

## Wpływ położenia styku na wysokości żelbetowych elementów zespolonych o przekroju teowym na stan graniczny zarysowania styku

Łukasz Jabłoński

Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: l.jablonski@pollub.pl

**Streszczenie:** W pracy zrelacjonowano badania żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym z różnie usytuowanym stykiem. Analizowano obraz zarysowania belek oraz wartości sił, przy których nastąpiło zarysowanie styku. Wykonano również obliczeniową analizę wpływu położenia styku oraz różnicy modułów sprężystości łączonych betonów na wartość naprężeń w styku.

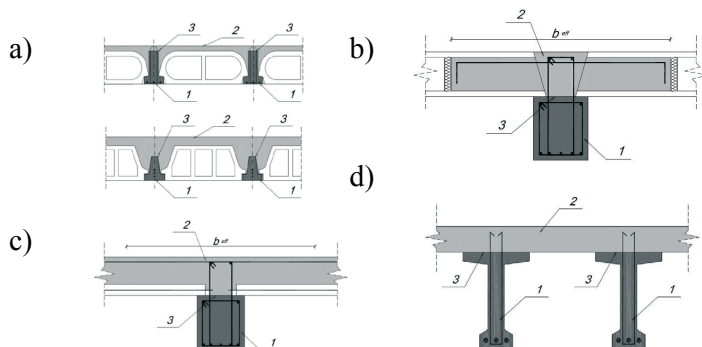
**Słowa kluczowe:** żelbetowe belki zespolone, przekrój teowy, zarysowanie styku

### 1. Wprowadzenie

W praktyce inżynierskiej betonowe elementy zespolone o przekroju teowym spotykane są dość często (rys.1). Przekrój teowy występuje np. w:

- stropach gęstożebrowych z prefabrykowanymi lub częściowo prefabrykowanymi żebrami,
- w strefach monolityzowanego wieńcem oparcia prefabrykowanych płyt stropowych (płyt kanałowych lub stropu deskowego) na prefabrykowanej lub monolitycznej belce,
- elementach konstrukcyjnych mostów, złożonych z prefabrykowanych belek mostowych i monolitycznej płyty.

W teowych elementach zespolonych styk między łączonymi elementami składowymi może znajdować się na różnym poziomie – w półce, między półką i środkiem lub w środku na różnej wysokości.



Rys. 1. Przykłady elementów zespolonych o przekroju teowym: a) stropy gęstożebrowe na prefabrykowanych belkach żelbetowych i sprężonych, b) płyty kanałowe oparte na prefabrykowanym podciągach monolityzowanym wieńcem, c) płyty stropów deskowych np. „filigran” oparte na belkach, monolityzowanych betonem uzupełniającym, d) zespolone elementy mostowe; 1 - prefabrykat, 2 – beton monolityczny, 3 – styk

Pomimo szerokiego zastosowania praktycznego teowe elementy zespolone były przedmiotem nielicznych prac [6, 7, 8]. Nie analizowano w nich jednak w sposób kompleksowy wpływu parametrów styku, jego podatności i położenia, a przecież styk, jako strefa nieciągłości betonowania jest najsłabszym miejscem w elemencie. Zdecydowanie więcej uwagi poświęcano elementom zespolonym o przekroju prostokątnym (np. [1-5]).

W niniejszej pracy opisano własne badania żelbetowych belek zespolonych o przekroju teowym, analizując obraz zarysowania styku w zależności od jego położenia, a także dokonano obliczeniowej analizy naprężeń ścinających w styku usytuowanym na różnej wysokości.

