Grzegorz GREMZA^{*} Politechnika Śląska, Gliwice

ODKSZTAŁCALNOŚĆ POŁĄCZEŃ ZESPOLONYCH BETON - BETON

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań odkształcalności połączeń zespolonych typu beton – beton, wykonanych na oryginalnym stanowisku badawczym. Wykorzystując uzyskane wyniki, przeprowadzono uproszczoną ocenę wpływu podatności styku na pracę statyczną elementu zespolonego.

FLEXIBILITY OF JOINT BETWEEN OLD AND NEW CONCRETE

Summary. The selected results of experimental works on concrete composite members were presented. There were the original test arrangement and the test specimens described. The investigations on flexibility of joint were conducted. There were definition and values of coefficient of flexibility c given and the computational example was made.

1. Wstęp

W żelbetowych konstrukcjach zespolonych jednym ze specyficznych zagadnień jest prawidłowa ocena nośności i odkształcalności styku pomiędzy elementem prefabrykowanym a betonem uzupełniającym. Przedwczesna utrata nośności styku może bowiem spowodować zniszczenie całego elementu jeszcze przed utratą nośności na zginanie. Ponadto, podatność połączenia może wpływać na stan naprężeń, przemieszczeń i odkształceń elementu. Jest to zagadnienie interesujące zwłaszcza wtedy, gdy praca styku nie ma charakteru liniowego (por. prace [5], [6]).

Dotychczas powstało dość wiele publikacji, dotyczących zmian zachowania się styku w funkcji obciążenia, głównie w odniesieniu do konstrukcji stalowo-betonowych. Mniej badaczy interesowało się natomiast ewentualnym wpływem zmian sztywności połączenia

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Starosolski

prefabrykatu z betonem uzupełniającym na pracę statyczną żelbetowego elementu konstrukcyjnego. W związku z tym wydawało się pożyteczne doświadczalne określenie podatności i nośności styku prefabrykatu z betonem uzupełniającym, przydatne do analizy elementów konstrukcyjnych. Postanowiono dokonać tego na specjalnie zaprojektowanych, wyodrębnionych elementach zespolonych, których powierzchnię styku ukształtowano w analogii do powierzchni prefabrykatów. Stworzono w tym celu własne, oryginalnie opracowane stanowisko badawcze.

2. Własne badania styku beton - beton

2.1. Stanowisko badawcze, mierzone wielkości

Planując badania, starano się uzyskać możliwie równomierny rozkład obciążenia przecinającego wzdłuż styku. W tym celu zaprojektowano i wykonano specjalne stalowe ramiona, za pomocą których przekazywano siłę obciążającą do zewnętrznych powierzchni badanych elementów. Ramiona te miały zapewnić równomierny rozkład obciążenia przecinającego wzdłuż styku dzięki swojej dużej sztywności oraz zębom przekazującym obciążenie wzdłuż przeciwległych boków elementu. Ramiona te realizowały jednocześnie umiejscowienie w płaszczyźnie zespolenia kierunku działania zewnętrznej siły obciążającej. Obydwa ramiona spięte zostały czterema ściągami ø25 (w przypadku badania na prezentowanych elementach nie wprowadzano wstępnego napięcia, tak więc działanie ściągów było bierne). Widok złożonego stanowiska przedstawiono wraz z opisem na rysunku la.

Pomiaru siły obciążającej F dokonywano na podstawie wskazań oprzyrządowania prasy, a pomiaru sił w ściągach F_{hl} do F_{h4} za pomocą siłomierzy własnej produkcji. Pomiary przemieszczeń równoległych i prostopadłych do powierzchni styku (wielkości h i ν) prowadzono za pomocą czujników indukcyjnych (por. też [3]). Schemat statyczny i mierzone wielkości sił pokazano na rysunku 1b.

2.2. Elementy badawcze

Elementy badawcze wykonywano w postaci zespolonych bloków betonowych o wymiarach 900×460×280 mm (por. rys. 2). Płaszczyznę zespolenia umiejscawiano w taki sposób, aby po złożeniu stanowiska pokrywała się ona z płaszczyzną działania siły obciążającej. Przez powierzchnię zespolenia przebiegały w części elementów pręty zbrojenia

zszywającego. Na dwóch bokach elementu wykonywano specjalne odciski, dopasowane do wcześniej wspomnianych zębów ramion.

