

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK\*  
dr inż. Mariusz Staszewski\*

# Zarysowanie belek żelbetowych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych

*Cracking of reinforced concrete beams strengthened  
with carbon fiber strips*

**B**adania nad efektywnością wzmocnienia materiałami kompozytowymi CFRP belek żelbetowych na zginanie są prowadzone w wielu ośrodkach naukowych [1, 2, 3]. Prace koncentrują się głównie na stanach granicznych nośności, natomiast w mniejszym stopniu odnoszą się do stanów granicznych użyteczności konstrukcji. Badania przeprowadzone w Katedrze Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu Politechniki Koszalińskiej [4, 5, 6] wskazują, że przekroczenie wartości granicznej szerokości rozwarcia rys prostopadłych do osi elementu występuje przy obciążeniu znacznie mniejszym niż obciążenie niszczące wzmocnione belki żelbetowe. Wynika stąd konieczność przyjęcia takiego sposobu prognozowania szerokości rys i ich rozstawu, aby z dużą dokładnością określić ich wartości. W artykule przedstawiono sposób obliczania szerokości i rozstawu rys wg PN-B-03264:2002 *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*, który zweryfikowano doświadczalnie, wykorzystując wyniki badań własnych [4, 6] i innych autorów [2, 7, 8]. Zachowano oryginalne oznaczenia elementów, tj. BF-2 ÷ BF-9 wg [2], W-I i W-II wg [5], SA6 ÷ SD6 wg [7], B2 ÷ B10 wg [8].

Zbadano dwanaście belek żelbetowych o przekroju  $120 \times 220$  i długości 3300 mm, w tym sześć wzmocnionych taśmami CFRP i sześć bez wzmocnienia (belki kontrolne). Trzy belki wzmocniono taśmami o przekroju  $1,2 \times 50$  mm (belki W-I) i  $1,2 \times 80$  mm (belki W-II). Opis elementów próbnych, badania materiałów użytych do ich wykonania oraz metodykę badań zawierają publikacje [4, 5].

\* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu

## Wpływ wzmocnienia taśmami CFRP belek żelbetowych na wartość momentu rysującego

Wpływ wzmocnienia taśmami CFRP belek żelbetowych na wartość momentu rysującego określono, analizując własne wyniki badań [5, 4] oraz dostępne w literaturze [2, 7]. Wszystkie belki żelbetowe objęte badaniami własnymi, niezależnie od stopnia zewnętrznego wzmocnienia taśmami CFRP, zarysowały się przy zbliżonej wartości obciążenia [5, 6]. Wartość momentu rysującego belki zawierała się od 5,52 MPa w przypadku elementów niewzmocnionych do 6,53 MPa w przypadku wzmocnionych taśmą o przekroju  $1,2 \times 80$  mm. Podobne wyniki przedstawił Mathys [2]. Wykazał, że wpływ wzmocnienia taśmami CFRP na wartość momentu rysującego jest niewielki, przy czym można go zwiększyć przez dodatkowe kotwienie taśm w strefie zakotwienia. Odmienne wyniki badań uzyskali Skuturna z zespołem [7], którzy stwierdzili, że wzmocnienie belek żelbetowych taśmami CFRP może zwiększyć wartość momentu rysującego o  $56 \div 106\%$  oraz wykazali, że sposób kotwienia taśm CFRP może mieć istotny wpływ na jego wartość. Różnica pomiędzy wynikami badań przeprowadzonych przez autorów

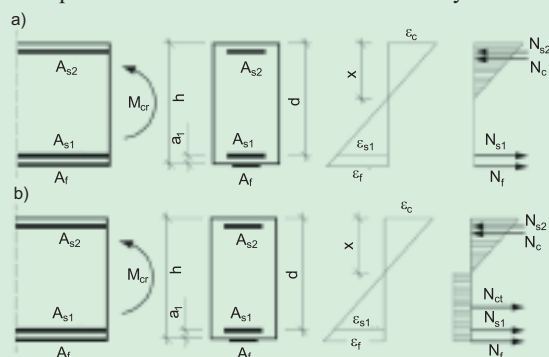
artykułu oraz Mathysa [2] a badaniami Skuturny z zespołem wynika ze skali elementów badawczych (użyto dwukrotnie mniejszych elementów) i dodatkowego kotwienia taśm CFRP [7].

