

Szerokość rys ukośnych w belkach żelbetowych w świetle wyników badań

Rafał Ostromięcki¹

¹ Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska,
e-mail: r.ostromecki@il.pw.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiarów szerokości rys ukośnych, przeprowadzonych na belkach jednoprzęsłowych, swobodnie podpartych. Wymagania Eurokodu 2 nie zawierają wytycznych umożliwiających sprawdzenie czy stan graniczny szerokości rys ukośnych będzie spełniony. Przyjmuje się założenie, że przy wypełnieniu wymagań ze względu na nośność, szerokość rys ukośnych będzie ograniczona. Badania miały na celu zbadanie prawdziwości tego założenia. Doświadczeniom poddano belki zgrupowane w cztery serie różniące się rozstawem strzemion oraz ilością zbrojenia podłużnego, doprowadzonego z przęsła do podpory. Strzemiona wykonano ze stali o nominalnej granicy plastyczności 500MPa. Dla każdej serii belek określono poziom obciążenia miarodajnego do sprawdzenia stanu granicznego szerokości rys. Następnie obciążenie to zestawiano z wynikami pomiarów maksymalnej szerokości rysy ukośnej i wartością graniczną tej szerokości, przyjętą jak równa 0,3mm. Wnioski z badań potwierdziły, że stosując do projektowania stref obciążonych siłą poprzeczną wymagania Eurokodu 2 wraz z Załącznikami Krajowymi nie należy obawiać się wystąpienia nadmiernie szerokich zarysowań.

Słowa kluczowe: ścinanie, szerokość rys, rysy ukośne, kontrola szerokości rys.

1. Wprowadzenie

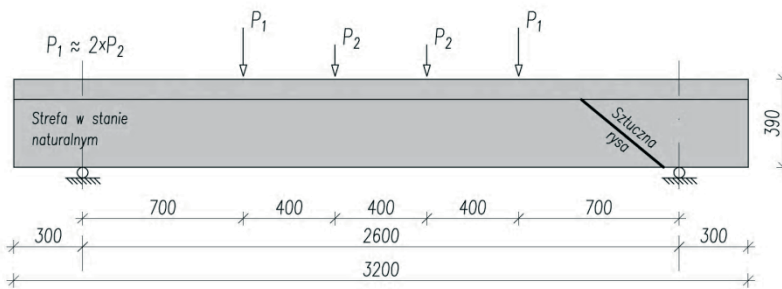
Szerokość rys ukośnych jest jednym z czynników, który zgodnie z założeniami metody stanów granicznych należy uwzględnić przy projektowaniu belek żelbetowych. W praktyce projektowej zazwyczaj nie stanowi przedmiotu osobnej analizy. Strefy działania sił poprzecznych projektuje się na nośność, zakładając że zastosowane zbrojenie poprzeczne zapewni także odpowiednią rysoodporność konstrukcji. Zagadnienie to było przedmiotem referatu [1]. Postawiono tam pytanie czy pomijanie sprawdzenia warunku stanu granicznego szerokości rys ukośnych w belkach może spowodować, że będzie on niespełniony. Obecnie, dysponując wynikami badań dla kilkunastu elementów, można pokusić się o udzielenie na nie odpowiedzi. Wnioski prezentowane poniżej oparte są na wymaganiach Eurokodów [2], [3] z uwzględnieniem wytycznych polskich Załączników Krajowych. Dotyczą zatem praktyki stosowanej dziś w Polsce.

Problem obliczeniowego określania szerokości rys nie doczekał się jeszcze powszechnie akceptowanego rozwiązania. Współczesne propozycje (na przykład Vecchio, Collins, Giordano, Mancini – [4], [5]) nie są upowszechnione. Wymagają ponadto pewnych uściśleń, aby można było je zastosować przy projektowaniu belek stosowanych w budownictwie ogólnym. Dotyczą bowiem konstrukcji mostowych, gdzie elementy mają inne proporcje oraz inny rozkład zbrojenia. Rosyjskie propozycje (Boryszański, Zaliesow – [6], [7]) nie przyjęły się, zresztą wiarygodność ich wyników bywała podważana. Obecnie obowiązuje przekonanie, że przestrzeganie wytycznych normowych w zakresie projektowania konstrukcji na nośność stanowi warunek wystarczający, żeby szerokość rys ukośnych nie była zbyt duża. Ilość zbrojenia poprzecznego i podłużnego, wynikająca z obliczeń statycznych, odpowiednie kształtowanie i kotwienie prętów – czyli czynniki niezbędne do osiągnięcia założonej nośności belki mają gwarantować także ograniczenie szerokości rys ukośnych. Jak się niżej okaże, przyjęcie takie w większości przypadków dobrze się sprawdza.