Punktem wyjścia do tej analizy były wnioski z rozważań dotyczących elementów zespolonych o przekrojach prostokątnych. W publikacjach [3,4] dowiedziono, że dla pracy statycznej elementów zespolonych w przekroju prostokątnym istotna jest nie tylko nośność styku, ale przede wszystkim wartość obciążenia rysującego styk. Po zarysowaniu styk staje się podatny, co ma podstawowy wpływ na dystrybucję sił wewnętrznych, w szczególności ścinających. Ponadto zarysowanie styku skutkuje zmniejszeniem nośności przekrojów przypodporowych. W pracy [4] stwierdzono również, że maksymalna nośność belki zespolonej o przekroju prostokątnym na zginanie i ścinanie może być osiągnięta jedynie, gdy styk aż do chwili zniszczenia belki pozostanie niezarysowany lub zarysuje się jedynie lokalnie na niewielkim odcinku. Za warunek obliczeniowy uzyskania takiego mechanizmu zniszczenia uznano, aby najpierw pojawiła się rysa ukośna, a dopiero w drugiej kolejności rysa w styku (rysa w styku może być przedłużeniem rysy ukośnej). W przeciwnym przypadku, gdy rysa w styku poprzedza rysę ukośną, następuje delaminacja styku i rozdzielenie elementów składowych, które zaczynają pracować niejako oddzielnie.

## 2. Badanie zespolonych belek żelbetowych o przekroju teowym

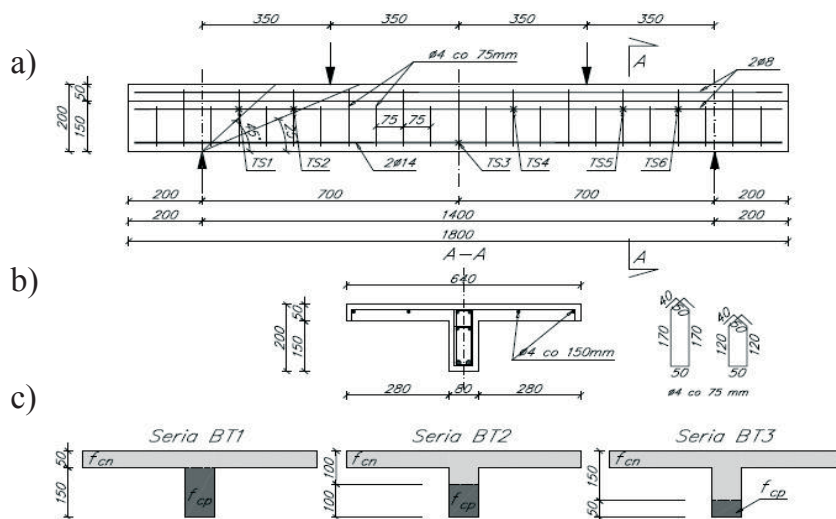
### 2.1. Badane elementy i przebieg badań

Badaniu poddano belki zespolone o przekroju teowym o wymiarach płyty 640 x 50 x 1800 mm i środnika 80 x 150 x 1800 mm. Styk między dwoma betonami w serii BT-1 znajdował się między półką górną a środnikiem w  $\frac{3}{4}$  wysokości, w serii BT-2 – w połowie wysokości a w serii BT-3 – w  $\frac{1}{4}$  wysokości belki (rys.2)

Elementy przygotowywano w dwóch etapach. W etapie pierwszym zabetonowano środnik (seria BT1) lub jego część (serie BT2 i BT3), a po upływie 14 dni dobetonowywano górną płytę lub górną część środnika z płytą. Nośność styku zapewniona była przez przyczepność między betonami oraz pręty zbrojenia pionowego (zszywającego). Belki zaprojektowano tak, aby zniszczyły się przez ścinanie. Zbrojenie podłużne dolne wykonano z dwóch prętów  $\phi 14$  ( $\rho_l = 2,21\%$ ), a górne z dwóch prętów  $\phi 8$ . Zastosowano dwa rodzaje strzemion dwuramiennych z prętów  $\phi 4$  w rozstawie co 75 mm oraz 150 mm stanowiących zbrojenie styku (seria BT1 –  $\rho_{w,i} = 0,21\%$ , serie BT2 i BT3 –  $\rho_{w,i} = 0,42\%$ ). Zbrojenie płyty stanowiła siatka z prętów  $\phi 4$  o oczku 150 x 150 mm.

Belki poddano zginaniu w schemacie czteropunktowym w prasie hydraulicznej Zwick/Roell. W celu zapewnienia stabilności podczas badania, belki badano w pozycji odwróconej (rys. 3), a obciążenia przykładano za pośrednictwem sztywnego trawersu. Badania prowadzono do zniszczenia belek.

