

## **Udział zbrojenia poprzecznego w nośności na ścinanie - sposobrzeżenia z badań**

**Rafał Ostromięcki**

*Institut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska,  
e-mail: r.ostromecki@il.pw.edu.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów siły przenoszonej przez strzemiona przecinające rysę ukośną. Badania przeprowadzono na belkach jednoprzęsłowych, swobodnie podpartych. Celem badań była ocena udziału siły przenoszonej przez strzemiona w zadanym obciążeniu ścinającym. Stwierdzono także udział zbrojenia podłużnego w przenoszeniu obciążenia w postaci siły prostopadłej do osi prętów. W teoriach obliczeniowych ten czynnik jest zazwyczaj pomijany.

**Słowa kluczowe:** ścinanie, udział zbrojenia poprzecznego, udział betonu

### **1. Wprowadzenie**

Zbrojenie poprzeczne strefy przypodporowej belek odgrywa kluczową rolę w nośności na ścinanie. Jest czynnikiem koniecznym, aby element nie ulegał zniszczeniu wkrótce po pojawieniu się rys ukośnych. Równocześnie nie jest to jedyny czynnik, decydujący o wartości siły granicznej. Obciążenie poprzeczne przenoszone jest bowiem częściowo w postaci naprężeń stycznych w betonowej strefie ściskanej. Swój udział ma także zbrojenie podłużne, przenosząc siły poprzeczną oraz podłużną względem osi. Naprężenia styczne przenoszone są w pewnym zakresie przez zazębienie się ziaren kruszywa dwóch, przeciwległych powierzchni rysy. Dodatkowo w rysie może wystąpić tarcie związane z działaniem podłużnej siły ściskającej, pochodzącej na przykład od sprężenia lub w przypadku niezgodności kąta nachylenia rysy i głównych naprężeń ściskających w betonie.

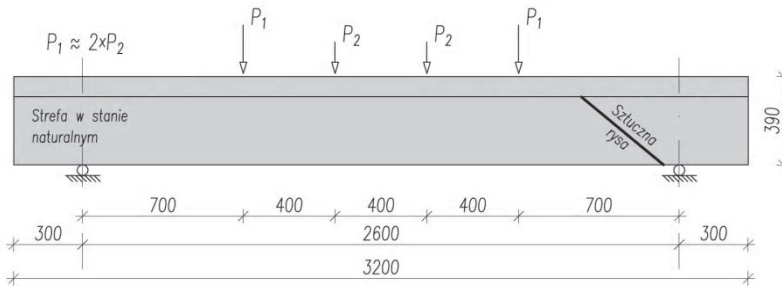
Propozycje obliczeniowe dla ścinania w różny sposób uwzględniają powyższe zjawiska. W teorii klasycznej kratownicy zastępczej (metoda przyjęta w Eurokodzie 2 [1]) całkowicie pomija się wpływ innych czynników niż zbrojenie poprzeczne. Uzupełnienie metody klasycznej, pozwalające na uwzględnienie wymienionych wyżej zjawisk zaproponował Reineck [2], lecz propozycja ta nie upowszechniła się w praktyce. Metoda zmodyfikowana pasma ściskanego [3] (MCFT – ang. modified compression field theory) pozwala w formie ogólnej na uwzględnienie zazębienia się ziaren kruszywa w rysie, tarcia związanego z siłą ściskającą czy zdolności prętów zbrojenia do przenoszenia siły poprzecznej względem ich osi. W praktyce natomiast stosowana jest z pewnymi uproszczeniami, polegającymi między innymi na pominięciu ostatniego z wymienionych czynników (jego uwzględnienie wymagałoby sformułowania dodatkowych związków konstytutywnych). MCFT nie pozwala także na uwzględnienie wpływu naprężeń ścinających w strefie ściskanej betonu. Wpływ na nośność czynników różnych od zbrojenia poprzecznego uwzględniany był także w niestosowanej obecnie metodzie Boryszańskiego. W zaleceniach Model Code 2010 [4, 5] do obliczeń nośności na ścinanie można stosować model klasyczny (w tak zwanym drugim stopniu dokładności) lub metodę MCFT (pierwszy i trzeci stopień

dokładności). W obliczeniach prowadzonych według tej drugiej metody rozróżnia się w nośności udział zbrojenia poprzecznego oraz innych czynników, określonych wspólnym mianem udziału betonu (ang. concrete contribution). Obliczenia według metody klasycznej, w drugim stopniu dokładności, opierają się wyłącznie na uwzględnieniu pracy zbrojenia poprzecznego.