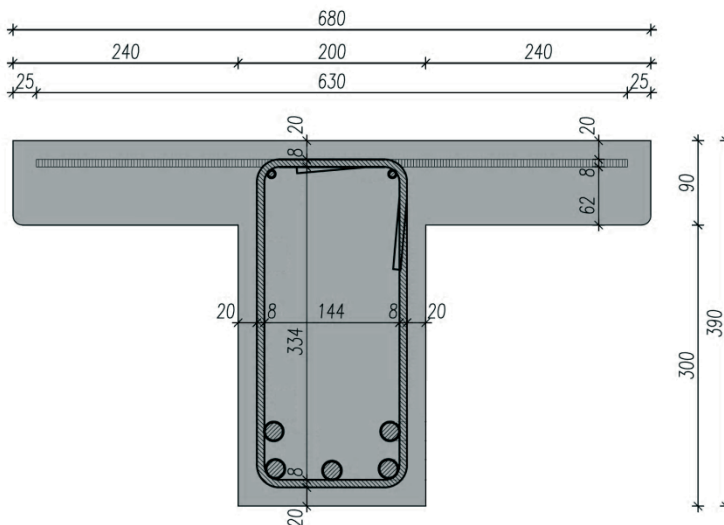
Zasadność pytania o szerokość rys ukośnych można tłumaczyć, poza aktualnym brakiem możliwości obliczeniowego ujęcia zagadnienia, faktem dopuszczenia wyższych niż dawniej naprężeń w zbrojeniu poprzecznym. Rozwój technologii stali spowodował podwyższenie granicy plastyczności zbrojenia stosowanego w konstrukcjach żelbetowych. Obecnie powszechne jest wykorzystywanie prętów o $f_{yk}=500\text{MPa}$. Dawniej, zwyczajem było wykonywanie strzemion ze stali o granicy plastyczności dwukrotnie niższej. Biorąc pod uwagę liniowo sprężyste właściwości stali można obawiać się, że odkształcenia zbrojenia poprzecznego okażą się na tyle duże, aby powodować znaczną szerokość rys ukośnych. Wyniki badań doświadczalnych, dostępne w literaturze nie pozwalały oddalić wątpliwości. Eksperymenty były bowiem prowadzone z zastosowaniem strzemion o niższej granicy plastyczności niż obecnie się praktykuje. Uznano zatem, że wskazane jest przeprowadzenie doświadczeń na belkach zbrojonych poprzecznie prętami o $f_{yk}=500\text{MPa}$. Poniżej zaprezentowano podstawowe wnioski z przeprowadzonych badań.

2. Badania eksperymentalne

Przedmiotem badań były jednoprzęsłowe belki żelbetowe (rys. 1), swobodnie podparte, obciążone w przęśle czterema siłami skupionymi. Zaprojektowano teowy przekrój poprzeczny (rys. 2), co pozwoliło uzyskać odpowiednią nośność na zginanie, a równocześnie skonstruować element reprezentatywny dla zastosowań praktycznych (belka współpracująca ze stropem).