W trakcie badania, dla jednej belki z każdej serii zadany był płynny przyrost obciążenia z prędkością 1kN/0,5min z ciągłym pomiarem parametrów (odkształceń elementu i zbrojenia oraz ugięcia). Obciążanie pozostałych belek zatrzymywane było co 10kN na czas dokonania inwentaryzacji zarysowania i odczytu przemieszczenia wzajemnego części składowych w styku na końcu belki.



Rys. 2. Przekroje badanych belek: a) przekrój podłużny ze zbrojeniem i rozmieszczeniem tensometrów, b) zbrojenie przekroju poprzecznego, c) usytuowanie styku w poszczególnych seriach; TS1,TS2,TS4,TS5,TS6 – tensometry na strzemiach, TS3 – tensometr na zbrojeniu głównym



Rys. 3. Widok belki przygotowanej do badania

## 2.2. Wyniki badań w odniesieniu do zarysowania styku

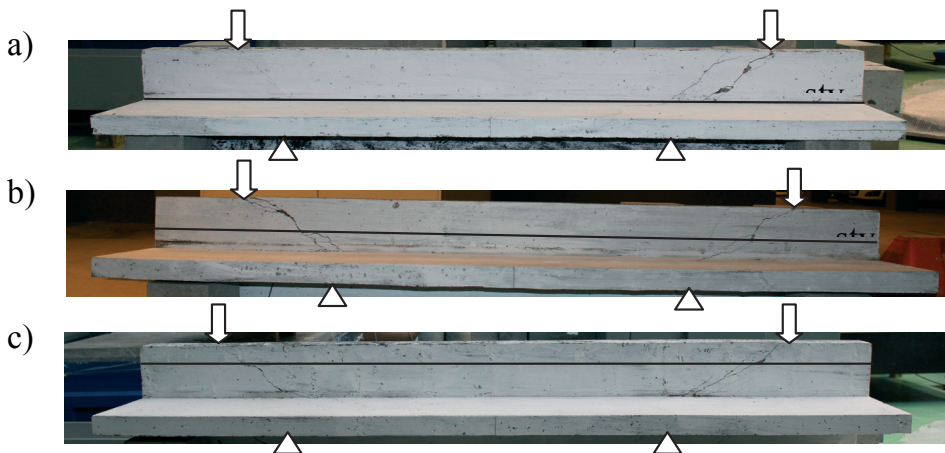
Przebieg procesu zarysowania był następujący. W pierwszych etapach obciążenia we wszystkich belkach powstawały rysy prostopadłe w środku przy sile o wartości ok 20kN. Rysy ukośne pojawiły się w późniejszych etapach przy siłach ok. 50 - 60kN. Wraz ze wzrostem obciążenia szerokość rys ukośnych wzrastała. Największe rozwarości osiągały zazwyczaj rysy ukośne, które pojawiły się jako pierwsze.

We wszystkich seriach (pomimo różnego stopnia zbrojenia zszywającego) zaobserwowano lokalne zarysowanie w styku. W belkach serii BT1 zarysowanie styku objawiało się zmianą kierunku głównej rysy ukośnej na poziomy po dojściu do styku. Rysa propagowała w styku na niewielkim odcinku a następnie przechodziła w półkę górną stając się znów rysą ukośną. W belkach serii BT2 i BT3 rysy ukośne nie zmieniały kierunku po dojściu do styku, ale przecinały go propagując dalej w betonie „nowym”, natomiast po przekroczeniu obciążenia rysującego styk następowało lokalne poziome zarysowanie styku na odcinku łączącym sąsiednie rysy ukośne. Charakterystyczne obrazy zarysowania dla każdej z serii belek przedstawia rys. 4.

