ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 101 Nr kol. 1595

Grzegorz GREMZA*
Politechnika Śląska

BETONOWE ELEMENTY ZESPOLONE Z PODATNĄ PŁASZCZYZNĄ POŁĄCZENIA - ZAGADNIENIA I BADANIA

Streszczenie. Przedstawiono w skrócie zagadnienia związane z wpływem podatności ścinanego połączenia dwóch betonów na rozkład sił rozwarstwiających w styku oraz współpracę zbrojenia zszywającego w elementach zespolonych. Wykorzystano wybrane prace eksperymentalne i teoretyczne, dotyczące podatności połączenia w konstrukcjach zespolonych ze stykami beton – beton.

CONCRETE COMPOSITE MEMBERS WITH FLEXIBLE PLANE OF JOINT

Summary. The influence of flexibility and slippage in concrete composite joints on shear stresses distribution in concrete composite memebers was described. The selected results of experimental and theoretical research works on flexibility of concrete – to – concrete joints was presented.

1. Wprowadzenie

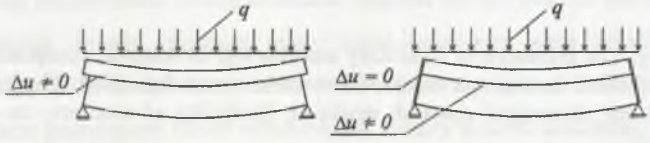
Konstrukcje zespolone różnego typu są od wielu lat stosowane w budownictwie powszechnym, mostowym i przemysłowym. Poszczególne części składowe elementów tych konstrukcji łączone są ze sobą w sposób umożliwiający ich wzajemną współpracę przy przenoszeniu obciążeń. Jako przykład można przedstawić połączenie prefabrykowanej płyty lub belki z betonem uzupełniającym. Jednym z czynników wpływających na zachowanie się konstrukcji zespolonej pod obciążeniem jest nośność i odkształcalność styku zespolonego. Podatność połączenia wpływa na rozkład sił rozwarstwiających na długości elementu, jak również na zmianę rozkładu naprężeń w przekroju w czasie lub w funkcji obciążenia. W dalszej części artykułu podjęto próbę przedstawienia zagadnień związanych z podatnością

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

styku w konstrukcjach zespolonych typu płytowego i belkowego, a także przedstawiono rezultaty niektórych badań podatności styku wykonanych na różnych elementach próbnych ze stykami typu beton - beton.

2. Wpływ podatności styku na pracę połączenia

Jak wspomniano we wstępie, podatność płaszczyzny zespolenia wpływa na rozkład sił wewnętrznych i przemieszczeń w elemencie. Rozwiązanie teoretyczne problemu przedstawił między innymi autor pracy [1]. Uzyskał on rozwiązanie dla belek swobodnie podpartych, składających się z dwóch warstw sprężystych oddzielonych warstewką z poślizgami. Rozkład naprężeń i odkształceń zależy od warunków występujących na końcach pręta (rys. 1). Autor zaznaczył, że podane rozwiązanie można uogólnić na zadanie lepkosprężyste, należy jednak liczyć się z pewnymi trudnościami natury matematycznej. W przypadku elementów żelbetowych należy wspomnieć również o prawdopodobnie niepomijalnych skutkach zarysowania, zwłaszcza gdy złącze znajduje się w strefie rozciąganej elementu. Podobne rozwiązanie (bez wyprowadzenia) zacytował autor pracy [2] na podstawie [3].



Rys. 1. Warunki brzegowe dla belek zespolonych: z lewej belka z poślizgami na końcach, z prawej z końcami wzajemnie utwierdzonymi
Fig. 1. Boundary conditions at the endpoint of composite beams: on left: with slippage, on right: without slippage at the end of the beam

W celu wykonania obliczeń na podstawie podobnych do podanych w [1], [2] i [3] rozwiązań niezbędna jest znajomość współczynnika podatności, który można zdefiniować następująco:

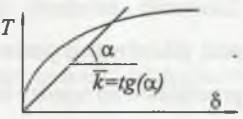
$$\bar{k} = \frac{T}{\delta}, \tag{1}$$

w którym:

T - siła rozwarstwiająca na jednostkę długości styku,
δ - wzajemne przemieszczenie warstw.

W przypadku nieliniowej charakterystyki złącza (krzywa naprężenie - przemieszczenie) powstaje dodatkowo problem sposobu przyjęcia zastępczego, siecznego współczynnika podatności. (rys. 2). Wpływ takiego sposobu przybliżenia na rozbieżność pomiędzy rezultatami

obliczeń a rzeczywistym rozkładem odkształceń i naprężeń zależeć będzie w dużym stopniu od sposobu obciążenia elementu. Prace nad zastosowaniem nieliniowego modelu poślizgu do oceny wpływu zjawisk reologicznych na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcjach zespolonych stalowo - betonowych prowadził autor pracy [4]. Modele opracowane dla tego rodzaju konstrukcji mogą zostać dostosowane również do zespolonych konstrukcji betonowych.