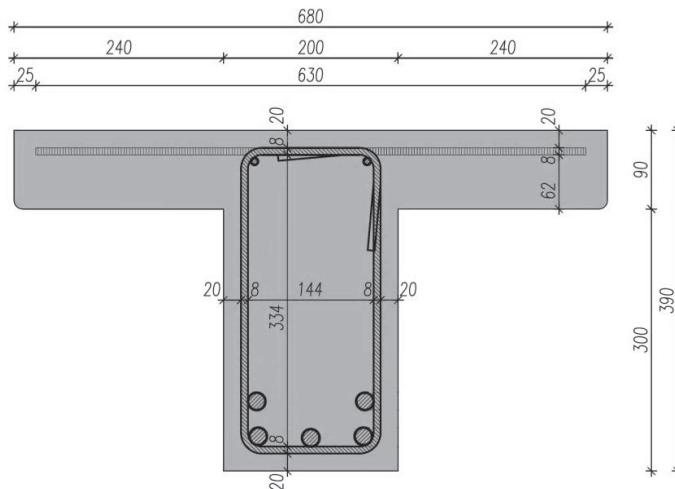
Celem niniejszego referatu jest przedstawienie pewnych spostrzeżeń z badań belek żelbetowych, w których dokonywano pomiarów odkształceń strzemion w miejscu przecięcia z rysą. Pomiarzy te pozwoliły na określenie łącznej siły przenoszonej przez zbrojenie poprzeczne oraz zestawienie ich z wartością obciążenia. Jak się okazuje udział w nośności na ścinanie zjawisk innych niż wpływ zbrojenia poprzecznego może być dość znaczny.

## 2. Badania eksperymentalne

Przedmiot badań stanowiły jednoprzęsłowe, swobodnie podparte belki żelbetowe. Były one obciążane czterema siłami skupionymi, w schemacie statycznym przedstawionym na rys. 1. Belki miały teowy przekrój poprzeczny zgodnie z rys. 2.



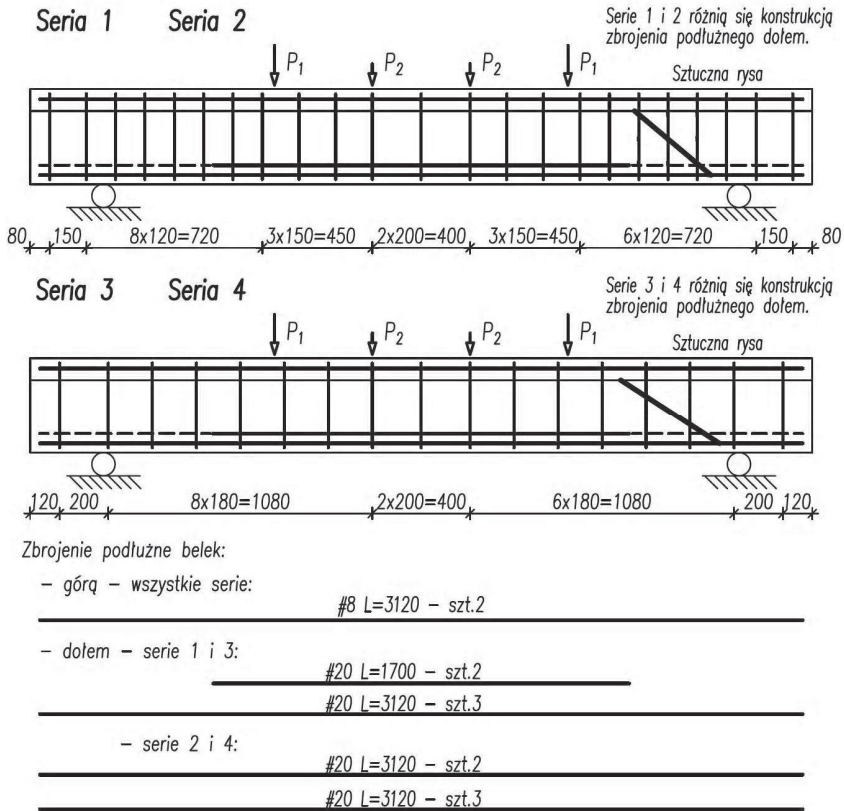
Rys. 1. Schemat statyczny belek w badaniach



Rys. 2. Przekrój poprzeczny belek

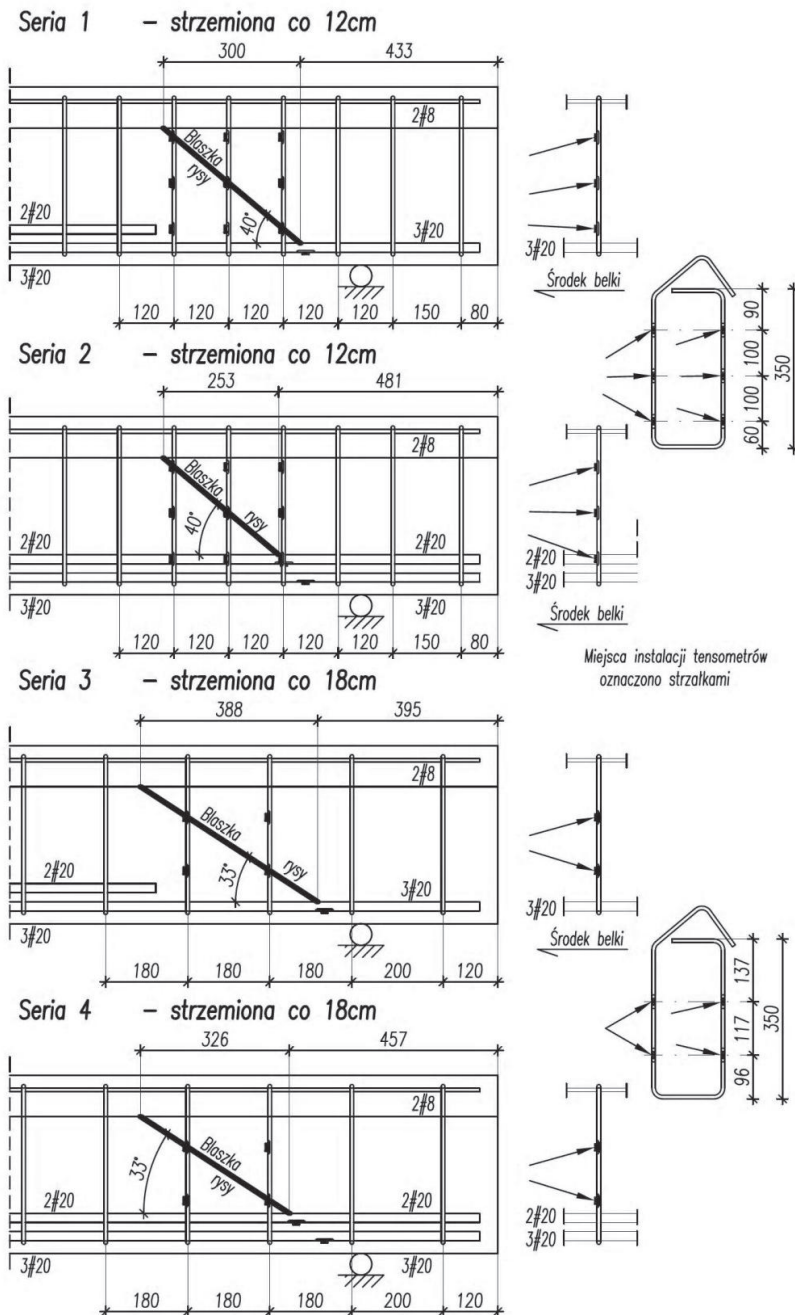
Belki zgrupowano w cztery serie (1÷4), po trzy elementy każda. Parametrem zmiennym był rozstaw strzemion na odcinku pomiędzy podporą a punktem przyłożenia skrajnej siły skupionej, wynoszący 12 lub 18 cm. Różnicowano także konstrukcję zbrojenia podłużnego, doprowadzając do podpory i tam kotwiąc wszystkie pręty zastosowane

w przęśle – 100% (5 sztuk) lub ich część, stanowiącą 60% zbrojenia przęsłowego (3 z 5 prętów). Przedstawiono to na rysunku 3.