Wartość sił niszczących oraz sił, przy których nastąpiło zarysowanie styku oraz obraz zarysowania styku zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie sił niszczących i rysujących oraz obraz zarysowania styku

	Seria BT1 styk = 3/4h	Seria BT2 styk = 1/2h	Seria BT3 styk = 1/4h	
Wytrzymałość na ściskanie	beton „stary”	53,01 MPa	51,66 MPa	48,27 MPa
	beton „nowy”	47,50 MPa	48,71 MPa	45,13 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	beton „stary”	3,85 MPa	5,99 MPa	5,67 MPa
	beton „nowy”	2,88 MPa	5,32 MPa	5,00 MPa
Moduł sprężystości	beton „stary”	36,29 GPa	36,01 GPa	35,28 GPa
	beton „nowy”	35,11 GPa	35,38 GPa	34,57 GPa
Siła niszcząca	137,0 kN	145,0 kN	143,0 kN	
	138,0 kN	136,0 kN	144,0 kN	
	128,0 kN	142,0 kN	118,0 kN	
Siła, przy której nastąpiło zarysowanie styku	80,0 kN	130,0 kN	120,0 kN	
	80,0 kN	100,0 kN	120,0 kN	
	70,0 kN	brak danych	brak danych	
Obraz zarysowania styku				
	rysa w styku stano-wiła kontynuację rysy ukośnej po jej dojściu do styku	rysa w styku połą-czyła powstałe wcześniej rysy ukośne	rysa w styku połą-czyła powstałe wcześniej rysy ukośne	



Rys. 4. Obraz wybranych belek poszczególnych serii po zniszczeniu; a) seria BT1 (styk = 3/4h), b) seria BT2 (styk = 1/2h), c) seria BT3 (styk = 1/4h)

### 3. Naprężenia rysujące styk

Dla przebadanych belek zespolonych o przekroju teowym obliczono wartości naprężeń stycznych w styku przy siłach powodujących zarysowanie styku. Uwzględniono rzeczywiste położenie styku na wysokości belek oraz różnicę modułów sprężystości betonów składowych. Zastosowano procedurę sprężystej analizy warstwowej, zaadaptowaną do analizy żelbetonowych belek zespolonych w [4]:

$$\tau = \frac{V_{cr}}{b_j \cdot \frac{\Delta_{11} \cdot (E_p J_p + E_n J_n)}{w_0}}, \quad (1)$$

gdzie:

$V_{cr}$  – siła poprzeczna, przy której nastąpiło zarysowanie styku,

$$\Delta_{11} = \frac{1}{E_p A_p} + \frac{1}{E_n A_n} + \frac{w_0^2}{E_p J_p + E_n J_n}.$$

$E_p, A_p, J_p$  – moduł sprężystości betonu, pole przekroju i moment bezwładności warstwy elementu pierwotnego,

$E_n, A_n, J_n$  – moduł sprężystości betonu, pole przekroju i moment bezwładności warstwy betonu uzupełniającego,

$b_j$  – szerokość przekroju w rozpatrywanym punkcie,

$w_0$  – odległość między środkami ciężkości warstw.

Obliczone wartości porównano z naprężeniami rysującymi styk. Opierając się na pracy [4] za podstawę obliczenia naprężeń rysujących styk przyjęto zmodyfikowany wzór normowy [9] pozwalający na obliczenie naprężeń odpowiadających nośności styku na ścinanie. Modyfikacja wzoru polegała na uwzględnieniu faktu, że w chwili zarysowania styku naprężenia w zbrojeniu zszywającym  $\sigma_{s,j(cr)}$  w przypadku gładkiej powierzchni styku nie przekraczają wartości  $0,15 f_{ywd}$ :

$$\tau_{Rd,j(cr)} = k_T f_{ctm,min} + \mu \sigma_N + \rho_j \sigma_{s,j(cr)} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \quad (2)$$

gdzie:

$k_T$  – współczynnik zależny od szorstkości płaszczyzny styku, ( $k_T = 0,91$ ),

$f_{ctm,min}$  – średnia wytrzymałość na rozciąganie słabszego z łączonych betonów,

– współczynnik tarcia ( $=0,6$ ),

$\sigma_N$  – naprężenia normalne do powierzchni styku,

$\rho_j$  – stopień zbrojenia styku,




$\sigma_{s,j(cr)}$  – naprężenia w zbrojeniu zszywającym w strefie przystykowej w chwili zarysowania styku,

$\alpha$  – kąt nachylenia zbrojenia zszywającego do powierzchni styku.