Obliczeniową wartość momentu rysującego wyznaczono zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla bu-*

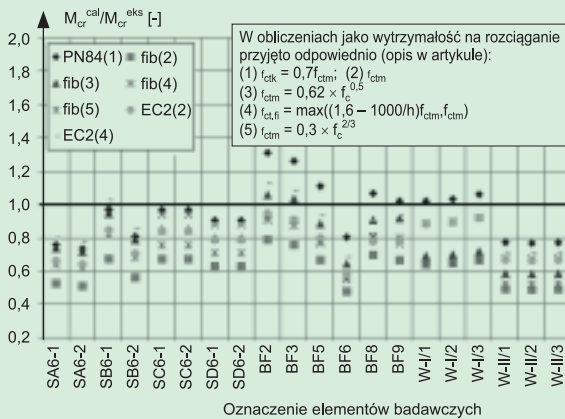
*dynków*, normą PN-84/B-03264. *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie* oraz [13], przyjmując schematy obliczeniowe przedstawione na rysunku 1. Dokładność metod obliczeniowych zweryfikowano przez porównanie wyników obliczeń z wynikami badań [2, 5, 7] (rysunek 2). Najmniejszy średni błąd obliczeniowy (5%) uzyskano, wyznaczając plastyczny moment rysujący na podstawie PN-84/B-03264 z uwzględnieniem dodatkowego zbrojenia (taśmy CFRP) zlokalizowanego w strefie rozciąganej. Dużą zgodność pomiędzy wynikami obliczeń a badań otrzymano także w przypadku normy PN-EN 1992-1-1 (EC2), przyjmując w obliczeniach średnią wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (rysunek 2 – poz. 4). Średni błąd obliczeniowy wyniósł 12%. Natomiast najmniejszą zgodność (średni błąd obliczeniowy – 38%) uzyskano, wyznaczając wartość momentu rysującego wg [13] (rysunek 2).

## Wpływ wzmocnienia taśmami CFRP belek żelbetowych na rozstaw rys prostopadłych

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych stwierdzono, że proces zarysowania elementów wzmocnionych i bez

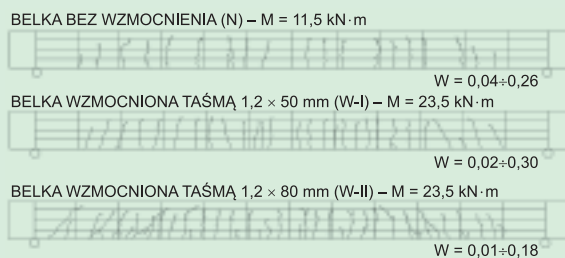


Rys. 1. Schematy przyjęte do obliczenia momentów rysujących: a) wg PN-EN 1992-1-1 oraz [13], b) wg PN-84/B-03264



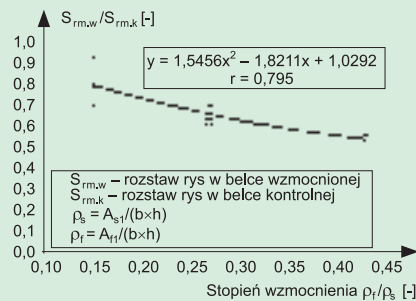
Rys. 2. Porównanie obliczeniowej wartości momentu rysującego ( $M_{cr}^{cal}$ ) wyznaczonej wg PN-EN 1992-1-1, PN-84/B-03264 oraz [13] z uzyskaną w badaniach ( $M_{cr}^{eks}$ ) [2, 5, 7]