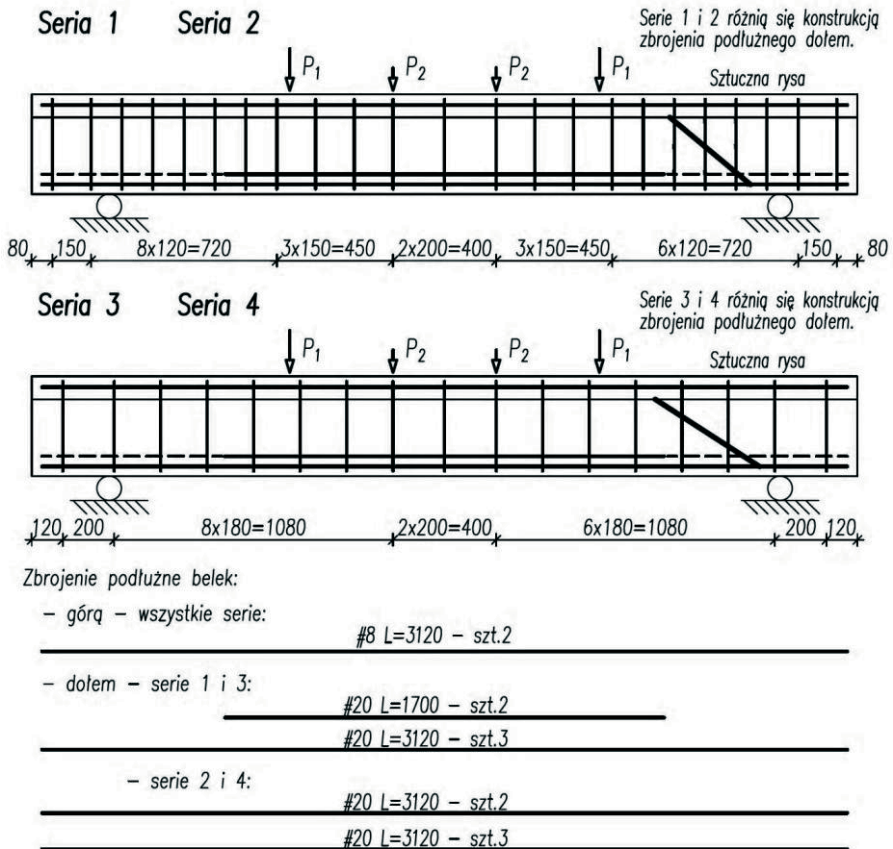


Rys. 1. Schemat statyczny badań belek.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny belek.

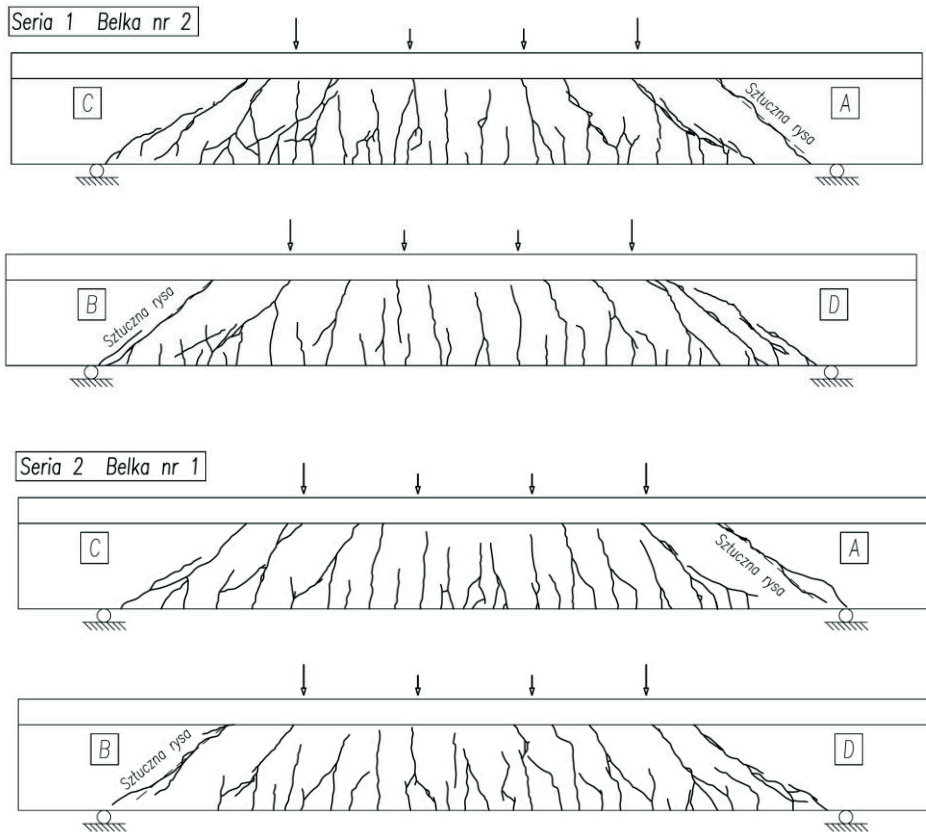
Belki zgrupowane zostały w cztery serie (1÷4), a każda składała się z trzech elementów. Parametrem zmiennym był rozstaw strzemion na odcinku pomiarowym (pomiędzy podporą a punktem przyłożenia skrajnej siły skupionej), wynoszący 12 lub 18cm. Różnicowano także konstrukcję zbrojenia podłużnego, doprowadzając do podpory i tam kotwiąc wszystkie pręty zastosowane w przęśle – 100% (5 sztuk) lub tylko część, stanowiącą 60% zbrojenia przęsłowego (3 z 5 prętów). Przedstawione to zostało na rysunku 3.