Uzyskane wartości zestawiono w tabeli 2.

W przypadku styku usytuowanego na granicy między półką a środkiem uzyskane w badaniach naprężenia rysujące styk były średnio o 23% większe od teoretycznych, w przypadku styku usytuowanego w połowie wysokości przekroju uzyskano wartości zbliżone, a w przypadku usytuowania styku w dolnej części przekroju naprężenia rysujące styk były o 57% mniejsze od teoretycznych.

Tabela 2. Naprężenia styczne w styku przy sile powodującej zarysowanie styku

Seria BT1 styk = 3/4h		Seria BT2 styk = 1/2h		Seria BT3 styk = 1/4h	
					
Teoretyczna	Zbadana	Teoretyczna	Zbadana	Teoretyczna	Zbadana
2,93 MPa	3,75 MPa 3,75 MPa 3,28 MPa	5,22 MPa	5,58 MPa 5,15 MPa brak danych	4,97 MPa	3,18 MPa 3,18 MPa brak danych

#### 4. Wartości naprężeń stycznych w styku w zależności od położenia styku na wysokości belki

W celu pokazania wpływu położenia styku na wartość naprężeń w styku przed jego zarysowaniem obliczono naprężenia styczne w styku belek zespolonych o geometrii odpowiadającej badanym belkom przy sile poprzecznej  $V = 50$  kN. Założono, że styk jest niepodatny (niezarysowany).

Chcąc pokazać wpływ różnicy modułów sprężystości łączonych betonów założono tę różnicę nieco inną niż w badanych belkach. Założono zatem wariantowo:

- wariant I - moduł sprężystości betonu „starego”  $E_p = 32$  GPa i „nowego”  $E_n = 35$  GPa,
- wariant II -  $E_p = 35$  GPa i  $E_n = 32$  GPa.

Obliczenia wykonano także przy założeniu jednakowych modułów sprężystości łączonych betonów. W tym przypadku wyrażenie (2) sprowadza się do klasycznego wzoru pozwalającego na obliczenie naprężeń stycznych na wysokości przekroju:

$$\tau = \frac{V \cdot S(x)}{I \cdot b_i} \quad (3)$$

gdzie:

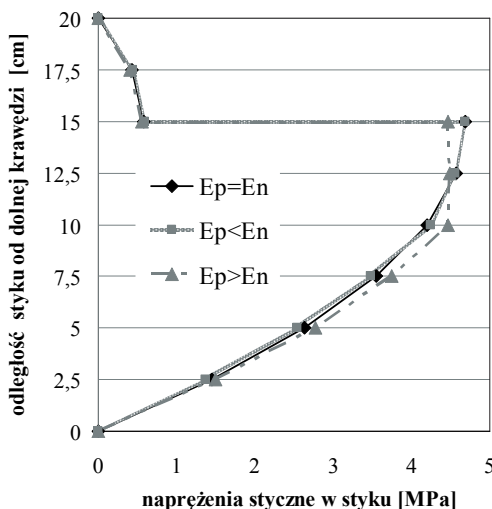
$V$  – siła poprzeczna,

$S(x)$  - moment statyczny względem osi głównej przekroju części przekroju między punktem, w którym oblicza się naprężenia, a krawędzią przekroju,

$I$  - moment bezwładności przekroju,

$b_i$  – szerokość przekroju w rozpatrywanym punkcie.

Na podstawie obliczeń sporządzono wykres zależności naprężeń stycznych przy różnie usytuowanym styku (rys.5). Stwierdzić można, że największe naprężenia w styku elementu o przekroju teowym występują, jeśli styk jest usytuowany między środkiem a półką. Wpływ uwzględnienia różnicy modułów sprężystości jest nieznaczny w przypadku gdy moduł sprężystości betonu „nowego” jest większy niż moduł sprężystości betonu „starego”. Ujawnia się on natomiast w przypadku, gdy moduł sprężystości betonu „nowego” jest mniejszy niż moduł sprężystości betonu „starego”



Rys. 5. Wartość naprężeń stycznych w styku belki zespolonej o przekroju teowym w zależności od położenia styku na wysokości przy różnych wariantach relacji modułów sprężystości prefabrykatu  $E_p$  i betonu nowego  $E_n$ .