wzmocnienia przebiega podobnie. Istotne różnice dotyczą zasięgu, rozstawu oraz szerokości rozwarcia rys. Stan ustabilizowanego zarysowania w belkach wzmocnionych taśmą CFRP osiągany jest przy większych obciążeniach niż w przypadku elementów bez wzmocnienia. Porównanie morfologii zarysowania belek żelbetonowych wzmocnionych taśmą CFRP oraz belek kontrolnych w fazie ustabilizowanego zarysowania przedstawiono na rysunku 3. Zasięg rys w belkach niewzmocnionych przekraczał połowę wysokości przekroju. Rysy były o 30% dłuższe od zaobserwowanych w badaniu belek typu W-I oraz o 50% od np. belek W-II. Na taki rozwój rys prostopadłych miał wpływ stopień zbrojenia belek, który w przypadku elementów wzmocnionych został zwiększony przez zbrojenie zewnętrzne taśmami CFRP. Zarówno w przypadku belek wzmocnionych, jak i bez wzmocnienia ze zwiększeniem obciążenia zwiększała się liczba rys prostopadłych, a ich rozstawy były zdecydowanie mniejsze w przypadku elementów o większym stopniu zewnętrznego wzmocnienia. Takie zachowanie elementów związane jest ze wzrostem stopnia zbrojenia oraz lokalizacją taśmy na zewnętrznej rozciąganej powierzchni belek [1, 2, 5]. Ponadto anali-



Rys. 3. Porównanie morfologii rys belek bez wzmocnienia oraz wzmocnionych w fazie ustabilizowanego zarysowania [5]

za wyników badań wykazała, że przy stopniu wzmocnienia  $\rho_f/\rho_s > 0,4$  rozstaw rys jest mniejszy nawet o 50% niż w przypadku belek niewzmocnionych (rysunek 4). Uwzględniając, że rozstaw rys jest bezpośrednio związany z przyczepnością zbrojenia zwykłego i kompozytowego do betonu, określenie średniego końcowego rozstawu rys w sposób dokładny jest zagadnieniem bardzo złożonym. Wyznaczenie tej wielkości możliwe jest przy wykorzystaniu nieliniowych



Rys. 4. Wpływ wzmocnienia belek żelbetonowych taśmami CFRP na rozstaw rys prostopadłych [2, 5, 8]:  $S_{r,m,w}$  – rozstaw rys w belce wzmocnionej,  $S_{r,m,k}$  – rozstaw rys w belce kontrolnej,  $\rho_f$  – stopień zbrojenia taśmą CFRP,  $\rho_s$  – stopień zbrojenia zwykłego w odniesieniu do całego przekroju

metod numerycznych, bowiem pozwalają one uwzględnić w analizie różnice pomiędzy mechaniką przyczepności stali zbrojeniowej i kompozytu CFRP do betonu.

Przyczepność kompozytów FRP do betonu była przedmiotem wielu badań publikowanych od 1989 r. Wykazano, że przyczepność taśmy FRP do betonu w strefie rozciąganej zależy m.in. od wytrzymałości betonu na rozciąganie, sposobu przygotowania powierzchni, sztywności giętej wzmacnianego elementu, grubości warstwy kleju, stosunku szerokości do grubości kompozytu FRP i liczby jego warstw oraz jego modułu sprężystości. Efektem analiz są modele opisujące zależność naprężenie – odkształcenie w strefie kontaktu kompozytu FRP z betonem [1, 9, 10].

Modele opisujące zjawisko przyczepności taśmy

CFRP oraz zbrojonej stali zbrojeniowej do betonu, będące podstawą teorii żelbetu, mogą posłużyć do określenia średnich znormalizowanych naprężeń przyczepności ( $\tau_{fm}$ ) na odcinku pomiędzy rysami w fazie ustabilizowanego zarysowania. Obecnie najczęściej stosowane są wytyczne omówione w [1], gdzie Holzenkämpfer wykazał, że naprężenia te wynoszą  $\tau_{fm} = 1,25 \cdot f_{ctm}$  w przypadku taśmy CFRP i  $\tau_{fm} = 1,80 \cdot f_{ctm}$  w przypadku zbrojonych prętów zbrojeniowych.

Z analiz przeprowadzonych przez autorów wynika [5], że wystarczająco dokładne wyniki obliczeń końcowego rozstawu rys można uzyskać, wyznaczając tę wielkość na podstawie [13]. W celu określenia końcowego rozstawu rys można wykorzystać także odpowiednio zmodyfikowane wytyczne normy PN-B-03264: 2002, które opisano zależnościami 1 ÷ 5. Modyfikacja polega na określeniu zastępczej średnicy zbrojenia rozciąganego (wzór nr 2) oraz zmianie wartości współczynnika zależnego od przyczepności zbrojenia rozciąganego do betonu (wzór nr 5), w taki sposób aby uwzględnić różnicę w mechanice przyczepności zbrojenia zwykłego i taśmy CFRP do betonu.