Rys. 3. Konstrukcja zbrojenia belek

Na jednym z końców belek formowano sztuczną rysę, o zadanym kącie nachylenia względem osi belki. Kąt ten wyznaczono we wstępnych badaniach, przeprowadzonych na elementach próbnym o identycznym schemacie statycznym i wymiarach jak te, poddane doświadczeniom (40° dla serii 1÷2 oraz 33° dla serii 3÷4). Uformowanie sztucznej rysy uznano za najprostszyspósb, pozwalający zlokalizować na strzemionach miejsca instalacji tensometrów. W badaniach zastosowano tensometry elektrooporowe o długości 20mm. Sztuczną rysę kształtowano poprzez umieszczenie wewnątrz szkieletu zbrojenia naoliwionej blachy o grubości 1mm. Blachę mocowano do zbrojenia drutem, zapobiegającym jej przesunięciu w czasie betonowania elementu. W belkach serii 1 i 2 (strzemiona co 12cm) sztuczna rysa przecinała trzy strzemiona. Na każdym ze strzemion zainstalowano po 6 czujników elektrooporowych – na trzech poziomach przecięcia strzemion rysą. W belkach serii 3 i 4 na długości sztucznej rysy występowały dwa strzemiona, każde opomiarowane w czterech punktach – na dwóch poziomach przecięcia z rysą. Zasadę instalacji czujników przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Miejsca instalacji czujników elektrooporowych na strzemionach

Do przygotowania elementów stosowano beton klasy C25/30, zamawiany w wytwórni. Średnia wytrzymałość na ściskanie, określona po 28 dniach od zabetonowania, na próbkach sześciennych o boku 15cm, wynosiła od 28,7 do 43,1 MPa (dla większości elementów uzyskano wartości w przedziale 34÷40MPa). Zastosowano strzemiona o średnicy 8 mm,

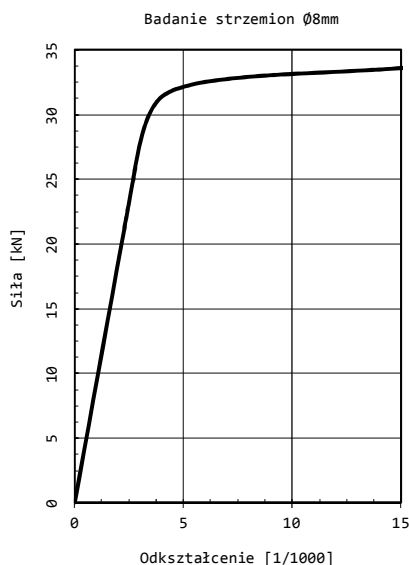
wykonane ze stali o granicy plastyczności deklarowanej przez producenta - 500 MPa. W badaniu kontrolnym granica plastyczności stali strzemion wyniosła 609 MPa. Zbrojenie podłużne wykonano z prętów o średnicy 20mm ze stali o granicy plastyczności 500 MPa, przy czym wartość sprawdzona doświadczalnie wynosiła 533 MPa.

Obciążenie belek realizowane było etapami, z przyrostem siły poprzecznej na odcinku pomiędzy podporą a skrajną siłą skupioną wynoszącym 15kN w każdej fazie. Badania prowadzono do momentu zniszczenia elementów. Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w [6].

### 3. Siła w strzemionach przeciętych rysą sztuczną

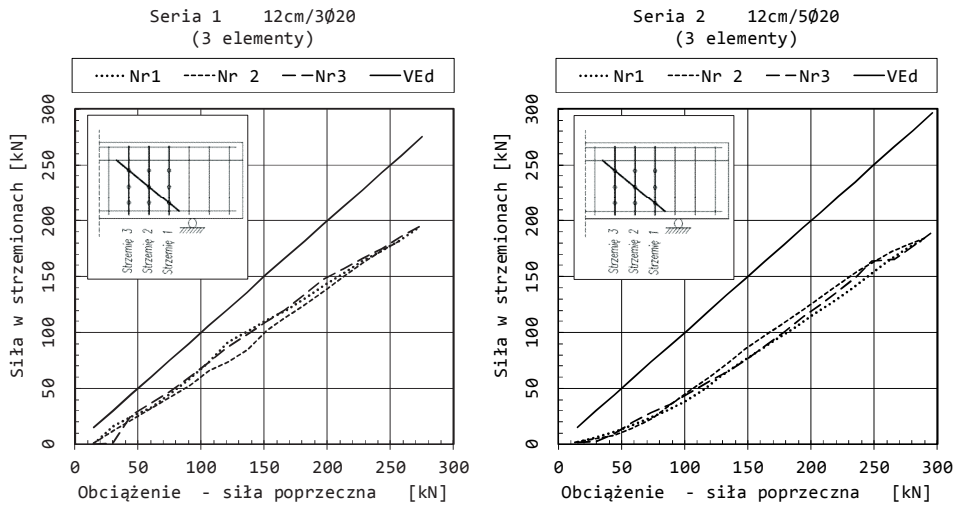
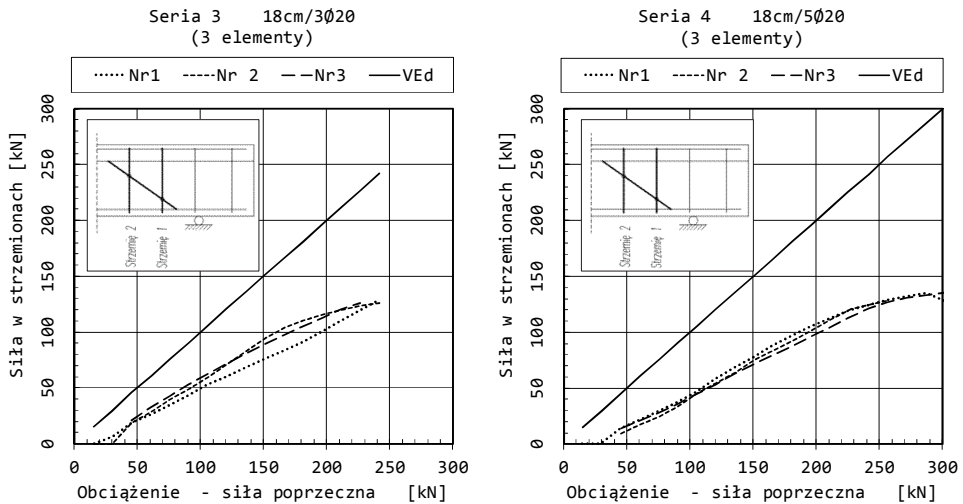
Wartość siły przenoszonej przez strzemiona w rysie sztucznej wyznaczano na podstawie pomierzonych odkształceń. Stosowano w tym celu zależność siła-odkształcenie ( $N-\varepsilon$ ) określoną jako średnia z wyników badań 6 próbek stalowych. Zależność tę, przedstawioną na rysunku 5, opisano wzorem:

$$N = \begin{cases} 9,3085 \cdot \varepsilon & \text{dla } 0 \leq \varepsilon \leq 2,73 \\ -0,0019 \cdot \varepsilon^6 + 0,0842 \cdot \varepsilon^5 - 1,4794 \cdot \varepsilon^4 + 13,3846 \cdot \varepsilon^3 - 66,3048 \cdot \varepsilon^2 + \\ + 172,0347 \cdot \varepsilon - 152,213 & \text{dla } 2,73 < \varepsilon \leq 4,56 \\ -0,0003 \cdot \varepsilon^4 + 0,0140 \cdot \varepsilon^3 - 0,2618 \cdot \varepsilon^2 + 2,1692 \cdot \varepsilon + 26,241 & \text{dla } 4,56 < \varepsilon \leq 17,76 \end{cases} \quad (1)$$



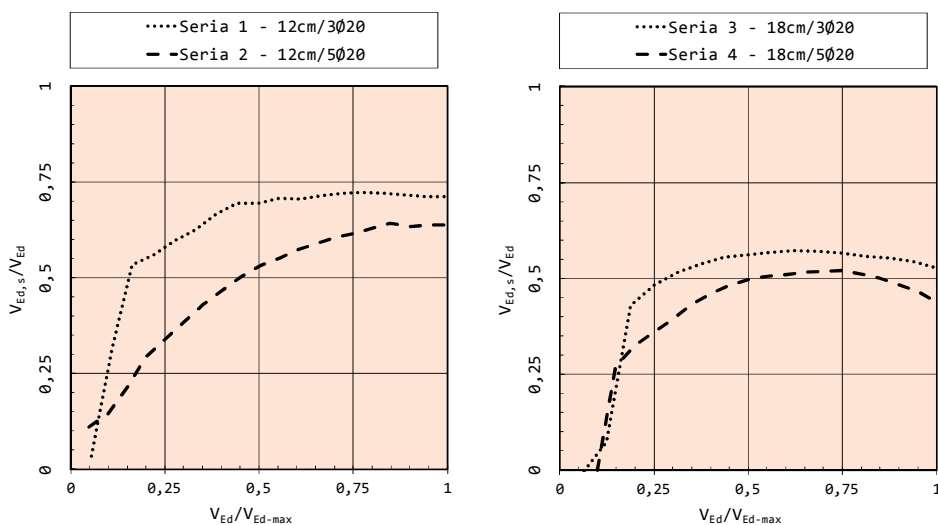
Rys. 5. Związek  $N-\varepsilon$  dla stali strzemion – średnia według pomiarów

Łączne obciążenie w zbrojeniu poprzecznym w rysie wyznaczano dla każdej belki jako sumę sił panujących w poszczególnych strzemionach (trzech w seriach 1 i 2 oraz dwóch w seriach 3 i 4). Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Rys. 6. Siła  $V_{Ed,s}$  przenoszona przez strzemia w sztucznej rysie dla elementów serii 1 i 2Rys. 7. Siła  $V_{Ed,s}$  przenoszona przez strzemia w sztucznej rysie dla elementów serii 3 i 4

Na rysunku 8 przedstawiono uśrednione wyniki dla serii. Na osi rzędnych zaznaczono stosunek siły przenoszonej przez strzemia w rysie  $V_{Ed,s}$  do wartości obciążenia siłą poprzeczną  $V_{Ed}$ . Na osi odciętych natomiast oznaczono stosunek obciążenia siłą poprzeczną  $V_{Ed}$  do wartości średniego obciążenia niszczącego dla danej serii  $V_{Ed-max}$ . Zastosowanie stopnia wyężenia elementu zamiast wartości obciążenia pozwala na łatwiejsze porównanie i ocenę uzyskanych rezultatów.

Zaobserwowano, że przy większym rozstawie strzemiion, udział ich w przenoszeniu obciążenia siłą poprzeczną był mniejszy, osiągając maksymalnie 57% dla serii 3 oraz 52% dla serii 4. Tymczasem w belkach o większym stopniu zbrojenia poprzecznego udział strzemiion w sile poprzecznej wyniósł maksymalnie 72% dla serii 1 i 64% dla serii 2.

Rys. 8. Stosunek siły przenoszonej przez strzemia  $V_{Ed,s}$  do siły poprzecznej  $V_{Ed}$ 

Ciekawy wniosek można wysnuć także z porównania wyników parami dla serii o jednakowym rozstawie strzemi. Przy takim zestawieniu jedynym parametrem różniącym badane elementy był stopień zbrojenia podłużnego, doprowadzonego i zakotwionego na podporze. Kilkuprocentowa różnica w obciążeniu strzemi może zatem świadczyć, że zbrojenie podłużne przenosi siłę poprzeczną do osi prętów, co przy wyższym stopniu zbrojenia prowadzi do zmniejszenia siły w strzemiach.

Tabela 1. Wartości stosunku  $V_{Ed,s} / V_{Ed}$ 

Lp.	Seria	1	2	3	4
1	Rozstaw strzemi	12cm	12cm	18cm	18cm
2	Zbrojenie doprowadzone z przęsa do podpory	60%	100%	60%	100%
3	$(V_{Ed,s} / V_{Ed}) \max$	0,72	0,64	0,57	0,52
4	$(V_{Rd,s} / V_{Rd})$ wg MC2010*	0,79	0,77	0,72	0,67

\* Stosunek  $V_{Rd,s} / V_{Rd}$  według Model Code 2010 obliczono w fazie wyczerpania nośności, przy założeniu średnich parametrów materiałowych przyjętych z badań, zakładając trzeci stopień dokładności obliczeń (metoda MCFT).

W tabeli 1 zestawiono wartości stosunku  $V_{Ed,s}/V_{Ed}$  dla serii – największej spośród zaobserwowanych w badaniach. Wartości te porównano z odpowiednim stosunkiem wyznaczonym obliczeniowo przy wykorzystaniu Model Code 2010 z założeniem trzeciego stopnia dokładności. Jak łatwo zauważyć, doświadczalny udział strzemi w przenoszeniu obciążenia siłą ścinającą był nieco niższy niż uzyskuje się w obliczeniach. Niewielką różnicę stwierdzono w przypadku belek z silniejszym zbrojeniem poprzecznym i słabszym podłużnym, największa przy silniejszym podłużnym a słabszym poprzecznym.

#### 4. Podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują na dość znaczny udział w przenoszeniu obciążenia siłą ścinającą czynników innych niż zbrojenie poprzeczne. W pewnych warunkach udział ten może być bliski 50% (silne zbrojenie podłużne, słabe poprzeczne). Ponadto stwierdzono pewien udział zbrojenia podłużnego w przenoszeniu siły poprzecznej, mimo że w opisach teoretycznych zjawiska ścinania zakłada się, że pręty (zarówno podłużne jak i strzemia)

przenoszą wyłącznie siły osiowe. Zwrócić należy jednak tutaj uwagę, że w badaniach stosowano pręty o znacznej średnicy (20mm), zatem o dużej sztywności w kierunku poprzecznym do osi. Również należy podkreślić, że zastosowanie wewnątrz szkieletu zbrojenia gładkiej, do tego naoliwionej blachy, w znacznym stopniu wyeliminowało zjawisko ząbienia się kruszywa w rysie. Oznacza to, że udział czynników innych niż zbrojenie poprzeczne w przenoszeniu ścinania może być nieco większy od zarejestrowanego w przeprowadzonych badaniach.

Interesujące byłoby podjęcie próby wyjaśnienia udziału naprężeń stycznych w betonie strefy ściskanej w przenoszeniu siły poprzecznej i przeprowadzenia porównawczych badań na elementach o przekroju prostokątnym. Zastosowanie w przedstawionych doświadczeniach przekroju teowego mogło mieć bowiem istotny wpływ na wielkość siły przekazywanej na strzemiona.

## Literatura

- 1 PN-EN:1992-1-1. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków. 2008.
- 2 Reineck K. H. Ultimate shear force of structural concrete members without shear reinforcement derived from a mechanical model. *ACI Structural Journal*, v. 88, No.5. 1991.
- 3 Vecchio F. J., Collins M. P. The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to shear. *ACI Journal Proceedings*, v. 83, No.2, 1986.
- 4 Model Code 2010 – First Complete Draft, Vol. 1, *Fib Bulletin* No. 55, 2010.
- 5 Model Code 2010 – First Complete Draft, Vol. 2, *Fib Bulletin* No. 56, 2010.
- 6 Ostromecki R. Szerokość rys ukośnych w żelbetowych elementach zginanych. Rozprawa doktorska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2012.

## Transverse reinforcement contribution in shear – remarks from experimental research

Rafał Ostromecki

*Institute of Building Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture,  
Warsaw University of Technology, e-mail: r.ostromecki@il.pw.edu.pl*

**Abstract:** The results of research for transverse reinforcement contribution in shear are presented in the article. Tests were made on the single span, simply supported beams. Resistance gauges were used to measure the strain on the stirrups at points crossing the artificial crack, formed with the thin, greased plate. Basing on the constitutive law for the stirrups steel derived in test, the force in stirrups was invented  $V_{Ed,s}$ . Such an attitude allowed to compare the force carried by stirrups  $V_{Ed,s}$  with the actual shear loading  $V_{Ed}$ . In the performed test made the stirrups contribution was between 52 and 72% of shear force. It was also noticed, that longitudinal reinforcement carried some transverse force as well. This ability is usually neglected in shear theories.

**Keywords:** shear, transverse reinforcement contribution, concrete contribution