W elementach zastosowano cztery rodzaje powierzchni styku (por. rys. 2): "gładką od formy" (oznaczenia 0/0/0 i 0/0/0-z), "naturalnie szorstką", pozostawioną po zawibrowaniu (oznaczenia N/0/0 i N/0/0-z), "dyblowaną", 5×5 co 40 mm (oznaczenie 5/5/40) oraz "dyblowaną", 50×5 co 100 mm (oznaczenie 50/5/100). Wybrane spośród badanych przez autora elementy zestawiono w tablicy 1.



- Rys. 1. Stanowisko do badania elementów obciążonych siłą przecinającą: a) widok, b) schemat statyczny i mierzone wielkości; 1 – ramię obciążające, 2 – element badawczy, 3 – ściąg, 4 – siłomierz na ściągu; h i v – pomiar przemieszczenia równoległego i prostopadłego do styku
- Fig. 1. Test arrangement: a) view, b) static system; h and v tangent and normal displacement





3. Wybrane wyniki badań

W niniejszej pracy, a wcześniej w pracy [3], usiłowano liczbowo określić podatność styku, przypisując jej wartości obliczone według wzoru (1):

$$c = \frac{\tau}{h},\tag{1}$$

w którym:

c - współczynnik opisujący "podatność" w zadanych warunkach badania,

h – przemieszczenie w styku równoległe do płaszczyzny zespolenia,

 τ – wartość siły obciążającej na jednostkę powierzchni styku – naprężenie ścinające:

τ

$$=\frac{F}{A_c},$$
 (2)

przy czym A_c – pole powierzchni styku.





Fig. 3. Course choose: a) coefficient of flexibility c - versus shear stress τ , b) coefficient c - versus displacement h

Analizując zależności pomiędzy wartościami naprężenia stycznego τ a współczynnikiem c (por. rys. 3a), oraz pomiędzy wartością współczynnika c z wartościami przemieszczeń (por. rys. 3b), można zauważyć, że w początkowej fazie obciążania elementu wartość współczynnika c zazwyczaj oscylowała w granicach od 45 do 65 MPa/mm. W drugim etapie obciążania elementu wartość współczynnika c gwałtownie malała, co jednak niekoniecznie oznaczać musiało utratę nośności.

Tablica 1

Oznaczenie elementu	Przekrój elementu	Procent rozciąganego zbrojenia zszywającego	τ _{max} MPa	h (T _{max}) mm	C (T _{max}) MP a/mm
B/0/0/0-1	b D pow. gładka	brak zbrojenia	1,431	0,031	45
B/0/0/0-2			2,868	0,102	28
B/0/0/0-3			1,508	0,036	42
A/0/0/0			2,444	0,065	37
B/0/0/0-z1	b pow. gładka	ρ = 0,035	0,901	0,020	46
B/0/0/0-z2			2,262	0,239	10
B/0/0/0-z3			2,881	0,158	18
C/0/0/0-z1	b Z pow. gładka	ρ=0,105	3,756	2,692	1,4
C/0/0/0-z2			3,820	1,210	3,2
C/0/0/0-z3		ρ = 0,186	3,150 (3,109)	0,172 (0,636)	18 (4,9)
C/0/0/0-z4			4,480	2,084	2,2
B/N/0/0-1	b Zpow. naturalna	brak zbrojenia	2,848	0,188	15
B/N/0/0-2			2,938	0,147	20
B/N/0/0-3			1,618	0,193	8,3
C/N/0/0-1			1,692	0,024	71
A/N/0/0			3,556	0,128	28
B/N/0/0/-z2	b Devenaturalna	ρ = 0,035	1,672	0,495	3,3
B/N/0/0/-z3			1,846	0,634	2,9
B/N/0/0/-z4			1,629	0,033	48
C/N/0/0-z1	b D pow naturalna	ρ=0,105	2,701	2,158	1,3
C/N/0/0-z2			3,672	3,453	1,1
C/N/0/0-z3	b Dipow. naturalna	ρ=0,124	4,125	2,487	1,7
C/N/0/0-z4			4,517 (4,225)	1,091 (1,930)	4,1 (2,2)
B/5/5/40-1	40 5 40	brak zbrojenia	3,136	3,084	1,0
B/5/5/40-2			3,498	2,174	1,6
A/5/5/40			2,889	2,537	1,1
B/50/5/100-1	50,50	brak zbrojenia	3,615	1,382	2,6
B/50/5/100-2			3,525	3,668	1,0