Średni końcowy rozstaw rys, w belkach wzmocnionych taśmami CFRP, proponuje się wyznaczyć wg następujących zależności:

$$S_{rm} = 50 + 0,25k_f k_2 \frac{\phi}{\rho_r} \quad (1)$$

w którym:

$$\phi = \phi_{eq} = \phi_s \frac{A_{s1} + A_{f,eq}}{A_{s1} + 0,25b_f \phi_s} \quad (2)$$

$$A_{f,eq} = \frac{E_f}{E_s} A_f \quad (3)$$

$$\rho_r = \rho_{r,eq} = \frac{A_{f,eq} + A_{s1}}{A_{ct,eff}} \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{0,80 \cdot u_s + 1,44 \cdot u_f}{u_s + u_f} \quad (5)$$

gdzie:

- $A_{ct,eff}$  – pole efektywnej rozciąganej strefy przekroju zginanego;
- $A_{s1}$  – pole przekroju zbrojenia zwykłego;
- $A_f$  – pole przekroju taśmy CFRP;
- $u_s$  – obwód zbrojenia zwykłego (prętów zbrojeniowych);
- $u_f$  – obwód czynny taśmy przenoszący siły przyczepności na beton;
- $\phi_s$  – średnica zbrojenia rozciąganego;
- $b_f$  – szerokość taśmy CFRP;
- $E_f$  – moduł sprężystości kompozytu;
- $E_s$  – moduł sprężystości stali zbrojeniowej;
- $\phi_{f,eq}$  – zastępcza średnica zbrojenia zwykłego i taśmy CFRP;
- $A_{f,eq}$  – zastępcze pole przekroju taśmy CFRP;

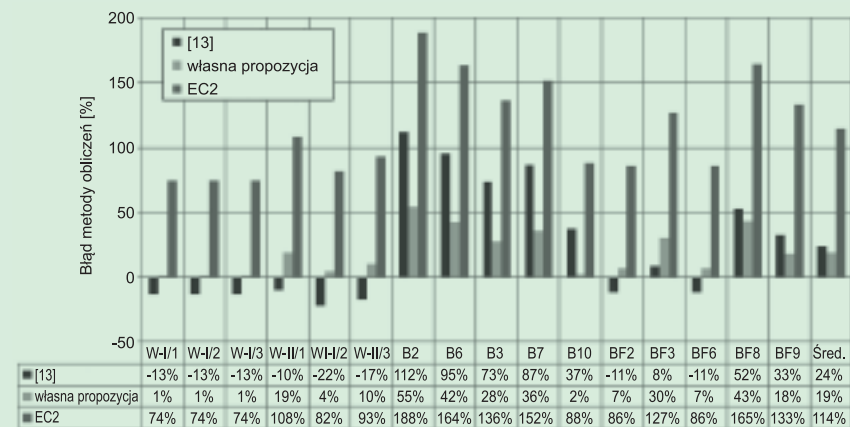
$k_1$  – współczynnik zależny od przyczepności zbrojenia i taśmy CFRP do betonu;  
 $k_2$  – współczynnik zależny od rozkładu odkształceń na wysokości przekroju przy zginaniu należy przyjąć równy 0,5.

Dokładność metod obliczeniowych zawartych w [13] i PN-B-03264:2002, z uwzględnieniem zmodyfikowanych zależności (wzór 1-5), zweryfikowano przez porównanie wyników obliczeń z wynikami badań [2, 5, 8]. W celu porównania wykonano również obliczenia średniego końcowego rozstawu rys wg EC2. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 5. Naj-



Rys. 5. Porównanie obliczonego średniego końcowego rozstawu rys prostopadłych z wynikami badań [2, 5, 8]

mniejszy średni błąd obliczeń wynoszący 21% (rysunek 6) uzyskano w przypadku średniego końcowego rozstawu rys określonego na podstawie zmodyfikowanych wzorów (1-5). Zbliżony jest on do błędu średniego uzyskanego metodą wg [13]. Największy błąd obliczeń, równy 94%, uzyskano w przypadku średniego końcowego rozstawu rys określonego wg wytycznych EC2. Otrzymano zawyżoną wartość średniego końcowego rozstawu rys (rysunek 6), ponieważ metoda nie uwzględnia korzystnego kształtu taśmy i jej położenia na zewnętrznej rozciąganej powierzchni belki.