Rys. 3. Konstrukcja zbrojenia belek.

Przy jednym końcu badanych belek formowano sztuczną rysę ukośną, instalując wewnątrz szkieletu zbrojenia naoliwioną blachę grubości 1mm. Głównym powodem takiego postępowania był zamiar pomierzenia odkształceń strzemion w miejscu przecięcia z rysą. Kąt pochylenia rysy sztucznej określono w badaniach belek wstępnych, poprzedzających właściwe doświadczenia (40° dla serii 1÷2 oraz 33° dla serii 3÷4). Przeciwległy koniec elementu pozostawiany był w stanie naturalnym i przeznaczony do obserwacji rozwoju zarysowania ukośnego. Punkty pomiarowe szerokości rys wyznaczano zarówno po stronie „naturalnej” jak i ze sztuczną rysą. Brano pod uwagę rysy o wyraźnym ukośnym przebiegu (w tym sztucznej), zlokalizowane na odcinku pomiarowym - między skrajną siłą skupioną a podporą. Najczęściej były to dwie rysy. Pomiarów szerokości dokonywano mikroskopem Brinella (1 dz. = 0,05mm) w miejscach przecięcia rys ze zbrojeniem podłużnym i poprzecznym oraz w punktach pośrednich, zlokalizowanych w połowie odległości między strzemionami. W belkach o większym rozstawie zbrojenia poprzecznego (18cm) wyznaczano dodatkowo punkty pomiarowe w 1/4 i 3/4 odległości między strzemionami. Morfologię powstałych rys (rysunki wraz z opisem słownym) oraz lokalizację punktów

pomiaru szerokości rys przedstawiono szczegółowo w [8]. Na rysunku 4 zaprezentowano przykładowy obraz zarysowania uzyskany dla wybranych belek serii 1 oraz 2.



Rys. 4. Morfologia rys w wybranych belkach serii 1 i 2.

Belki wykonywano z betonu zamawianego w wytwórni, zakładając klasę C25/30. Średnia wytrzymałość na ściskanie, określana doświadczalnie na sześciennych próbkach kontrolnych o boku długości 15cm, wynosiła po 28 dniach od zabetonowania od 28,7 do 43,1 MPa (przy czym dla większości elementów uzyskano wartości w przedziale 34÷40MPa). Strzemiona o średnicy 8 mm wykonano ze stali o nominalnej granicy plastyczności 500 MPa - w badaniu kontrolnym granica plastyczności osiągnęła 609 MPa. Zbrojenie podłużne o średnicy 20mm wykonano ze stali o nominalnej granicy plastyczności 500 MPa, określona doświadczalnie granica plastyczności wynosiła 533 MPa.

Obciążenie belek realizowano etapami, przyrost siły poprzecznej na odcinku pomiarowym wynosił w każdej fazie 15kN. Każde badanie prowadzono do zniszczenia elementu.

3. Obciążenie miarodajne do oceny szerokości rys ukośnych

Przy analizie wyników badań kluczowe znaczenie miało ustalenie poziomu obciążenia, dla którego należało odczytywać szerokość rys. Poziom ten miał odpowiadać wartości przyjmowanej w projektowaniu do sprawdzenia stanu granicznego użytkowości. Przedmiotowe obciążenie nazwano w interpretacji wyników badań obciążeniem eksploatacyjnym, a wywołaną przez nie siłę poprzeczną oznaczono jako V_{sls} . Spełnienie warunku stanu granicznego użytkowości oznaczać miało zatem, że szerokość rysy spowodowana działaniem siły V_{sls} nie przekraczała wartości dopuszczalnej.

