

Badania betonowych elementów sprężonych zespolonych z nadbetonem

Tests of prestressed concrete elements combined with concrete topping

mgr inż. Jakub Zając (ORCID: 0000-0001-6080-2994), prof. dr hab. inż. Łukasz Drobiec (ORCID: 0000-0001-9825-6343), mgr inż. Krzysztof Grzyb (ORCID: 0000-0001-9039-5015), Politechnika Śląska

DOI 10.5604/01.3001.0053.8504

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania rozwarstwienia prefabrykowanych sprężonych belek betonowych. Głównym celem programu badań jest określenie wpływu kształtu zespolenia na zachowanie się belek zespolonych. Zbadano żebrowe prefabrykowane belki sprężone z pełnym zespoleniem, zerwaną adhezją i zerwaną adhezją oraz tarcie. Pomiary z wykorzystaniem technologii cyfrowej korelacji obrazu (DIC) wraz z analizą charakterystyki siła-przemieszczenie wykazały decydujący wpływ długości rozwarstwienia na pracę elementu. Powstawanie lokalnego poślizgu w płaszczyźnie zespolenia związane było z propagacją zarysowań giętnych i ukośnych. Zarysowanie dochodzące do strefy podparcia należy uznać za moment rozwarstwienia elementu zespolonego.

Słowa kluczowe: prefabrykacja, beton sprężony, zespolenie, nadbeton, zarysowanie, MES.

Abstract: The article presents a study of the interface behavior of precast pre-stressed composite beams. The main objective of the research program is to determine the influence of the interface's shape on the composite element's behavior. The rib-shaped precast prestressed beams with full bond, broken adhesion and broken contact were tested. DIC measurements with force-displacement relations analysis showed a crucial impact of cracking length on element performance. The formation of the local slip of the interface was related to the propagation of flexural and shear cracks. The crack reaching the support zone should be considered the moment of debonding of the composite element.

Keywords: prefabrication; prestressed concrete; anastomosis; topping concrete; scratch; MES.

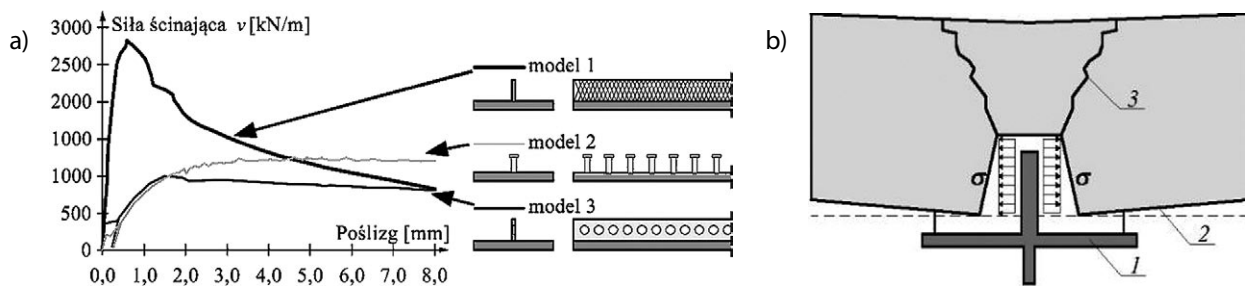
1. Wprowadzenie

Wiele wykonywanych badań doświadczalnych dotyczących zespolenia beton-beton lub stal-beton dotyczy głównie parametrów materiałowych połączenia. W tym zakresie prowadzono szereg eksperymentów na próbkach walcowych typu slant-shear (ściananie ukośne) oraz na elementach ścinanych bezpośrednio – direct-shear. Na podstawie tych rozważań rozpoznano wpływ szorstkości [1–3] i przygotowania powierzchni [4, 5] na tarcie i adhezję zespolenia. Badania te miały przełożenie na aktualną edycję prenormy Model Code 2020 oraz prEC [6–8].

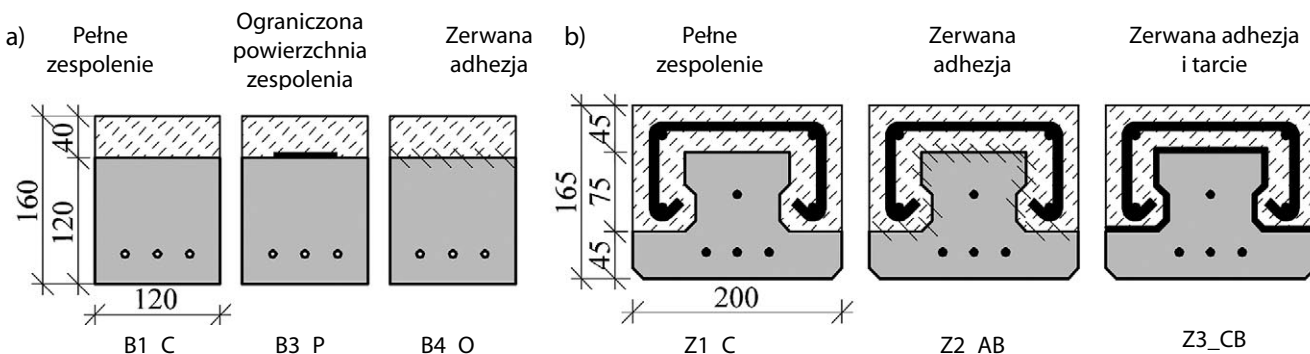
Stosunkowo rzadko wykonywane są badania elementów w skali naturalnej. Analizy doświadczalne, teoretyczne i numeryczne zaprezentowane w pracach [9–11] były skoncentrowane na cechach zespolenia w ramach jednej płaszczyzny – różnicowano kształt elementu, wykorzystując belki prostokątne i teowe oraz zmieniając stopień zbrojenia zrywającego i adhezję w styku. Rezultatem badań było określenie możliwych mechanizmów zniszczenia w zależności od nasycenia styku zbrojeniem oraz lokalizacji płaszczyzny zespolenia w elemencie. Badania uzupełniane były analizami numerycznymi, które w przypadku styku wymagały

korelacji wielu parametrów, takich jak: sztywność zespolenia, kąta tarcia wewnętrznego, adhezji i charakterystyki poślizgu w styku [12, 13].

