy styku w fazie II – kohezyjnej. W obu przypadkach nie osiągnięto maksymalnej nośności zespolenia. Zniszczenie nastąpiło na skutek zmiażdżenia strefy ściskanej w nadbetonie. Elementy po zarysowaniu styku pracowały jako belki częściowo zespolone.

Podsumowanie

Badania pozwoliły na określenie pracy elementów bez zbrojonego styku w fazie II po zarysowaniu zespolenia. W obu belkach doszło do połączenia zarysowań pionowych z rysami w styku, co potwierdza wnioski płynące z badań

zespołu prof. A. Halickiej [9], również w przypadku elementów o złożonym kształcie przekroju poprzecznego styku. Podstawową różnicę stanowi brak zbrojenia zszywającego, przejmującego siły wewnętrzne po zarysowaniu. Złożoność przekroju styku badanych elementów umożliwiła redystrybucję sił wewnętrznych. Wyniki badań belki z powierzchnią pozbawioną adhezji sugerują, że nośność zespolenia na skutek wyłącznie tarcia pozwala na uwzględnienie pracy elementu jako częściowo zespolonego. Nośność styku, powstała na skutek tarcia wywołanego częściowo ograniczonymi odkształceniami, pozostała na poziomie wystarczającym do osiągnięcia maksymalnej nośności na zginanie.

Zarysowanie styku określa moment utraty pełnego zespolenia elementów. W analizowanym przypadku złożonych przekrojów zespolenia – siła rysująca styk nie musi być równoznaczna z nośnością styku. Styk nadal zapewnia częściowe zespolenie elementów dzięki tarcii pomiędzy prefabrykatem a nadbetonem. Belki utraciły nośność ze względu na zmiażdżenie strefy ściskanej, a nie utratę zespolenia w płaszczyźnie styku. Mechanizm pracy styku w fazie II jest dobrze rozpoznany w przypadku powierzchni poziomych, w których nośność kohezyjna determinowana jest przez współczynnik tarcia oraz zewnętrzne obciążenie generujące docisk (rysunek 11). W badanym przypadku



Rys. 11. Mechanizm ząbienia się kruszywa: 1 – beton starszy; 2 – nadbeton; 3 – zerwanie adhezji

Fig. 11. Mechanism of aggregate interlocking: 1) – concrete; 2 – concrete overlay; 3 – break of adhesion

mechanizm ten występuje we wszystkich powierzchniach styku, z tą różnicą, że naprężenia dociskowe powstają na skutek braku swobody odkształceń wzajemnie położonych powierzchni. Powierzchnie skośne główki oraz stopki blokują możliwość swobodnego odspojenia nadbetonu, jak ma to miejsce w elementach o płaskim styku. Do dalszych rozważań będą brane pod uwagę zagadnienia dotyczące określenia nośności styku w przypadku ograniczenia odkształceń poziomych elementu (warunki odpowiadające pracy przestrzennej w konstrukcji). Przewidywany cykl kolejnych badań obejmie analizy eksperymentalne prowadzone na trzydziestu elementach belkowych w schemacie czteropunktowego zginania oraz bezpośredniego ścinania.

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A, Węglorz M, Kliszczewicz A. Experimental study on effectiveness of interaction between pre-tensioned hollow-core slabs and concrete topping. *Architecture Civil Engineering Environment*. 2008; 1, 1: 57 – 66.
- [2] Mones RM, Breña SF. Hollow-core slabs with cast-in-place concrete toppings: A study of interfacial shear strength. *PCI Journal*. 2013; 58, 1: 124 – 141. doi: 10.15554/pci.06012013.124.141.
- [3] Adawi A, Youssef MA, Meshaly ME. Experimental investigation of the composite action between hollow-core slabs with machine-cast finish and concrete topping. *Engineering Structures*. 2015; 91: 1 – 15. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.02.018.
- [4] Derkowski W, Surma M. Composite Action of Precast Hollow Core Slabs With Structural Topping. *Technical Transactions*. 2015; 3-B: 15 – 29. doi: 10.4467/2353737XCT.15.159.4334.
- [5] Derkowski W, Surma M. Pretensioned beam-and-block floor systems – real scale tests. *Technical Transactions*. *Civil Engineering*. 2012; 109: 35 – 49.
- [6] Halicka A. Analysis of support zones in composite concrete beams using MCFT. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2006; 6, 4: 49 – 66. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60275-1.
- [7] Halicka A, Jabłoński Ł. Shear failure mechanism of composite concrete T-shaped beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*. 2016; 169, 1: 67 – 75. doi: 10.1680/stbu.14.00127.
- [8] Jabłoński Ł, Halicka A. Influence of surface based cohesive parameters on static performance of concrete composite T-shaped beams. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 262: 08003. doi: 10.1051/mateconf/201926208003.
- [9] Halicka A. Influence new-to-old concrete interface qualities on the behaviour of support zones of composite concrete beams. *Construction and Building Materials*. 2011; 25, 10: 4072 – 4078. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.045.
- [10] Gromysz K. Distribution of Forces in Composite Concrete Slabs Between the Joint and the Reinforcement Anchored on the Support. *Procedia Engineering*. 2013; 65: 206 – 211. doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.031.
- [11] Gromysz K. Verification of the Damping Model Vibrations of Reinforced Concrete Composite Slabs. *Procedia Engineering*. 2013; 57: 372 – 381. doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.049.
- [12] Lebet JP. New Steel-Concrete Shear Connection for Composite Bridges. *Composite Construction in Steel and Concrete VI – Proceedings of the 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference*. 2011; pp. 65 – 77. doi: 10.1061/41142(396)6.

Przyjęto do druku: 11.04.2022 r.