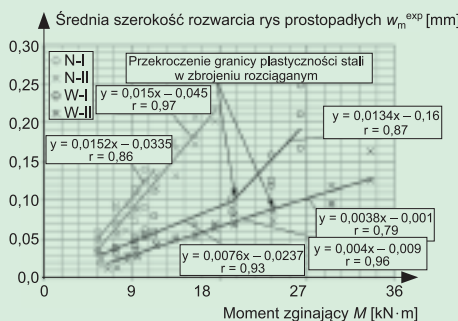


Rys. 6. Zestawienie błędów obliczeń średniego końcowego rozstawu rys prostopadłych w odniesieniu do wyników badań [2, 5, 8]

### Wpływ wzmocnienia taśmami CFRP belek żelbetowych na szerokość rys prostopadłych

Przyrost średniej szerokości rozwarcia rys w elementach wzmocnionych w wystarczająco dokładny sposób można opisać dwiema prostymi. Pierwsza z nich ma początek w punkcie odpowiadającym momentowi rysującemu, a koniec w punkcie odpowiadającym momentowi wywołującemu w zbrojeniu rozciągającym naprężenia równe granicy plastyczności. Natomiast druga linia ma początek w punkcie kończącym pierwszą prostą, a koniec na rzędnej odpowiadającej momentowi niszczącemu (rysunek 7). Analizując wyniki badań, można wnioskować, że wraz ze wzrostem przekroju taśmy załamanie wykresu ulega zmniejszeniu, co jest związane z dużym wpływem zbrojenia kompozytowego na ograniczenie szerokości rozwarcia rys [4, 5].

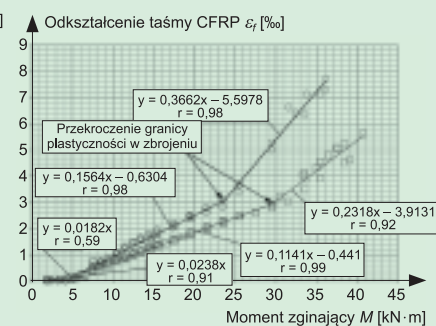
Szerokość rozwarcia rys prostopadłych w elementach wzmocnionych można obliczyć wg [13] oraz zmodyfikowanych wytycznych PN-B-03264:2002. Dokładność tych metod zweryfikowano przez porów-



Rys. 7. Przyrost średniej szerokości rys prostopadłych w belkach wzmocnionych i bez wzmocnienia w funkcji momentu zginającego [4]

nianie wyników obliczeń z wynikami badań [2, 5]. W celu porównania autorzy wykonali również obliczenia średniej szerokości rys wg EC2. W obu metodach przy obliczaniu średnich odkształceń zbrojenia rozciągającego, z uwzględnieniem efektu usztywnienia, ważne jest poprawne wyznaczenie naprężeń w zbrojeniu rozciągającym i taśmie CFRP w przekroju przez rysę. Naprężenia te można obliczyć, przyjmując liniowo-sprężysty model naprężenie-odkształcenie dla betonu, stali zbrojeniowej oraz taśmy (rysunek 1a).