Zachowanie się elementów o złożonym kształcie powierzchni zespolenia jest słabo rozpoznane, a literatura przedmiotu obejmuje niewiele prac eksperymentalnych na ten temat. W ostatnich latach wykonano badania doświadczalne i analizy numeryczne płyt żebrowych [12, 13] w zakresie nośności na zginanie. Wpływ ukształtowania styku belki stalowej z nadbetonem przeanalizowano w pracach [17, 18]. W ramach analiz opisano nową koncepcję zespolenia opartą na zastosowaniu stalowej pionowej blachy będącej przedłużeniem średnika w nadbetonie – zamiast standardowych łączników z główką. Taki element o powierzchni z nacięciami pozwalał na uzyskanie ponad dwukrotnie większej nośności zespolenia. Dodatkowo połączenie miało znaczącą nośność po zarysowaniu (rys. 1). Efekt taki uzyskano na skutek tarcia pomiędzy nadbetonem a elementem z nacięciami. Poślizg podłużny był ograniczony dzięki obecności nadbetonu, który krępował odkształcenia poziome. Prowadziło to do powstania sił normalnych i efektu zazębienia się, pomijanego przy analizie styków poziomych. Analogiczny efekt wykorzystany został w projekcie



Rys. 1. Porównanie różnych typów zespolenia belki stalowej z nadbetonem (a), mechanizm zniszczenia zespolenia dla modelu RH (b); 1- belka stalowa, 2- nadbeton, 3 - rysa [17]



Rys. 2. Badane elementy: a) belki o płaskiej powierzchni styku, b) belki o złożonej powierzchni styku

nowego typu stropu wykonanego z kompozytowych elementów nośnych [19].

Ze względu na brak dostatecznego rozpoznania pracy elementów o złożonym kształcie zespolenia autorzy rozpoczęli serię badań elementów belkowych o przekroju zbliżonym do teowego, wykonanych w technologii betonu sprężanego. Badania zasadnicze poprzedzono wstępnymi testami elementów o przekroju prostokątnym i płaskiej powierzchni zespolenia. Celem analiz była weryfikacja prawidłowego przygotowania styku oraz kalibracja aparatury pomiarowej.

2. Parametry materiałowe i opis badań

2.1. Program badawczy

Głównym celem programu badań było określenie wpływu kształtu zespolenia na pracę elementu zespolonego. Jako wpływ kształtu zespolenia rozumie się współpracę poszczególnych płaszczyzn (pionowych oraz poziomych – rysunek 2b) znajdujących się na różnej wysokości przekroju, w szczególności mechanizmu zniszczenia i współpracy różnych powierzchni zespolenia. Dodatkowym celem jest weryfikacja możliwości pracy elementów po zerwaniu adhezji i określenia możliwości pracy elementu jako zespolonego na skutek wzajemnego docisku nadbetonu do żebra.

Badania prowadzono na elementach prefabrykowanych, produkowanych jako sprężane nadproża (rys. 2a) oraz na belkach stanowiących wycinek sprężanej płyty stropowej (rys. 2b). Cały program badań obejmował badania trzy i czteropunktowego zginania oraz bezpośredniego ścinania. Sumarycznie wykonano dziesięć elementów

o różnych przekrojach poprzecznych – różniących się stopniem zespolenia.

W ramach niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań trzech wariantów zespolenia. W pierwszym z nich powierzchnia styku była nieobrobiona, szorstka (Z1_C). W drugim, w płaszczyźnie zespolenia, zastosowano środek antyadhezyjny (Z2_AB). Trzecią belkę wykonano z przyspójoną do prefabrykatu kauczukowo-keklarową matą, grubości 0,2 mm zrywającą styk (Z3_CB) i wygładzającą powierzchnię zespolenia (sumaryczna grubość z klejem ~2,0 mm). Przed głównymi badaniami wykonano test belek z płaską powierzchnią zespolenia, w analogicznych wariantach – przy czym matę zrywającą przyczepność wykonano na połowie szerokości styku wynoszącej 60 mm (B3_P). Przekroje wszystkich elementów przedstawiono na rysunku 2, a w tabelach 1–3 pokazano wielkości parametrów materiałowych.