Rys. 2. Sieczny współczynnik "k" podatności połączenia
Fig. 2. A secant coefficient "k" of joint flexibility

W przypadku występowania wieńca wraz z zakotwionym w nim zbrojeniem rozkład naprężeń i przemieszczeń będzie prawdopodobnie znacząco różny, niż dotychczas przyjmowano przy projektowaniu połączeń. Analizę numeryczną elementu warstwowego z wieńcami wykonał autor pracy [5]. Zamodelował on warstwę o skończonej grubości (5 mm) pomiędzy prefabrykatem a betonem uzupełniającym, nadając jej różne wartości współczynnika odkształcenia postaciowego G_s (wzór 2):

$$G_s = G / n, \tag{2}$$

w którym:

$G = E/(2(1-\upsilon))$, n - parametr empiryczny o wartości pomiędzy 1 a ∞.

Analiza przeprowadzona na modelu numerycznym wykazała duży wpływ zmian podatności styku na rozkład sił wewnętrznych w płaszczyźnie zespolenia. Autor analizy wskazał ponadto na konieczność przeprowadzenia badań uzupełniających w celu określenia fizycznych parametrów podatności warstwy stykowej.

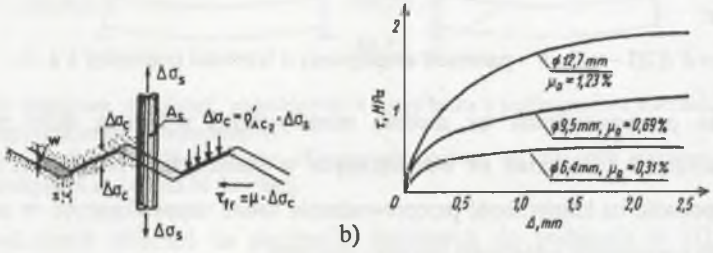
3. Badania doświadczalne podatności styku

Dotychczas przeprowadzono wiele badań dotyczących nośności i podatności styku w konstrukcjach zespolonych. Bogaty przegląd prac wykonanych w Polsce i na świecie przed 1986 rokiem zawiera praca [6], sporo informacji zawierają także monografie [7] i [8]. Wykonywano również prace doktorskie poruszające m.in. problematykę podatności styku [9], [10]. Nowsze informacje z tego zakresu można znaleźć w monografii [11].

3.1. Badania próbek na przecinanie

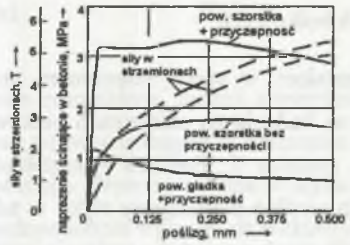
Badanie nośności na przecinanie oraz podatności styku przeprowadzano na bardzo różnorodnych typach próbek. Dość szeroki przegląd elementów próbnych wraz z oceną ich przydatności przedstawiono w pracach [7], [12]. W żadnej z dotychczas stosowanych metod nie uzyskiwano jednak czystego przecinania, jak również żadne z badań tego typu nie zostało ujęte w przepisach normowych. Zależność obciążenie - przemieszczenie badano zarówno na elementach wstępnie zarysowanych, jak również posiadających początkową przyczepność. Sposoby aproksymacji wyników przedstawiono między innymi w pracach [13], [14].

W przypadku badania elementów wstępnie zarysowanych dążono głównie do określenia wpływu tarcia (rys. 3a), a także tak zwanego efektu klockującego. Wykres ilustrujący rezultaty badań na elementach pozbawionych przyczepności i dodatkowo powleczonych smarem, o różnym stopniu zbrojenia [15], [7], przedstawiono na rysunku 3b. Zależność obciążenie - przemieszczenie w styku w zależności od wartości docisku prostopadłego do płaszczyzny styku dla elementu wstępnie zarysowanego można znaleźć między innymi w pracy [16]. Badano także zależność pomiędzy charakterystyką naprężenie - poślizg w styku a szerokością rysy powstałej w płaszczyźnie połączenia [17]. Wpływ naprężeń rozciągających na odkształcenia przy ścinaniu betonu badali między innymi autorzy pracy [18].



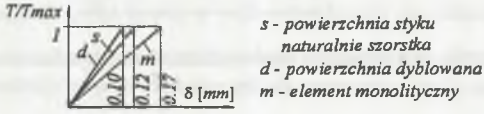
Rys. 3. Przenoszenie siły ścinającej przez tarcie a), naprężenia styczne efektu klockującego b)
Fig. 3. Qualitative description of friction mechanism a), shear stresses of dowel action b)

Wykres obrazujący zależności pomiędzy przemieszczeniami w styku elementu próbnego z początkową przyczepnością a naprężeniami w betonie i zbrojeniu uzyskane przez autora często cytowanej pracy [19] pokazano za [20] na rysunku 4.



Rys. 4. Wartości naprężeń w styku betonowym i zbrojeniu w funkcji przemieszczenia według [19]
Fig. 4. Strain stresses in concrete joint and tension of reinforcement versus displacement [19]

Z prac krajowych należy wymienić [9], w której stwierdzono liniowy przebieg zależności siła - przemieszczenie aż do utraty przyczepności. Wartość poślizgu wahała się od 0.10 do 0.15 mm dla powierzchni naturalnie szorstkiej i od 0.07 do 0.11 mm dla elementów ze stykiem dyblowym. Największe odkształcenie uzyskano jednak dla elementu monolitycznego - od 0.13 do 0.18 mm. Proste regresji przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Zależność obciążenie - przemieszczenie dla elementów bez zbrojenia według [9]
Fig. 5. Relationship between load and displacement for the members without reinforcement [9]

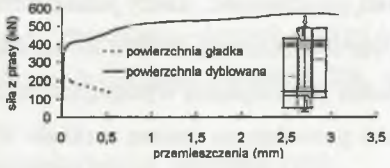
Autor pracy [9] wprowadził także pojęcie modułu sztywności styku, który zdefiniował następująco:

$$k = \Delta T / \Delta V , \tag{3}$$

gdzie:

ΔT - przyrost naprężeń stycznych,
ΔV - przyrost przemieszczenia na kierunku działania siły.

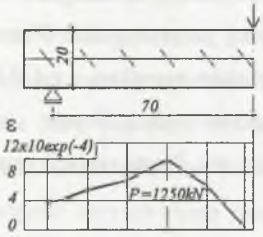
Krzywe, ilustrujące rezultaty dwóch badań, w których brał udział autor niniejszego artykułu, przedstawiono na rysunku 6. Opis tych badań wraz z wnioskami zamieszczony zostanie w osobnych publikacjach.



Rys. 6. Zależność obciążenie - przemieszczenie dla elementów bez zbrojenia
Fig. 6. Relationship between load and displacement for the members without reinforcement

3.2. Badania na elementach belkowych

Badanie przebiegu odkształceń w styku zespolonym prowadził między innymi autor pracy [10]. Przeprowadzał on badania na elementach belkowych o proporcjach i sposobie obciążenia pokazanym na rysunku 7. Pomiaru odkształceń dokonywał on przy użyciu tensometrów umieszczonych wzdłuż płaszczyzny styku w taki sposób, aby ich wydłużenie następowało na kierunku głównych naprężeń rozciągających. Na podstawie pomierzonych odkształceń spodziewano się uzyskać przybliżony rozkład naprężeń rozwarstwiających. Przykładowy wykres odkształcenia pokazano również na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg odkształceń na kierunkach głównych dla elementów bez zbrojenia
Fig. 7. Strain on direction of principle stress for the members without reinforcement

Pomiaru poślizgu w płaszczyźnie zespolenia dokonywać można także poprzez pomiar przemieszczeń na końcach elementu. Wykresy uzyskane na podstawie wykonanych w ten sposób pomiarów przedstawiono w pracy [21].

4. Przemieszczenie w styku a współpraca zbrojenia zszywającego

Dotychczas część badaczy wskazywała na brak współpracy zbrojenia zszywającego przed zerwaniem przyczepności ze względu na zbyt małe przemieszczenia w styku betonowym (do 0.2 mm). Wnioski takie wysuwał między innymi autor pracy [20] na podstawie wyników badań własnych i [19]. Niektórzy, na przykład autor pracy [22], wyrażali wątpliwości co do słuszności takiego stwierdzenia. W niektórych badaniach odnotowywano większe przemieszczenia przed utratą przyczepności, należy jednak zaznaczyć, że znaczny wpływ na uzyskiwane wyniki mają wartości bocznego docisku lub rozciągania, wynikające z różnych przyczyn. W przypadku braku przyczepności występujące znaczne przemieszczenia wzdłuż styku przed utratą nośności pozwalają na zmianę rozkładu sił w poszczególnych prętach zbrojenia zszywającego w porównaniu do rozkładu początkowego.

5. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując dotychczasowe rozważania, można stwierdzić, ze zagadnienie wpływu podatności zespolenia na rozkład sił wewnętrznych w elemencie zespolonym nadal stanowi obszerne pole do działań badawczych. Przemieszczenia w styku występujące jeszcze przed utratą przyczepności mogą prawdopodobnie wpłynąć na rozkład naprężeń rozwarstwiających na długości elementu. Wiadomo również, że niebagatelny wpływ na wartość odkształceń i przemieszczeń w stanie granicznym nośności odgrywa sposób ukształtowania styku oraz wartość naprężeń prostopadłych do płaszczyzny zespolenia. Badania doświadczalne na elementach belkowych potwierdzają, że rozkład odkształceń uwarunkowany jest podatnością połączenia, występują jednak dość niewielkie różnice, jeśli chodzi o miejsce występowania ekstremum przemieszczeń poziomych w styku. Znając rezultaty analiz teoretycznych i prac doświadczalnych, poszukiwać można zależności pomiędzy wynikami uzyskanymi na próbkach przecinanych a zachowaniem się płaszczyzny zespolenia w elemencie konstrukcyjnym. Sposób zastosowania danych uzyskanych z prób przecinania na różnego typu próbkach do obliczania elementów konstrukcyjnych stanowi temat do osobnych, obszernych rozważań.

LITERATURA

1. Kubik J.: Mechanika konstrukcji warstwowych. Wyd. TiT, Opole 1993.
2. Furtak K.: Mosty zespolone. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa - Kraków 1999.
3. Czudek H.: Teoria mostów zespolonych. Konferencja Naukowo -Techniczna "Mosty Zespolone", Referaty generalne, Kraków, maj 1998.
4. Barańczak J., Bryś G.: Wpływ podatności złączy na stan przemieszczeń i naprężenia w belkach zespolonych. II Konferencja Naukowa "Konstrukcje Zespolone", Zielona Góra, listopad 1989, s. 33 - 38.
5. Starosolski W.: Wpływ zakotwienia zbrojenia w wieńcu na charakter pracy stropów płaskich zespolonych. VI Konferencja Naukowa "Konstrukcje Zespolone", Zielona Góra, czerwiec 2002, s. 281 - 232.
6. Ulańska D., Romanowska A.: Przecinanie - dorobek polskiej inżynierii lądowej w latach 1970 – 1976. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej 208, seria Budownictwo, z.36, Lublin 1990, s. 49 -109.
7. Godycki - Ćwirko T.: Mechanika betonu. Warszawa 1980.
8. Godycki - Ćwirko T.: Ścinanie w żelbecie. Warszawa 1968.

9. Nowak W.: Analiza przecinania styku dwóch betonów. Rozprawa doktorska, Warszawa 1979.
10. Głuszyński E.: Ścinanie w płaszczyźnie połączenia belek zespolonych. Praca doktorska, Poznań 1972.
11. Tur W., Kondratczik A.A.: Rasczet żieliezobietonnych konstrukcij. Briest 2000.
12. Godycki - Ćwirko T.: Jak badać wytrzymałość betonu na przecinanie? Inżynieria i Budownictwo, nr 4, 1970.
13. Tsoukantas S.G., Tassios T.P: Shear resistance of connections between reinforcement concrete linear praecast elements. ACI Structural Journal, May - June 1989, s. 242 - 249.
14. Yoshikawa H., Wu Z., Tanabe T.: Analitycal model for shear slip of cracked concrete. Journal of Structural Engineering, vol. 115, No. 4, April 1989, p. 771 - 788.
15. Paulay T., Loeber P.J.: Shear by aggregate interlock. ACI SP - 42, 1974.
16. Tassios T, Vintzeleou N: Concrete - to - concrete friction. Journal of Structural Engineering, vol. 113, No. 4, April 1987, p. 832 - 849.
17. Millard S.G., Johnson R.P.: Shear Transfer in cracked reinforcement concrete. Magazine of Concrete Research, vol. 37, No. 130, March 1985.
18. Bhide S. B., Collins A. P.: Influence of axial tension on the shear capacity of reinforced concrete members. ACI Structural Journal, vol. 86, No. 5, Sept - Oct 1989, p. 570 - 581.
19. Hanson N.W.: Horizontal Shear Connections, Portland Cement Association, "Bull", D35, Skokie.
20. Kajfasz S: Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia dwóch betonów. Archiwum Inżynierii Lądowej, tom X, zeszyt 2, Warszawa 1964, s. 235 - 245.
21. Ackermann G., Burkhardt M.: Zum Tragverhalten von Stahlbeton-Verbundtägern mit nachgiebieger Verbundfuge. II Konferencja Naukowa "Konstrukcje zespolone", Zielona Góra, listopad 1989.
22. Głuszyński E.: Zagadnienie ścinania w płaszczyźnie połączenia betonowych elementów zespolonych. ZN Polit. Poznańskiej, Nr 85, seria Budownictwo Lądowe, z. 18, Poznań 1971, s. 5 - 15.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Król

Abstract

The influence of flexibility and slippage in concrete composite joints on shear stresses distribution in concrete composite memebers was described. The selected results of experimental and theoretical research works on flexibility of concrete - to concrete joints was presented.