W tablicy 1 zestawiono wartości współczynnika *c* i wartości poślizgów *h* w chwili osiągnięcia największego naprężenia stycznego (τ_{max}) w trakcie badania. Można zauważyć, że wartości współczynnika *c* w stanie granicznym nośności były tym mniejsze, im:

- a) Element miał bardziej nierówną powierzchnię (największe średnie wartości c w stanie granicznym nośności odnotowano w elementach z powierzchnią zespolenia gładką od formy, a najmniejsze w elementach z powierzchnią dyblowaną).
- b) Powierzchnia zespolenia była mocniej zazbrojona zbrojeniem zszywającym (wyraźny wpływ zbrojenia zaznaczał się przy stopniu zbrojenia rozciąganego 0,105%).

4. Analiza podatności - przykład obliczeniowy

W badaniach, w początkowym etapie pracy elementów, wartość współczynnika *c* mieściła się najczęściej w granicach od 45 do 65 MPa/mm. W momencie osiągnięcia ekstremum nośności wartość współczynnika *c* w elementach o powierzchni styku gładkiej i naturalnie szorstkiej, niezbrojonej i zbrojonej zbrojeniem o mocy 0,035% (rozciągane) wahała się od 3 do 48 MPa/mm. W elementach z powierzchnią dyblowaną lub w odpowiedni sposób zazbrojoną zbrojeniem zszywającym wartość *c* wynosiła od 1,0 do 4,9 MPa/mm.

W celu dokonania wyrywkowej oceny wpływu podatności styku o wartości określonej na podstawie badań wykonano obliczenia za pomocą dostępnego modelu analitycznego. Do obliczeń przyjęto element o gabarytach jak na rysunku 4. Obliczenia wykonano przy założeniu wzajemnego utwierdzenia warstw na końcach elementu, co może być na przykład zrealizowane przez zakotwione w wieńcu zbrojenie. Do obliczenia wartości siły rozwarstwiającej dostosowano rozwiązania, przedstawione między innymi przez autorów prac [1] i [2], przyjmując postać wzoru (belka swobodnie podparta, obciążona siłą skupioną):

$$T = \frac{Fa}{a_1(E_1I_1 + E_2I_2)} \left(0.5 \frac{ch(\lambda l)}{sh(\lambda l)} sh(\lambda s) - 0.5 \frac{sh(\lambda(l-s))}{sh(\lambda l)} + 0.5 \right),\tag{3}$$

w którym:

$$a_1 = \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{a^2}{E_1 I_1 + E_2 I_2}, \ \lambda = C_z a_1 = \frac{T \cdot 1}{h} a_1 = \frac{\tau \cdot b \cdot 1}{h} a_1$$
(3a) (3b)

 E_1 , E_2 , I_1 , I_2 , A_1 , A_2 , – moduły sprężystości, momenty bezwładności i pola przekroju warstw elementu, a – odległość środków ciężkości warstw, F – siła obciążająca w środku elementu, s – odległość od środka rozpiętości elementu, l – rozpiętość elementu, T – siła rozwarstwiająca na jednostkę długości styku. Obliczenia wykonano przy wartości współczynnika $C_z = 23,6\cdot10^6$ kN/m, $C_z = 1,18\cdot10^6$ kN/m oraz pośredniej $C_z = 5,9\cdot10^6$ kN/m. Odpowiada to współczynnikom c = 40 MPa/mm, c = 2 MPa/mm i c = 10 MPa/mm, przy przyjęciu szerokości styku 0,59 m i długości odniesienia równej 1 metr. Ponadto, w obliczeniach przyjęto moduł sprężystości dla betonu 27 GPa i dla stali 205 GPa.