Wyniki dla elementów z płaską powierzchnią zespolenia przedstawiono w publikacji [20]. Przeprowadzone testy pozwoliły na potwierdzenie możliwości pełnego zerwania adhezji przy wykorzystaniu środków zapobiegających przywieraniu betonu. Potwierdzono również ograniczenie nośności styku przy zastosowaniu opisanej przekładki.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej kg/m^3

Element	Woda	Cement	Piasek	Kruszywo	Superplastyfikator
Prefabrykat (belki Z)	80	342	734	1223	1,83
Nadbeton (belki Z)	191	383	1105	810	-

Tabela 2. Parametry betonu

Element	Prefabrykat		Nadbeton	
	$f_{c,cube}$ (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	$f_{c,cube}$ (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
Z1, Z2, Z3	64,3	37,9	34,5	31,3

Tabela 3. Parametry stali zbrojeniowej i sprężającej

Klasa stali	R_{eH} (N/mm ²)	R_m/R_e	A_{gt} (%)	A_{10} (%)
B500B	554	1,08	6,1	10,3
Y2060S7	1927	1,12	5,4	-

Przemieszczenia poziome analizowano dzięki zastosowaniu systemu ARAMIS w technologii cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Ponadto przemieszczenia poziome styku były rejestrowane za pomocą transformatorowych przetworników przemieszczeń liniowych (LVDT) typu PJX-10 o dokładności wskazań równej 0,002 mm. Czujniki mocowano do warstwy nadbetonu na styku z elementami prefabrykowanymi (rys. 3, 4). LVDT stanowiły jednak wyłącznie referencyjną metodę pomiarową.

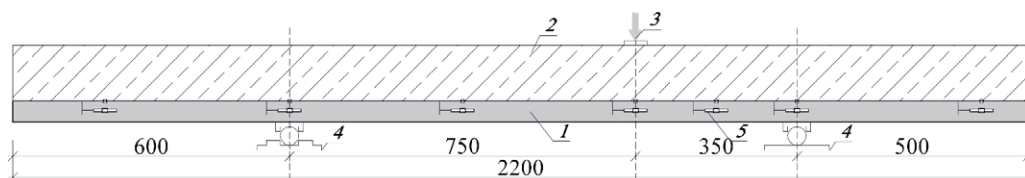
2.2. Stanowisko badawcze

Badania główne przeprowadzono na sprężonych belkach żebrowych o szerokości 200 mm oraz wysokości 120 mm, z warstwą nadbetonu o grubości 45 mm. Prefabrykowane belki wykonano z betonu C40/50, zbrojenie sprężające składało się ze czterech splotów 7-drutowych $\phi 6,85$ mm ze stali Y2060S7. W obszarze nadbetonu wykonano zbrojenie podłużne z prętów $\phi 10$ mm i strzemion $\phi 6$ mm. Zbrojenie stanowiło wzmocnienie nadbetonu na docisk i ścinanie po zarysowaniu styku. Powierzchnię żeber badanych elementów można sklasyfikować jako szorstką (zgodnie z wymogami Model Code 2010 – średnia szorstkość $R_t > 1,5$ mm). Badania przeprowadzono w próbie trzypunktowego zginania, przy obciążeniu, przyłożonym w odległości 350 mm od osi podpory (rys. 3). Belki ustawiono z zachowaniem 500 mm odcinka, na długości którego weryfikowano przesunięcie poziome nadbetonu. Odcinek ten stanowił długość zakotwienia i dyspersji siły sprężającej. Badanie zaprojektowano w taki sposób, aby możliwa była obserwacja najpierw rysy poziomej, wynikającej z utraty zespolenia (bazując na Model Code 2010).

3. Wyniki badań doświadczalnych

3.1. Badania trzypunktowego zginania

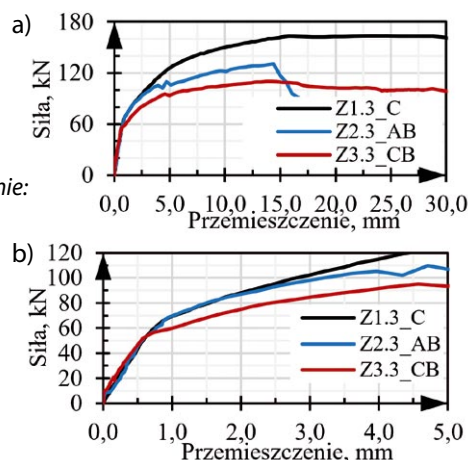
Dla badanych belek o złożonym przekroju zespolenia można wyróżnić cztery podstawowe fazy pracy (rys. 4a):

Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego belek Z1.3_C, Z2.3_AB i Z3.3_CB wraz z rozmieszczeniem czujników LVDT


1 – niezarysowana, 2 – zarysowana od zginania, 3 – rozwarstwienie, 4 – faza rezidualna. Charakterystyczny jest brak wyraźnego wpływu rozwarstwienia (widocznego na powierzchni bocznej) na zachowanie się belek. Elementy tracą sztywność giętną – jednak nie następuje gwałtowny przyrost przemieszczeń i spadek siły. Wyróżnienie fazy trzeciej jest możliwe dzięki analizie morfologii zarysowań i zmierzonych wartości przemieszczenia poziomego styku na bocznej powierzchni elementów.

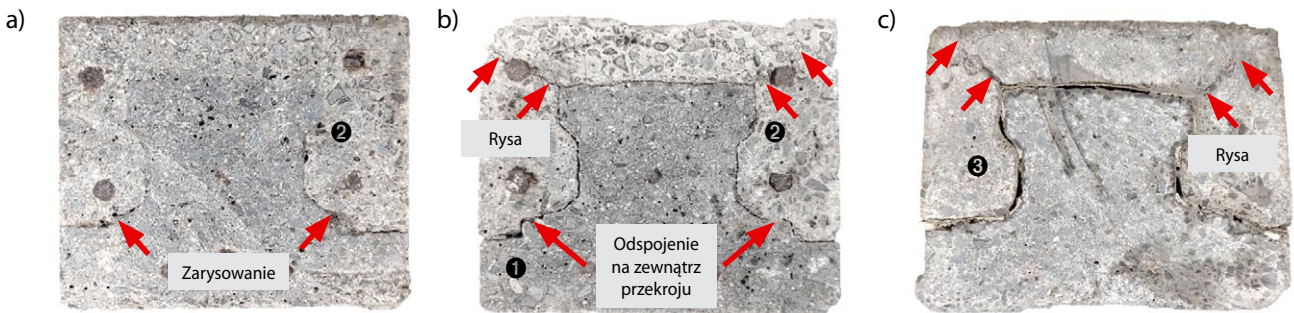
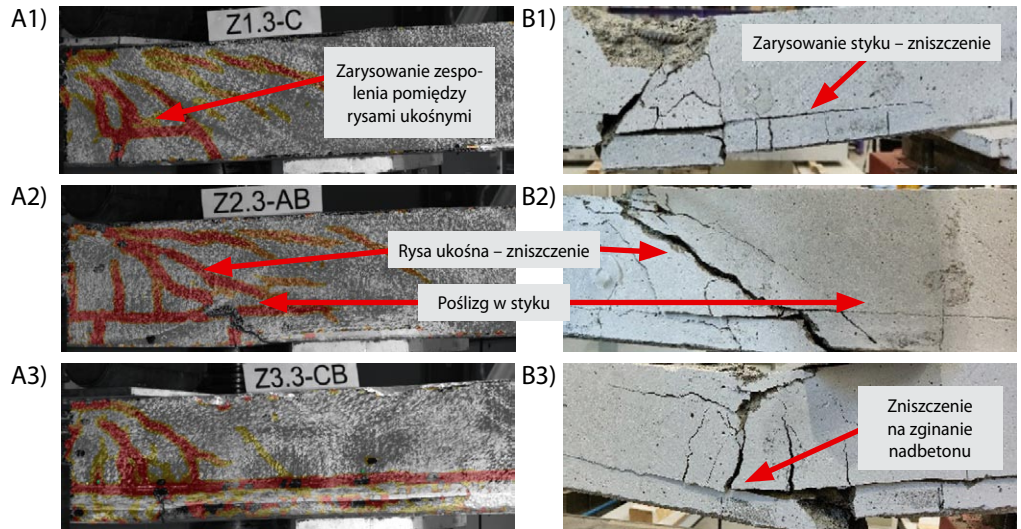
Rys. 4. Wykres siła-przemieszczenie:

a) cały zakres obciążenia,
b) siła rysująca



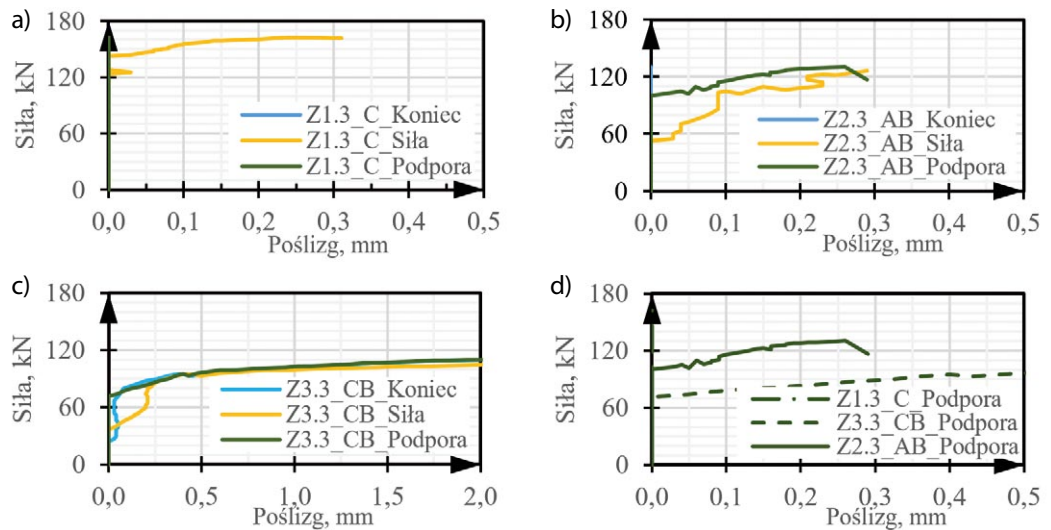
Elementy Z2.3_AB i Z3.3_CB charakteryzowały się wstępnym zespoleniem pomimo zastosowania środków antyadhezyjnych (belka Z2) oraz warstwy zrywającej tarcie (belka Z3). Dla elementu bez przyczepności i tarcia odnotowano systematyczny przyrost poślizgu od 26,8 kN. Co istotne, poślizg ten nie był równomierny na długości elementu. Poślizg na krawędzi podpory nastąpił przy wartości siły równej 39,3 kN, a przy końcu elementu przy 74,3 kN. Dla belki bez adhezji, ale z tarcie w styku odnotowano zarysowanie styku pomiędzy rysami od zginania przy wartości 54,9 kN i 103,4 kN, przy krawędzi podpory. Nie zarejestrowano rozwarstwienia na końcu elementu (rys. 7b). Wartości poślizgu w styku, w trzech punktach pomiarowych, na podstawie DIC przedstawiono na rysunku 5 (wartości większe niż 0,05 mm z dokładnością do 0,01 mm). Elementy Z2.3_AB oraz Z3.3_CB nie uległy rozwarstwieniu na osi przeciwległej podpory (w odległości 750 mm). Rozwarstwienie belki Z1.3_C nie zostało zarejestrowane przez aparaturę pomiarową na skutek utraty możliwości pomiaru DIC i LVDT ze względu na uszkodzenia powierzchni bocznej elementu. Przy sile 157,7 kN (po przekroczeniu siły maksymalnej) doszło do gwałtownego zniszczenia elementu, rozwarstwienia na odcinku od siły do podpory oraz zmiężdżenia strefy ściskanej. Za rozwarstwienie elementu można uznać przecięcie rysy ukośnej ze stykiem i dalszą propagację rys pionowych i ukośnych.

Rys. 5. Obraz zarysowań:
A – siła maksymalna,
B – po badaniu (od lewej siła,
po prawej podpora).



Rys. 6. Przekrój przez belkę w osi podpory: a) Z1.3_C, b) Z2.3_AB, c) Z3.3_CB; 1 – prefabrykat, 2 – nadbeton, 3 – przekładka

Rys. 7. Poślizg w styku:
a) Z1.3_C, b) Z2.3_AB,
c) Z3.3_CB, d) porównanie poślizgu w osi podpory



W elementach bez adhezji widoczny jest brak zgodności rys giętych pomiędzy belką żebrową, a nadbetonem. Zgodność ta występowała w belce Z1.3_C, co świadczy o rzeczywistym zespoleniu elementu. Pierwsza rysa gięta pojawiła się przy sile 70,7 kN – Z1.3_C; 68,2 kN – Z2.3_AB i 56,3 kN – Z3.3_CB. Zbieżność sztywności pomiędzy belką typu 1 i 2 (rys. 4b) występowała, aż do zarysowania styku na długości od siły do podpory w elemencie bez adhezji. Rozwarstwienie całego przekroju i poślizg nadbetonu dla elementów Z2.3_AB i Z3.3_CB wiązał się z ukośnym zarysowaniem od narożnika prefabrykatu do krawędzi nadbetonu

(rys. 6). Zarysowania te dzieliły nadbeton na trzy części. W przypadku każdej z belek po utracie zespolenia wystąpiło zniszczenie prefabrykatu na skutek ścinania. Ścinanie po odkucia obszaru zniszczonego wystąpiło poziomo na poziomie połączenia żebra z półką dolną – nad splotami sprężającymi. Obraz uszkodzeń ten jest zgodny z innymi badaniami na pojedynczych belkach bez nadbetonu. Dodatkowo na odcinku rozwarstwionym zaobserwowano odchylenie nadbetonu na zewnątrz środnika. Efekt ten był rejestrowany od momentu rozwarstwienia aż do zniszczenia elementów.

4. Obliczenia analityczne i numeryczne

4.1. Parametry modelu obliczonego metodą elementów skończonych (MES 3D)

W celu przygotowania badania i wstępnego porównania wyników badań wykonano modele oparte na metodzie elementów skończonych (MES). W analizach nie skorelowano parametrów zespolenia z wynikami badań doświadczalnych. Modele skorelowane zostaną wykonane po zakończeniu programu badań obejmujących wyniki testów czteropunktowego zginania, bezpośredniego ścinania i pull-off. Modele wykonano w oprogramowaniu Atena Studio V5.9. Do zamodelowania betonu wykorzystano materiał łączący dwa modele: sprężysto-plastyczną powierzchnię graniczną Menetreya-Williamsa oraz model sprężysto-kruchy z powierzchnią graniczną Rankine'a.

Tabela 4. Parametry modelu MES

Element	Moduł sprężystości, E_c , GPa	Współczynnik Poissona, μ	Energia pękania, G_f , N/m	Wytrzymałość na rozciąganie, f_t , MPa
Prefabrykat	37,9	0,2	151,0	3,95
Nadbeton	31,3	0,2	135,0	2,39

Parametry betonu wygenerowano na podstawie zależności Model Code 2010 i zbadanych wytrzymałości materiału (tab. 1). Parametry zbrojenia przyjęto zgodnie z tabelą 2, uwzględniając poślizg splotów zgodnie z Model Code 2010. Parametry styku określono na podstawie wytrzymałości na rozciąganie słabszego z betonów zgodnie ze współczynnikami Model Code 2010 oraz modelem Mohr'a-Coulomb'a [13]. Współczynniki przyjęto jak dla powierzchni szorstkich: współczynnik tarcia $\mu = 0,7$ oraz współczynnik adhezji $c_a = 0,4$ (mnożnik wytrzymałości na rozciąganie słabszego z betonów).

Do zbudowania modelu wykorzystano siatkę elementów skończonych o wielkości 20 mm w strefie pomiędzy podporami i rozrzedzoną w strefach zakotwienia zbudowaną z elementów sześciennych o dziewięciu węzłach (quadratic-9). Styk zespolenia został zamodelowany jako materiał z kryterium zniszczenia Mohra-Coulomba. W zagadnieniu

trójwymiarowym zachowanie elementów zależy od tarcia w płaszczyźnie zespolenia, relatywnym poślizgu oraz przemieszczeń otwierających styk. Początkowa powierzchnia zniszczenia odpowiada modelowi Mohra-Coulomba z elipsoidą dla rozciągania. Gdy naprężenia przekraczają kryterium wytrzymałości, powierzchnia zespolenia transformowana jest w powierzchnię przenoszącą wyłącznie tarcie. Model belki został podparty stalowymi blachami w sposób przegubowy z możliwością przesuwu. Dla każdego kroku obciążenia zadano równe wartości przemieszczenia (wymuszenie punktowego przemieszczenia blachy stalowej). Siłę sprężającą uwzględniono jako odkształcenia wstępne splotów. Model obliczono etapowo z uwzględnieniem fazy sprężenia i wykonania nadbetonu. Obliczenia nie uwzględniały wpływu skurczu oraz pełzania na element zespolony. W oparciu o podane kryteria wykonano obliczenia modelu

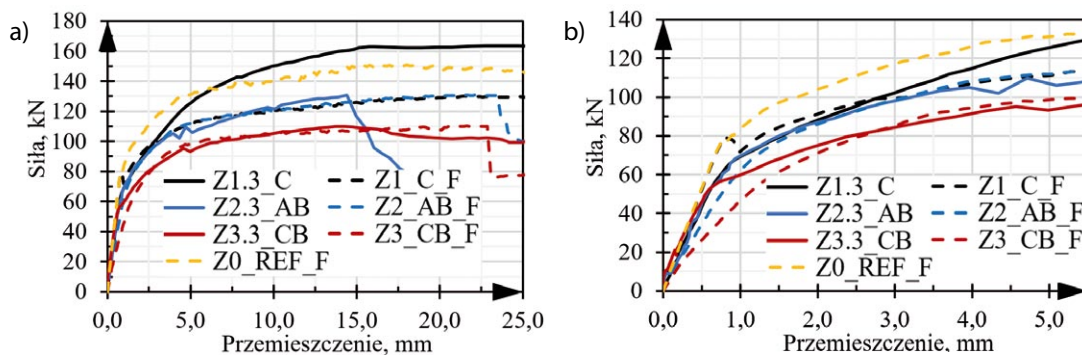
Z1_C, modelu Z2_AB z usuniętą wytrzymałością na rozciąganie styku, modelu Z3_CB o zredukowanym współczynniku tarcia $\mu = 0,1$ oraz model referencyjny Z0_REF, bez możliwości rozwarstwienia styku.

4.2. Wyniki obliczeń MES

W analizach porównywano wyłącznie charakterystyki siła-przemieszczenie (rys. 8). Największą zgodność obliczeń uzyskano dla modelu z tarciami w styku (Z2_AB), zarówno dla siły rysującej od zginania (68,2 kN – exp, 67,7 – MES) jak i dla siły maksymalnej (130,6 kN – exp, 131,1 – MES). Dużą zgodność siły maksymalnej w odniesieniu do badań odnotowano również dla modelu Z3_CB (109,9 kN – exp, 110,4 – MES). Zarówno model bez adhezji jak i bez tarcia (Z3_CB) oraz wyłącznie bez adhezji (Z2_AB) wykazywał mniejszą sztywność początkową (do pojawienia się pierwszej rysy), co przedstawiono na wykresie rysunku 8b.

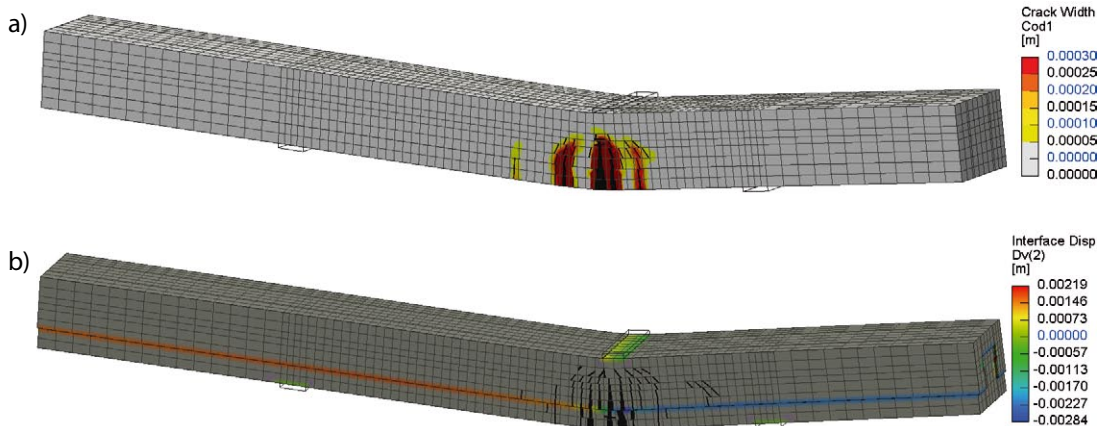
Model Z1_C uległ zarysowaniu od zginania i jednocześnie zarysowaniu styku przy sile 80 kN. Zarysowanie styku wystąpiło przy sile niemal dwukrotnie mniejszej niż w badaniu eksperymentalnym, a zarysowania giętne przy sile większej o 10 kN. Maksymalna siła na model Z0_REF wynosiła 151,0 kN. Model ten charakteryzował się większą rozwarścią rys giętnych a mniejszą ilością i rozwarścią

Rys. 8. Porównanie charakterystyki siła-przemieszczenie modeli MES i badań



Rys. 9. Modele MES

– obraz zarysowań dla siły maksymalnej:
 a) Z0_REF – 151,0 kN (17,7 mm) – szerokość zarysowań,
 b) Z2_AB – 131,1 kN (21,8 mm) – poślizg styku.



rys ukośnych niż najbardziej podobny element Z1.3_C. Mechanizm zarysowania zespolenia znacząco różnił się w obliczeniach numerycznych i w badaniach (rys. 5, rys. 9). Powierzchnia zespolenia modeli MES przy sile rysującej styku ulega rozwarstwieniu na całej długości (w kierunku obydwu podpór – rys. 9b). Różnica w mechanizmie rozwarstwienia może mieć decydujący wpływ na rozbieżność siły rozwarstwiającej model numeryczny (Z1_C) i eksperymentalny (Z1.3_C).

4.3. Obliczenia analityczne – Model Code 2010

Wykonano obliczenia analityczne nośności styku, bazując na Model Code 2010, które porównano z siłą rozwarstwiającą pozyskaną z badań oraz modelu FEM elementu Z1.3_C. Parametry adhezji i tarcia podane w pkt. 4.1 zastosowano w obliczeniach (1). Przyjęto założenie upraszczające – wartości siły ścinającej przetransformowano na siłę normalną do powierzchni poziomej styku na całej długości odcinka (od osi siły do osi podpory równej 350 mm). Naprężenia od docisku uwzględniono wyłącznie na powierzchniach poziomych o sumarycznej szerokości 200 mm. Zależność siły maksymalnej od siły docisku generującej naprężenia od tarcia ustalono iteracyjnie. Do obliczeń naprężeń adhezyjnych przyjęto sumaryczną szerokość styku równą 367 mm (2).

$$\tau_{cal} = c_a \cdot f_{ctm} + \mu \cdot \sigma_n \tag{1}$$

$$V_{cal} = \frac{\tau_{cal}}{z \cdot b} \tag{2}$$

gdzie:

- τ_{cal} – wytrzymałość na ścinanie zespolenia,
- c_a oraz μ – parametry zespolenia,
- f_{ctm} – wytrzymałość na rozciąganie betonu słabszego,
- σ_n – naprężenia normalne wywołane obciążeniem zewnętrznym,
- z – ramię sił wewnętrznych,
- b – szerokość zespolenia,
- V_{cal} – siła ścinająca.

Tak obliczoną wartość siły tnącej przeliczono zgodnie ze schematem statycznym (rys. 3) na siłę oddziałującą na belkę. Wartości uzyskane z badań, analiz MES oraz obliczeń analitycznych

przedstawiono w tabeli 5. Wartość siły rozwarstwiającej uzyskana z badań była dwukrotnie większa niż rozważania teoretyczne. Co istotne, wartości obliczone analitycznie oraz na modelu MES opartym o te same założenia (Model Code 2010) pozwoliły na uzyskanie zbieżnych wyników. Analiza uzyskanych sił rozwarstwiających zostanie wykonana po przeprowadzeniu badań bezpośredniego ścinania, na podstawie których określone zostaną parametry styku elementów. Na obliczoną rozbieżność mogą składać się takie czynniki jak: rzeczywista adhezja styku, sztywność zespolenia (parametr modelu MES), siły normalne do styku (efekt skurczu oraz kształtu zespolenia – rys.6). Ze względu na założenie zerwania adhezji dla modeli Z2_AB i Z3_CB – w obliczeniach analitycznych elementy te nie odznaczały się nośnością na rozwarstwienie.

Tabela 5. Siła niszcząca styk – belka Z1.3_C

Element	Badanie kN	MES (MC2010) kN	Model Code 2010 kN
Z1.3_C	157,7	80,0	78,1

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wpływ położenia i przekroju styku w elemencie zespolonym na pracę statyczną elementów belkowych. Zaprezentowano początkowe wyniki badań, ograniczając się do elementów ścinanych w teście trzypunktowego zginania. Badania poprzedzono badaniami wstępnymi na elementach z płaskim stykiem w teście czteropunktowego zginania. Na podstawie wykonanych analiz można wyciągnąć poniższe wnioski.

- Zastosowane metody zerwania adhezji i styku spełniły swoją rolę w elementach z jedną płaszczyzną zespolenia [20]. W przypadku elementów o złożonej powierzchni zespolenia wykazana została początkowa przyczepność styku – pomimo zastosowanych przekładek i preparatów antyadhezyjnych.
- Pomiary DIC wraz z analizą siła-przemieszczenie (pomiar LVDT) wykazały istotny wpływ długości rozwarstwienia

na pracę elementu. Jako moment rozwarstwienia należy uznać rysę dochodzącą do krawędzi podpory.

- Siła rysująca styk jest zależna od pojawienia się i propagacji rysy ukośnej od ścinania.
- W wszystkich elementach zaobserwowano odchylenie zarysowanego fragmentu nadbetonu do zewnątrz. Brak elementu krępującego zapobiegł powstaniu naprężeń normalnych do powierzchni bocznych [17].
- Przyjęty współczynnik tarcia w obliczeniach MES prawidłowo odwzorowuje pracę styku po zarysowaniu. Parametry styku zostaną zweryfikowane eksperymentalnie i pozyskane z badań bezpośredniego ścinania.
- Zarówno model bez adhezji jak i bez tarcia i adhezji wykazywał mniejszą sztywność początkową (do pierwszego zarysowania). Modele numeryczne ulegały poślizgowi w styku od początku przykładania obciążenia. Modele doświadczalne charakteryzowały się pewną sztywnością początkową zespolenia (przyczepnością w styku), pomimo zastosowania środków zrywania adhezji.
- W analizie MES przy sile rozwarstwiającej w styku występuje poślizg na całej długości. Przyjęty model nie odwzorowuje właściwe faz zarysowania opisanych na podstawie obserwacji z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu DIC.