## 5. Podsumowanie

Przedstawione w pracy wyniki badań i analiz można podsumować następująco:

1. Badane belki o przekroju teowym zniszczyły się na ścinanie przy lokalnym zarysowaniu styku.
2. W badaniach zaznaczył się wpływ położenia styku zarówno na wartość siły rysującej styk jak i na obraz zarysowania styku. W przypadku styku usytuowanego między półką a środkiem najpierw pojawiła się rysa ukośna, rysa w styku stanowiła jej kontynuację, natomiast gdy styk usytuowany był w dolnej lub środkowej części środka rysa w styku połączyła dwie sąsiednie rysy ukośne, które wcześniej przecięły styk.
3. Istotny wpływ różnicy modułów sprężystości łączonych betonów na wartość naprężeń w styku występuje, gdy moduł sprężystości betonu „starego” jest większy niż moduł betonu „nowego” i ujawnia się głównie na wysokości środka.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników zaprogramowano dalsze badania belek o przekroju teowym mające na celu ustalenie wpływu parametrów styku (likwidacja przyczepności, stopień zbrojenia). Zaplanowano także analizy zachowania się takich belek metodą elementów skończonych.

### Informacje dodatkowe

Mgr inż. Łukasz Jabłoński jest stypendystą projektu "Kwalifikacje dla rynku pracy - Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy" współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Mr. Łukasz Jabłoński, participant of the project: "Qualifications for the labour market - employer friendly university", co financed by European Union from European Social Fund.

## Literatura

- 1 Cholewicki A.: Konstrukcje zespolone z prefabrykatów, Prace Naukowe ITB, Warszawa 2001
- 2 Gohnert M.: Proposed theory to determine the horizontal shear between composite precast and In situ concrete. *Cement and Concrete Composites* 22 (2000), str. 469-476
- 3 Gromysz K.: Badania żelbetowych płyt warstwowych obciążonych doraźnie, cyklicznie i kinematycznie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2013
- 4 Halicka A.: Studium stanu naprężeń i odkształceń w płaszczyźnie styku i strefie przypodporowej elementów zespolonych z udziałem betonów skurczowych i ekspansywnych, Wydawnictwo uczelniane, Lublin 2007
- 5 Hegger J., Görtz S.: Nachträglich ergänzte Querschnitte mit horizontaler Fuge nach DIN 1045-1. *Beton- und Stahlbetonbau* 98, Heft 5/2003, str. 277-284
- 6 Sadowska-Buraczewska B.: Zginane belki żelbetowe wzmocnione betonami nowej generacji, Materiały IX Konferencji naukowej „Konstrukcje zespolone”, Zielona Góra 2011, str. 267-274
- 7 Tan K. H., Guan L. W., Lu X., Lim T. Y.: Horizontal Shear Strenght of Indirectly Loaded Composite Concrete Beams, *ACI Structural Journal/July-August 1999*, str. 533-538
- 8 Wilczyński R.: Konstrukcje Zespolone, Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone - Wersja finalna, pod red. B. Lewickiego, ITB, Warszawa 2004, str. 193-207
- 9 PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2:2008. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1 Reguły ogólne i reguły dla budynków

## Influence of the interface location at the height of composite reinforced concrete elements on the interface crack limit state

Łukasz Jabłoński

*Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Lublin University of Technology, e-mail: l.jablonski@pollub.pl,*

**Abstract:** In this paper the results of the research of T-shape cross-section beams with differently located interface are presented. The cracks pattern and the value of the force causing the interface cracking are analysed. Moreover, the influence of the interface location and the difference of the elastic moduli of joint materials on the stress level in the interface were also analysed.

**Keywords:** concrete composite beams, T-shape cross-sections, interface, delamination