Z ustaleniem wartości obciążenia eksploatacyjnego (siły V_{sls}) wiązała się pewna trudność. Wartość ta nie mogła zostać określona jednoznacznie, bowiem z definicji uzależniona została od przyjmowanych do projektowania metod normowych. Jej ustalenie wymagało więc przyjęcia szeregu założeń. Stosując Eurokody [2], [3] uznano, że obciążenie eksploatacyjne musiało odpowiadać działaniu kombinacji obciążeń prawie stałych. Relację między siłą V_{sls} a przyjmowanym do obliczeń obciążeniem obliczeniowym V_{Ed} oszacowano procentowo, biorąc pod uwagę wartości współczynników bezpieczeństwa stosowanych przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności, udziału obciążenia zmiennego w kombinacji oraz stosunek obciążenia zmiennego do stałego. Ustalono, że dla większości przypadków praktycznych uzyska się zależność:

$$V_{sls} = 0,63 \div 0,74 V_{Ed} \quad (1)$$

Dalsze założenia dotyczyły relacji pomiędzy obciążeniem obliczeniowym V_{Ed} a obciążeniem granicznym V_{Rd} , czyli nośnością elementu wynikającą z przyjętego zbrojenia i oszacowaną przy pomocy metody normowej. Zakładając, że projektant nie przewidział dodatkowych, poza normowe, zapasów bezpieczeństwa przyjęto:

$$V_{Ed} = V_{Rd} \quad (2)$$

Świadome przyjęcie przez projektanta większej ilości zbrojenia niż to wynika z obliczeń skutkuje oczywiście mniejszym wyężeniem strzemion i marginalizuje znaczenie stanu granicznego użyteczności. I choć postępowanie takie może być w praktyce nierzadkie, uznano je przy interpretacji wyników za nieuprawnione.

Graniczna siła V_{Rd} nie może być utożsamiana z nośnością elementu na ścinanie, uzyskaną w badaniach eksperymentalnych $V_{R,exp}$. Ze względu na stosowane współczynniki bezpieczeństwa oraz konieczność zapewnienia odpowiedniego poziomu niezawodności siła V_{Rd} musi być odpowiednio niższa. Różnica pomiędzy obiema wartościami uzależniona jest ponadto od dokładności przyjętego modelu obliczeniowego. Zachowawcze podejście pogłębia tę różnicę, zwiększając globalny współczynnik bezpieczeństwa. Można to zaobserwować porównując wyniki obliczeń siły granicznej V_{Rd} z nośnością uzyskaną w badaniach $V_{R,exp}$ dla belek serii 1 i 2 oraz 3 i 4. Siła graniczna V_{Rd} w elementach, w których do podpory doprowadzono pełne zbrojenie pręślowe (serie 2 i 4) jest nieznacznie niższa niż uzyskana dla pozostałych belek (serie 1 i 3). Tymczasem wyniki doświadczeń dla porównywanych serii różnią się znacznie, do tego w odwrotnej relacji (tabela 1). Można to wytłumaczyć niedoskonałością modelu normowego [3], w którym nie uwzględnia się wpływu na nośność obliczeniową stopnia zbrojenia podłużnego doprowadzonego do podpory. Na marginesie dodać można, że nośność obliczeniowa oszacowana na podstawie Model Code 2010 [9], [10], przy przyjęciu trzeciego stopnia dokładności, pozbawiona jest przedstawionego powyżej mankamentu. Podsumowując należy stwierdzić, że relacja między V_{Rd} i $V_{R,exp}$ jest rezultatem przyjmowanych założeń dotyczących bezpieczeństwa konstrukcji oraz metodyki obliczeniowej. Oznacza to, że w interpretacji wyników badań trudne byłoby uzależnienie wartości obciążenia, przy którym należy sprawdzać szerokość rys V_{sls} od wartości obciążenia przy którym elementy badawcze uległy zniszczeniu $V_{R,exp}$. Równocześnie podkreślić należy fakt, że zdefiniowanych wyżej wartości jedynie $V_{R,exp}$ mogła być określona jednoznacznie wynikiem badania. W tej sytuacji zaproponowano następujący sposób postępowania przy interpretacji wyników. Dla badanych belek przeprowadzono obliczenia nośności na ścinanie według modelu przyjętego w Eurokodzie [3] i wyznaczono dla każdej serii wartość V_{Rd} . Do obliczeń przyjęto obliczeniowe wartości wytrzymałości betonu i zbrojenia, wynikające z założonych właściwości nominalnych (C25/30, 500MPa), również według zaleceń Eurokodu [3]. Wielkości geometryczne (wymiar, konstrukcja zbrojenia) przyjęto jak dla belek poddanych doświadczeniom. Obciążenie eksploatacyjne V_{sls} wyznaczono według (1), przyjmując że stanowiło ono w najmniej korzystnej sytuacji 74% siły V_{Rd} . Odtworzono zatem fragment procesu projektowania w zakresie ścinania. Oszacowane dla każdej serii badawczej obciążenie eksploatacyjne V_{sls} zestawiono z wynikami pomiarów szerokości rys.