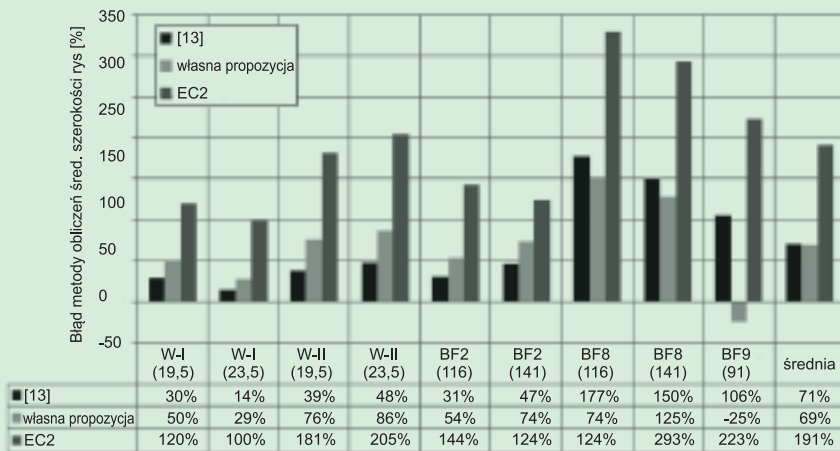
Model liniowo-sprężysty wg norm PN-B-03264:2002, PN-EN 1992-1-1 (EC2) oraz wytycznych [13] można stosować w zakresie, w którym naprężenia w zbrojeniu zwykłym  $\sigma_s$  nie przekraczają charakterystycznej granicy plastyczności stali  $f_{yk}$  (rysunek 8). Przy większych poziomach obciążeń uzyskiwane wyniki obliczeń są niezadowolające. W praktyce nie ma to jednak istotnego znaczenia, ponieważ przy tak dużych wartościach obciążeń nie jest możliwe w pełni bezpieczne użytkowanie konstrukcji. W związku z tym wytyczne dotyczące obliczania elementów wzmocnionych [13, 14] ograniczają do-



Rys. 8. Przyrost odkształceń taśmy CFRP w funkcji momentu zginającego [4]

puszczalne naprężenia w zbrojeniu rozciągającym do poziomu równego  $f_{yk}$ . W wyjątkowych sytuacjach do obliczenia naprężeń w zbrojeniu rozciągającym można wykorzystać trójliniowe modele zależności moment-krzywizna pozwalające na uwzględnienie III fazy pracy elementu wzmocnionego [11, 12].

Najmniejszy średni błąd obliczeń równy 69% (rysunek 9) uzyskano w przypadku średniej szerokości rys wyznaczonej wg zmodyfikowanych wzorów normy PN-B 03264:2002. Zbliżony jest on do błędu średniego uzyskanego wg [13] (rysunek 9). Największy błąd obliczeń (94%) otrzymano, stosując wytyczne EC2 (rysunek 9). Spowodowało to, że w normie EC2 nie została uwzględniona korzystna loka-



Rys. 9. Zestawienie błędów obliczeń średniej szerokości rys prostopadłych w odniesieniu do wyników badań [2, 5]

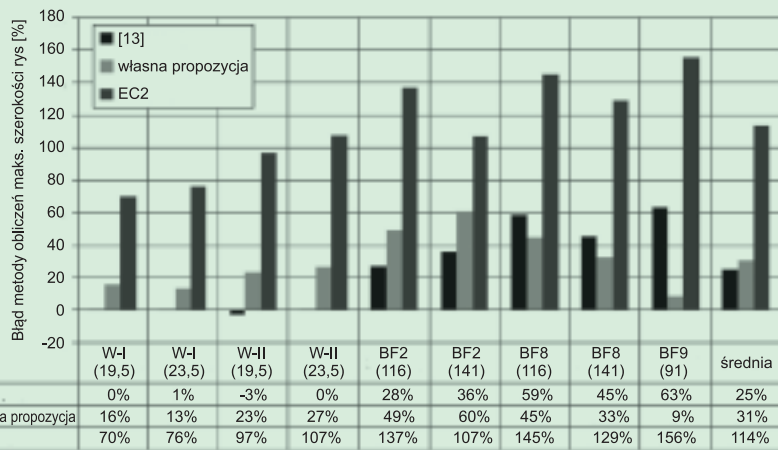
lizacja taśmy CFRP na zewnętrznej rozciąganej powierzchni belki.

Analizując średnie szerokości rozwarcia rys i ich morfologię, należy wziąć pod uwagę również możliwość występowania rys o znacznie większej szerokości niż ich wartość średnia. Stosowane metody obliczeniowe pozwalają na wyznaczenie jedynie średniej szerokości rozwarcia rys, natomiast szerokość maksymalna ustalana jest przez przemnożenie wartości średniej przez empirycznie wyznaczony i przyjęty normowo współczynnik  $\beta$ , w zależności od charakteru obciążenia oraz wymiarów elementu. Wartość tego współczynnika definiuje stosunek maksymalnej szerokości rozwarcia rysy do wartości średniej.