- Rys. 4. Geometria obliczanej belki warstwowej oraz rozkład siły rozwarstwiającej wzdłuż styku przy różnej wartości współczynnika podatności i dla elementu monolitycznego
- Fig. 4. Geometry of computed beam and shear force along composite joint for various values of flexibility factor

Rozkłady siły rozwarstwiającej dla różnych podatności styku oraz (dla porównania) rozkład siły rozwarstwiającej dla elementu monolitycznego o takich samych gabarytach przedstawiono na rysunku 4. Można zauważyć, że przy największej z zadanych wartości współczynnika podatności rozkład siły rozwarstwiającej niemalże nie różnił się od rozkładu w belce monolitycznej. Z kolei, przy najmniejszej z wartości tego współczynnika widoczna jest wyraźna różnica pomiędzy rozkładami tejże siły dla belki monolitycznej i dla belki o dużej podatności styku.

Całkując wartości siły rozwarstwiającej wzdłuż styku, można stwierdzić, że w przypadku belki ze stykiem podatnym c = 2 MPa/mm ($C_z = 1,18\cdot10^6$ kN/m), poprzez styk przenoszona jest siła o wartości 436,3 kN, w porównaniu do siły 641,0 kN, przenoszonej poprzez styk w przypadku belki ze stykiem praktycznie niepodatnym c = 40 MPa/mm ($C_z = 23,6\cdot10^6$ kN/m). Powoduje to przekazywanie brakującej części siły na koniec belki, w związku z czym pojawić się może znaczna siła działająca na zakotwione na podporze zbrojenie. Przykład tak ukierunkowanych badań przedstawili autorzy pracy [4].

5. Wnioski i podsumowanie

Analizując przedstawione dane i przykład obliczeniowy zamieszczony w niniejszej pracy, można stwierdzić, że:

- Potwierdza się powszechny pogląd, iż przez większość poziomów obciążenia belkę lub płytę zespoloną można i należy traktować jako element monolityczny.
- W przypadku elementów ze stykiem naturalnie szorstkim, odpowiednio zazbrojonym zbrojeniem wewnętrznym (w prezentowanych badaniach nie mniej niż 0,105% licząc zbrojenie rozciągane), redystrybucja może występować na krótko przed osiągnięciem rzeczywistej nośności. Pozwala to na przegrupowanie sił wzdłuż styku i opóźnienie zniszczenia elementu. (W badanych elementach przecinanych poślizg w momencie osiągnięcia nośności wahał się w granicach 1,9 do 3,5 mm (c = 1,1 do 2,2 MPa/mm), jednak nawet przy większych niż te przemieszczeniach nie odnotowywano jeszcze dużego spadku nośności).
- W przypadku elementów bez wewnętrznego zbrojenia, ale o powierzchni dyblowanej, także może zachodzić redystrybucja sił wzdłuż styku w warunkach biernego ograniczenia odkształceń rozwierającej się w tym styku rysy. Zdaniem autora, ewentualny zapas nośności wynikający z redystrybucji w tego typu sytuacji (o ile istnieje), powinien być traktowany jedynie jako ukryty zapas bezpieczeństwa.

LITERATURA

- 1. Furtak K: Mosty zespolone. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa Kraków 1999.
- 2. Kubik J.: Mechanika konstrukcji warstwowych. Wydawnictwo T i T, Opole 1993.
- Gremza G.: Odkształcalność połączeń zespolonych beton beton w świetle badań. VII KN Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra, 2005, s. 95-107.
- Gromysz K., Starosolski W.: Rozdział sił w konstrukcjach zespolonych pomiędzy zespoleniem a zakotwionym na podporze zbrojeniem, VII KN Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra, czerwiec 2005, s. 145-154.
- Tur W., Szałobyta T., Król M., Halicka A.: Obliczanie styków elementów zespolonych z betonu zwykłego i ekspansywnego z uwzględnieniem analizy nieliniowej. Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 2001, s. 140-143.
- 6. Yoshikawa H., Wu Z., Tanabe T.: Analytical model for shear slip of cracked concrete. Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 4, April 1989, p. 771-788.