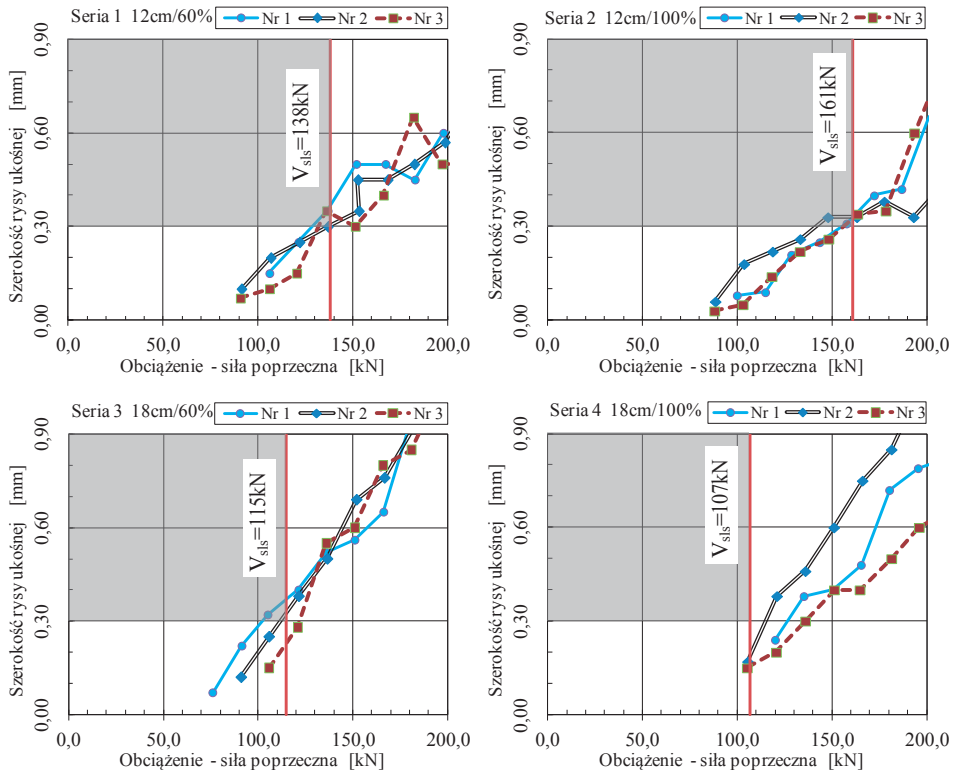
4. Wyniki pomiarów szerokości rys

W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń nośności V_{Rd} oraz obciążenia eksploatacyjnego V_{sls} , zgodnie z opisaną w punkcie 3 metodyką. Podano także dla porównania średnie wartości siły $V_{R,exp}$ otrzymane w badaniach laboratoryjnych. Zestawienie obciążenia eksploatacyjnego z pomierzoną szerokością rys ukośnych przedstawiono na rysunku 5. Zaprezentowane wykresy obrazują największą szerokość, zarejestrowaną dla rys ukośnych zlokalizowanych na odcinku pomiarowym (między podporą a skrajną siłą skupioną) z wyłączeniem rysy sztucznej.

Tabela 1. Wartości sił V_{Rd} , V_{sls} i $V_{R,exp}$

Seria	1	2	3	4
Rozstaw strzemiem	12cm	12cm	18cm	18cm
Zbrojenie doprowadzone z przęśła do podpory	60%	100%	60%	100%
V_{Rd} [kN]	231	217	155	145
V_{sls} [kN]	171	161	115	107
$V_{R,exp}$ [kN]*	279	347	251	321

* wartość średnia uzyskana z badań trzech elementów



Rys. 5. Wyniki pomiaru szerokości rys ukośnych.

Pewne niedopatrzenie miało miejsce przy planowaniu badań elementów serii 1 (12cm/60%). Pręty wyższej warstwy zbrojenia przeszłego kończono w przekroju, gdzie poniżej strefy ściskanej rozpoczynała się sztuczna rysa. Ze względu na fakt, że w strefie ze sztuczną rysą prowadzono pomiary odkształceń strzemiem zdecydowano o nie kotwieniu zbrojenia podłużnego na tym odcinku. Poskutkowało to obniżeniem nośności belki względem pierwotnego planu, aby zginanie nie determinowało nośności elementów.

W efekcie dwa elementy zniszczyły się przez uplastycznienie zbrojenia podłużnego w przekroju, gdzie kończyły się pręty wyższej warstwy, a jeden poprzez zerwanie strzemion. Chcąc jednak postępować zgodnie z wymaganiami Eurokodu [3], należało przy interpretacji wyników uwzględnić wpływ obliczeniowej nośności na zginanie, wynikającej z zastosowanego układu zbrojenia. Ograniczenie maksymalnego momentu, jaki może przenieść belka wpłynęło na wartość siły poprzecznej na odcinku przypodporowym. Oszacowano, że w opisanej sytuacji, jako siłę V_{sls} należy przyjąć 138kN.

Przyjęto zestawienie wyników pomiaru szerokości rys ukośnych z wartością graniczną, wymaganą z uwagi na ochronę przed korozją zbrojenia, $w_{max}=0,3mm$. Na rysunku 5 zacięniowano obszar, ograniczony wartościami V_{sls} oraz w_{max} , dla którego następowało przekroczenie założonej, dopuszczalnej szerokości rys.

Można łatwo dostrzec, że szerokość graniczną osiągnięto lub nieznacznie przekroczone dla trzech spośród przebadanych serii (1÷3). Jedynie belki serii 4, o silnym zbrojeniu podłużnym a słabszym poprzecznym, wykazały znaczną rysoodporność. Dla tych elementów szerokość rys przy obciążeniu eksploatacyjnym wynosiła około połowy wartości przyjętej za graniczną.

Stal zbrojenia poprzecznego, zastosowanego w badaniach, cechowała granica plastyczności powyżej 600MPa. Zakładając do obliczeń tę wartość, czyli przyjmując $f_{yd}=520MPa$, oszacowano dla serii 2÷4 wartość obciążenia eksploatacyjne V_{sls} równą odpowiednio 171kN (seria 2), 137kN (seria 3) i 128kN (seria 4). Wykorzystując wykresy przedstawione na rysunku 4 odczytano, że dla wszystkich elementów szerokość rys była większa niż wartość graniczna $w_{max}=0,3mm$. Dla belek serii 2 osiągnęła wartość poniżej 0,4mm, dla belek serii 3 ok. 0,5mm a dla belek serii 4 maksymalnie 0,4mm. Dla serii 1, ze względu na konstrukcję zbrojenia podłużnego wnioskowanie nie zmieniło się.