W przypadku elementów wzmocnionych taśmami CFRP przy obliczaniu szerokości rozwarcia rys prostopadłych należy przyjmować  $\beta = 1,8$ , co potwierdziły badania. Różnice między obliczoną charakterystyczną szerokością rozwarcia rys, wyznaczoną wg PN-B-03264, PN-EN 1992-1-1 oraz [13], a eksperymentalną [2, 5] przedstawiono na rysunku 10.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania doświadczalne i analizy wskazują, że wzmocnienie zginanych elementów żelbetowych taśmami z włókien węglowych wpływa korzystnie na ograniczenie szerokości rozwarcia rys prostopadłych oraz ich zasięgu na wysokości przekroju. Wykazano ponadto, że metoda projektowania wzmocnień taśmami CFRP zginanych elementów żelbetowych z uwagi na stan graniczny zarysowania, zawarta w [13], pozwala na bezpieczne projektowanie wzmocnień konstrukcji. Przy obliczaniu charakterystycznej szerokości rys prostopadłych w elementach wzmoc-



Rys. 10. Zestawienie błędów obliczeń maksymalnej szerokości rys prostopadłych w odniesieniu do wyników badań [2, 5]

nionych kompozytami CFRP proponuje się przyjmować współczynnik wyrażający stosunek maksymalnej do średniej szerokości rysy równy  $\beta = 1,8$ .

Zaproponowany w artykule sposób prognozowania zarysowania w elementach żelbetowych wzmocnionych kompozytami CFRP pozwala z dużą dokładnością określić średni końcowy rozstaw rys oraz w sposób zadowalający średnią i maksymalną szerokość rys.

## Streszczenie

Dokonano oceny wpływu wzmocnienia taśmami CFRP zginanych belek żelbetowych na wartość momentu rysującego, średni rozstaw rys prostopadłych oraz ich szerokość rozwarcia. Wyniki obliczeń szerokości oraz średniego rozstawu rys w elementach wzmocnionych taśmami CFRP, uzyskane przy użyciu najczęściej stosowanych metod obliczeniowych, zestawiono z wynikami badań własnych i innych autorów. W rezultacie zaproponowano nowe

podejście do obliczania rozstawu rys prostopadłych do osi elementu w zginanych belkach żelbetowych, bazując na wytycznych normy PN-B-03264:2002. Zweryfikowano je doświadczalnie, wykorzystując wyniki dotychczasowych badań.

**Słowa kluczowe:** elementy zginane, wzmocnienie, taśmy CFRP, moment rysujący, rysy prostopadłe.

## Abstract

Influence of strengthening by the application of CFRP strips to flexural reinforced concrete beams, on the cracking moment, mean cracks spacing and their widths has been evaluated. The results of cracks width and spacing calculations in the strengthened reinforced concrete beams with CFRP strips,

obtained with most popular calculating methods, have been compared with both own test results and those of other authors. As a result of analysis a new approach, based of guidelines of PN-B-03264:2002, for calculating flexural cracks spacing in the beams strengthened with CFRP strips has been proposed. The new model for cracks calculating has been verified with previous tests results.

## Literatura

- [1] Holzenkämpfer P.: Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Institut Für Baustoffe, Massivbau Und Brandschutz. Braunschweig, Germany, 1997.
- [2] Mathtys S.: Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. Ghent University, Faculty of Engineering, Ghent, Belgium, 2000.
- [3] Kaminska M.E., Kotynia R.: Experimental Research on RC beams strengthened with CFRP strips. Katedra Budownictwa Betonowego, Wy-

dział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.

[4] Staszewski M.: Nośność, zarysowanie i ugięcia zginanych elementów żelbetonowych wzmocnionych taśmami węglowymi. Rozprawa doktorska. Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2012.

[5] Głodkowska W., Staszewski M.: Zarysowanie belek żelbetonowych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych. Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Krynica, 2008, tom VI, s. 171 – 178.

[6] Głodkowska W., Staszewski M.: Ugięcia i zarysowanie belek żelbetonowych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych. Inżynieria i Budownictwo, tom 64, s. 313 – 316, 2008.

[7] Valivonis J., Skuturna T.: Cracking and strength of reinforced concrete structures in flexure

strengthened with carbon fibre laminates. Journal of Civil Engineering and Management, vol. 13, no. 4, pp. 317 – 323, 2007.

[8] Khowman N., Foster S.J., and Smith S.T.: Debonding failure in CFRP flexurally strengthened reinforced concrete beams. The University of New South Wales, New South Wales, R-400, Sep. 2005.