Opisane badania stanowią pierwszą część analiz prowadzonych na Politechnice Śląskiej. Badania będą kontynuowane na zmodyfikowanym stanowisku do bezpośredniego ścinania. Testy eksperymentalne pozwolą na opis mechanizmu pracy styku, w szczególności mechanizmu zazębienia się wzajemnie styków. Badania zostaną zwieńczone testami elementów płytowych z większą liczbą żeber. Analizy numeryczne zostaną uzupełnione o skorelowanie parametrów mechanicznych styku. Modele po kalibracji posłużą do odwzorowania pracy betonowych konstrukcji zespolonych – w szczególności do rozpoznania rozdziału naprężeń stycznych w płaszczyznach zespolenia elementów.

Finansowanie

Krzysztof Grzyb jest beneficjentem Europejskiego Stypendium w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, grant InterPOWER (POWR.03.05.00-00-Z305). Niniejsza praca została częściowo sfinansowana z Europejskiego Funduszu Społecznego, grant InterPOWER (POWR.03.05.00-00-Z305).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mohamad M., Ibrahim I., Abdullah R., Abd Rahman A., Kueh A., Usman J., Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond, *Cement and Concrete Composites*, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.003>
- [2] Santos P. M. D., Júlio E.N. B. S., Interface Shear Transfer on Composite Concrete Members, *ACI Structural Journal*, 111, 2014, str. 113–121, <https://doi.org/10.14359/51686543>
- [3] He Y., Zhang X., Hooton R. D., Zhang X., Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding, *Construction and Building Materials* 151, 2017, str. 582–590 (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.049>)
- [4] Perez F., Morency M., Bissonnette B., Courard L., Correlation between the roughness of the substrate surface and the debonding risk. *Proceedings of the 2nd ICCRRR*, 2009, str. 347–348, <https://doi.org/10.1201/9781439828403.ch133>
- [5] Courard L., Bissonnette B., Belair N., Effect of surface preparation techniques on the cohesion of superficial concrete: Comparison of jack-hammering and water jetting, *Proceedings of the ICCRRR 2005*, str. 383–385, Taylor & Francis Group, 2006
- [6] Goldyn M., Shear capacity of the interface between concretes cast at different time in the light of experimental investigations and codes of practice, *ACE*, 68, 2022, str. 275–298, <https://doi.org/10.24425/ACE.2022.140168>
- [7] Saldanha R., Santos P., Júlio E., Dias-Da-Costa D., fib Model-Code 2010 Approach for Concrete-to-Concrete Interfaces, *IABSE-IASS Symposium*, 2011
- [8] Randl N., Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010, *Structures and Construction Engineering* 14, 2013, str. 230–241, <https://doi.org/10.1002/suco.201300003>
- [9] Sadowski, G., Wiliński, P., Halicka, A.: Analysis of the Shear Resistance in the Indented Interface Between Two Concrete Parts of Concrete Composite Beam CEER, 31, 2021, str. 93–105, <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0007>
- [10] Halicka A., Jabłoński Ł., Shear failure mechanism of composite concrete T-shaped beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 2016, str. 67–75, <https://doi.org/10.1680/stbu.14.00127>
- [11] Halicka A., Influence new-to-old concrete interface qualities on the behaviour of support zones of composite concrete beams, *Construction and Building Materials* 25, 2011, str. 4072–4078, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.045>
- [12] Dias-da-Costa D., Alfaiate J., Júlio E. N. B. S., FE modeling of the interfacial behaviour of composite concrete member, *Construction and Building Materials*, 2012, str. 233–243, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.015>
- [13] Jabłoński Ł., Halicka A., Influence of surface based cohesive parameters on static performance of concrete composite T-shaped beams. *MATEC Web of Conferences*. 262, 2019, str. 08003, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926208003>
- [14] Han S.J., Jeong J. H., Joo H. E., Choi S. H., Choi S., Kim K. S., Flexural and shear performance of prestressed composite slabs with inverted multi-ribs, *Applied Sciences-Basel*, 9, 2019, str. 4946, <https://doi.org/10.3390/APP9224946>
- [15] Wenzhong Z., Xueyuan L., Ying W., Flexural Behaviour of Precast, Prestressed Ribbed RPC Bottom Panels, *TOCEJ*, 9(2015), <https://doi.org/10.2174/1874149501509010535>
- [16] Zając J., Drobiec Ł., Jasiński R., Wieczorek M., Mazur W., Grzyb K., Kisiołek A., The Behaviour of Half-Slabs and Hollow-Core Slab in Four-Edge Supported Conditions, *Applied Sciences-Basel*, tom 11, 2021, str. 10354, <https://doi.org/10.3390/APP112110354>
- [17] Diógenes H. J. F., el Debs A. L. H. C., Valente I. B., Experimental analysis of new interfaces for connections by adhesion, interlocking and friction, *Journall of Constructional Steel Research* 110, 2015, str. 170–181, <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2015.03.012>
- [18] Lebet J. P., New Steel-Concrete Shear Connection for Composite Bridges. *Proceedings of the 2008 CCSCC*, 2011, str. 65–77, [https://doi.org/10.1061/41142\(396\)6](https://doi.org/10.1061/41142(396)6)
- [19] Mastali M., Valente I. B., Barros J. A. O., Development of innovative hybrid sandwich panel slabs: Advanced numerical simulations and parametric studies, *Composite Structures*, 152, 2016, str. 362–381, <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.05.072>
- [20] Zając J., Drobiec Ł., Grzyb K., Kisiołek A., Wpływ przekroju poprzecznego styku nadbetonu i prefabrykatu na pracę statyczną belek zespolonych, *Materiały Budowlane* 4/2022, str. 40–44, doi:10.15199/33.2022.04.07