5. Podsumowanie

Otrzymane wyniki pomiarów wskazują, że problem szerokości rys ukośnych w belkach żelbetowych nie jest tak istotny, jak mogłoby się to z początku wydawać. Nawet stosowanie na strzemiona stali o wyższej niż dawniej granicy plastyczności nie zwiększa znacząco ryzyka przekroczenia wartości granicznej, wymaganej dla ochrony zbrojenia przed korozją. Przy braku zagrożenia korozyjnego oddziaływania środowiska i przyjęciu $w_{lim}=0,4mm$ praktycznie nie trzeba się obawiać, że szerokość rys okaże się nadmierna. Należy także podkreślić, że powyższe wnioskowanie oparto o najmniej korzystną relację między obciążeniem obliczeniowym a charakterystycznym, gdy obciążenie zmienne nie przekracza 40% obciążenia stałego, a jego część prawie stała wynosi 80% ($\psi_2=0,8$). Dla pozostałych przypadków poziom obciążenia, przy którym należy odczytywać szerokość rys jest niższy. Przyjęcie w obliczeniach granicy plastyczności strzemion na poziomie 600MPa może w rzadkich przypadkach skutkować nadmiernym zarysowaniem. Wyniki doświadczeń wskazują jednak, że w takim przypadku problem łatwo może być rozwiązany poprzez zwiększenie ilości zbrojenia podłużnego doprowadzonego do podpory.

Przedstawiona wyżej argumentacja potwierdza, że metodyka projektowania belek na ścinanie przyjęta w Eurokodzie [2], [3] pozostaje po stronie bezpiecznej w zakresie ograniczenia szerokości rys ukośnych.

W pracy [8], stosując przedstawiony wyżej tok postępowania, oszacowano wartość obciążenia eksploatacyjnego dla kolejnych serii belek w oparciu o wytyczne Model Code 2010 [9], [10]. Przyjęto przy tym do obliczeń trzeci poziom dokładności (metoda MCFT). Obliczone wartości V_{sls} zestawiono następnie z wynikami pomiarów szerokości rys. Wnioski wypływające z tej analizy są zbieżne z przedstawionymi powyżej, gdy model obliczeniowy przyjmowano według wymagań Eurokodu [3].

6. Wniosek końcowy

W przypadku projektowania belek żelbetowych według zaleceń Eurokodów [2], [3] wraz z uwzględnieniem wytycznych polskich Załączników Krajowych uzasadnione jest założenie, że sprawdzenie szerokości rys ukośnych może zostać pominięte. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają słuszność takiego postępowania.

Literatura

- 1 Knauff M., Ostromecki R. Czy sprawdzanie szerokości rys ukośnych w belkach żelbetowych jest konieczne. 52 Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica, 2006.
- 2 PN-EN 1990. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. 2004.
- 3 PN-EN:1992-1-1. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków. 2008.
- 4 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.
- 5 Giordano L., Mancini G. Crack Width Evaluation of Reinforced Concrete Membrane Elements. *Structural Engineering International*, No.3, 2009.
- 6 Боришанский М. С. Расчет отогнутых стержней и хомутов в изгибаемых железобетонных элементах по стадии разрушения Стройиздат. 1946.
- 7 Залесов А. С., Кодыш Э. Н., Лемьш Л. Л., Никитин И. К. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. Стройиздат. 1988.
- 8 Ostromecki R. Szerokość rys ukośnych w żelbetowych elementach zginanych. rozprawa doktorska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2012.
- 9 Model Code 2010 – First Complete Draft, Vol. 1, *Fib Bulletin No. 55*, 2010.
- 10 Model Code 2010 – First Complete Draft, Vol. 2, *Fib Bulletin No. 56*, 2010.

Diagonal crack width towards the experimental results

Rafał Ostromecki¹

¹ *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 on diagonal crack width in a single span RC beams were presented in the article. Eurocode 2 rules do not require the direct control of shear crack width. It is assumed, that reinforcement designed to carry the transverse force is also enough to limit the crack width. Experiments were led on beams grouped into four series differing in the links spacing and area of longitudinal tensile reinforcement anchored on supports. The transverse reinforcement steel was of $f_{yd} = 500\text{MPa}$. The crack width was measured in the following phases of loading. The force was estimated for every series, which was represented by the load level for which the serviceability limit state should be controlled. Maximum crack width was read for this value of force and compared to the limit of 0,3mm. The conclusion was drawn, that crack width is not a critical factor for beams designed for shear with the use of Eurocode and Polish National Annex.

Keywords: shear, diagonal crack, crack width.