[9] Miller B., Nanni A.: Bond Between CFRP Sheets and Concrete. Presented at the ASCE 5th Materials Congress, Cincinnati, OH, 1999, pp. 240 – 247.

[10] Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., and Jiang J.J.: Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. Engineering Structures, vol. 27, no. 6, pp. 920–937, May 2005.

[11] Górski M., Krzywoń R.: Sztywność zginanych belek żelbetonowych wzmocnionych nakładkami FRPR – referat z konferencji: Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Krynica, 2008, tom VI, s. 179 – 186.

ukowo-badawcze budownictwa, Krynica, 2008, tom VI, s. 179 – 186.

[12] Korentz J.: Metoda obliczania ugięcia belek żelbetonowych wzmocnionych materiałem kompozytowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, tom z. 58, nr 3/II, s. 143 – 150, 2011.

[13] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures: technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. Fib Bulletin No. 14. Lausanne. fib, 2001.

[14] ACI Committee 440 and American Concrete Institute, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2008.

dr inż. Jacek Domski\*

## Wybrane cechy wytrzymałościowe betonów drobnokruszywowych modyfikowanych włóknami stalowymi

*Chosen mechanical properties of fine aggregate concretes modified by steel fibre*

Celem prezentowanych badań jest wykorzystanie piasku odpadowego zalegającego na hałdach Pomorza Środkowego, jako podstawowego składnika mieszanki betonowej [1]. Piasek będący pozostałością po hydroklasyfikacji pospółki jest obecnie wykorzystywany przede wszystkim na betonowe posadzki przemysłowe [2], ale trwają prace nad stosowaniem go do produkcji elementów konstrukcyjnych, obciążanych statycznie i/lub dynamicznie [3, 4, 5, 6]. Należy podkreślić, że aby móc zaprojektować betonowy element konstrukcyjny z dodatkiem włókien stalowych, należy uwzględnić jego specyficzne cechy, które determinują nieco inne badania w porównaniu z badaniami wykonywanymi w przypadku tzw. betonów zwykłych. Przykładem jest zaproponowany w PN-EN 14651:2007 po-

miar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP) [7, 8, 9]. Dzięki niemu możliwe jest zaprojektowanie elementów wykonanych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego.

### Opis badań

Zaprojektowano dwie mieszanki fibropiaskobetonowe ze stosowanymi zamiennie włóknami stalowymi o smukłości 54,5 i 62,5. Użyte haczykowane włókna, o wymiarach (długość/średnica) 50/0,8 i 30/0,55 mm, charakteryzowały się właściwościami określonymi w [10]. Ilość użytych włókien uwarunkowana była zaplanowaną klasą betonu, co najmniej C20/25 i urabialnością mieszanki dostosowaną do możliwości produkcji w tradycyjnych wytwórniach betonu. W tabeli przedstawiono skład mieszanek betonowych oraz serie elementów próbnych wykonanych w sezonie jesienno-zimowym w pomieszczeniu, w którym temperatura powietrza wynosiła ok. +22 °C. We wszystkich seriach

utrzymywano jednakowy reżim technologiczny. Przez pierwsze 24 h (do chwili rozformowania) oraz przez kolejne 6 dni próbki dojrzewały w warunkach podwyższonej wilgotności, tj. były szczelnie przykryte folią. Po siedmiu dniach dojrzewania przetransportowano je do hali laboratoryjnej, gdzie znajdowały się do czasu zakończenia badań. Temperatura powietrza w hali wynosiła 18 – 22 °C, natomiast wilgotność 50 – 75%. Pomiar wilgotności i temperatury w obu pomieszczeniach wykonywano przy użyciu rejestratorów EBI-2, zaprogramowanych na zapis co 30 min.

Elementy próbne wykonywano seriami, przy czym każda składała się z trzech belek (15 x 15 x 55 cm), trzech walców (15 x 30 cm) oraz sześciu kostek (o boku 15 cm). Elementy belkowe przygotowano do badań przez ich nacięcie w środku rozpiętości (po 24 h od betonowania) na głębokość 25 mm. Próbkę typu B posłużyły do określenia wytrzymałości na ściskanie, na walcach określono

\* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu