

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński\*  
dr inż. Czesław Bywalski\*  
mgr inż. Maciej Kaźmierowski\*

# Nośność na ścinanie belek wykonanych z fibrobetonu

*Shear capacity of fiber reinforced concrete beams*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono kilka sposobów obliczania nośności na ścinanie belek fibrobetonowych z betonu zwykłej wytrzymałości. Omówiono czynniki wpływające na nośność belek na ścinanie. Porównano nośności na ścinanie belek fibrobetonowych otrzymanych z poszczególnych metod z wartościami doświadczalnymi.

**Słowa kluczowe:** fibrobeton, włókna stalowe, belki, nośność na ścinanie.

**Abstract.** Several methods for calculating the shear capacity of fiber reinforced concrete beams with concrete of normal strength are presented in the article. The factors affecting the shear capacity of beams are discussed. The results of shear capacities of fiber reinforced concrete beams, which were obtained from each of the method with experimental values, are compared.

**Keywords:** fiber reinforced concrete, steel fibers, beams, shear capacity.

Ścinanie w belkach żelbetowych jest jednym ze stanów granicznych nośności, który należy sprawdzać na etapie projektowania konstrukcji. Beton jest materiałem kruchym, dlatego poszukuje się sposobów poprawy jego wytrzymałości na rozciąganie. Zaczęto więc dodawać do betonu zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowych lub tworzyw sztucznych. W ten sposób uzyskano nowy materiał (kompozyt) nazywany fibrobetonem (drtobetonem). W porównaniu z betonem bez włókien, fibrobeton charakteryzuje się większą ciągliwością i wytrzymałością na rozciąganie, pozwala na stosowanie przekrojów o mniejszych wymiarach oraz zastąpienie zbrojenia poprzecznego (strzemion) zbrojeniem rozproszonym [1]. Mając to na uwadze, zasadne wydaje się popularyzowanie tego materiału przez przybliżenie algorytmów projektowania przekrojów fibrobetonowych na ścinanie.

## Czynniki decydujące o nośności na ścinanie fibrobetonu

Efektywność mechaniczna zbrojenia rozproszonego  $f_{Ef, mech.}$  (stopień zbrojenia włóknistego) określa współdziałanie pojedynczych włókien w betonie, umożliwiając hamowanie jego zarysowania. Zależy ona od smukłości  $\lambda$  i kształtu włókien (zakończenia haczykowate, wiosłkowe itp.), objętościowego udziału  $V_f$  włókien w kompozycie,

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

przestrzennego rozkładu włókien w betonie oraz przyczepności włókien do matrycy cementowej ( $\tau_f$ ), wynikającej z mechanicznego zakotwienia, adhezji i tarcia [2].

$$f_{Ef, mech.} = V_f \lambda \tau_f$$

gdzie:

$V_f = W_f / \rho_f$  – objętościowy udział włókien;  
 $W_f$  – bezwymiarowy parametr zawartości włókien w jednostce objętości;  
 $\rho_f$  – gęstość włókien;  
 $\lambda = L/d$  – smukłość włókien;  
 $L, d$  – długość, średnica włókien;  
 $\tau_f$  – przyczepność włókien.

Nośność na ścinanie belek fibrobetonowych zależy od struktury zbrojenia rozproszonego, stopnia zbrojenia podłużnego, kształtu i wymiarów geometrycznych przekroju oraz klasy wytrzymałościowej betonu. Nośność na ścinanie przekrojów fibrobetonowych nie może być reprezentowana przez charakterystykę wytrzymałości na ściskanie (np. klasę betonu), tak jak w przypadku betonu bez włókien. Do metod projektowych obliczania nośności na ścinanie belek fibrobetonowych należy określić wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie, umownie nazywaną (w zależności od stosowanej metody) równoważną wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu lub resztkową wytrzymałością na rozciąganie. Wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie określa się na podstawie badań na znormalizowanych belkach o przekroju 150×150 mm (dla metod omawianych w artykule) do momentu osiągnięcia przez nie założonego poziomu ugięcia lub szerokości rozwarcia rys (szczeliny) [3].

## Wybrane metody obliczania nośności na ścinanie belek fibrobetonowych

### Metoda RILEM TC 162-TDF [3].

W przypadku tej metody punktem wyjścia jest wzór na obliczenie nośności na ścinanie zgodnie z EC2 [4]. Zakłada on, że zdolność do przenoszenia siły ścinającej  $V_{Rd}$  jest sumą trzech składników pochodzących od nośności betonu ( $V_{cd}$ ), strzemion ( $V_{wd}$ ) oraz włókien ( $V_{fd}$ ):

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}$$

gdzie:

$V_{fd} = k_f \cdot k_i \cdot \tau_{fd} \cdot b \cdot d$ ;  
 $k_f, k_i$  – współczynniki uwzględniające odpowiednio: kształt przekroju i wysokość, a  $b, d$  – odpowiednio szerokość i wysokość przekroju;  
 $\tau_{fd} = 0,12 f_{R,4}$  – obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie fibrobetonu.

Kluczową wielkością w metodzie jest paramater  $f_{R,4}$  uwzględniający resztkowe naprężenia rozciągające przy zginaniu, wyznaczone w próbie trzypunktowego zginania belki [5].

**Metoda CNR-DT 204/2006 [5].** Pozytywny wpływ na nośność ścinanej belki betonowej z włóknami stalowymi włoski komitet badawczy uwzględnił przez wprowadzenie dodatkowego współczynnika przed parametrem  $f_{ck}$  we wzorze na nośność na ścinanie elementu bez zbrojenia na ścinanie:

$$V_{Rd,F} = 0,13k \left[ \rho_1 \left( 1 + 7,5 \frac{f_{R,4k}}{f_{ck}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} bd$$

gdzie:

$k$  – współczynniki uwzględniający wysokość przekroju;  
 $\rho_1$  – stopień zbrojenia podłużnego, rozciąganego;

$b, d$  – odpowiednio szerokość i wysokość przekroju;

$f_{ctk}$  – charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie osiowe

$f_{ck}$  – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie.

Wartość  $f_{Ftuk}$  jest równoważną, charakterystyczną wytrzymałością na rozciąganie fibrobetonu przy zginaniu, uzyskaną z pomiaru dwóch wartości naprężeń rozciągających przy zginaniu ( $f_{eq1}$  i  $f_{eq2}$ ) przydatnych do określania stanu granicznego użyteczności i nośności belek. Badanie wykonuje się analogicznie jak w metodzie RILEM TC 162-TDF, realizując normową próbę zginania, określoną przez CNR-DT 204/2006.

**Metoda DIN 1045-1.** Zaproponowana w normie [6] rekomendacja projektowa nośności fibrobetonu na ścinanie  $V_{Rd,ct}^f$  przybrała postać:

$$V_{Rd,ct}^f = V_{Rd,ct} + V_{Rd,ct}^f$$

gdzie:

$V_{Rd,ct}, V_{Rd,ct}^f$  – odpowiednio nośność na ścinanie przenoszona przez beton i włókna;

$$V_{Rd,ct}^f = (\alpha_c^f \cdot f_{ctR,u}^f \cdot b \cdot h) / \gamma_{ct}^f$$

$f_{ctR,u}^f$  – charakterystyczna wytrzymałość rezydualna na rozciąganie;

$\gamma_{ct}^f$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa określany wg [4];

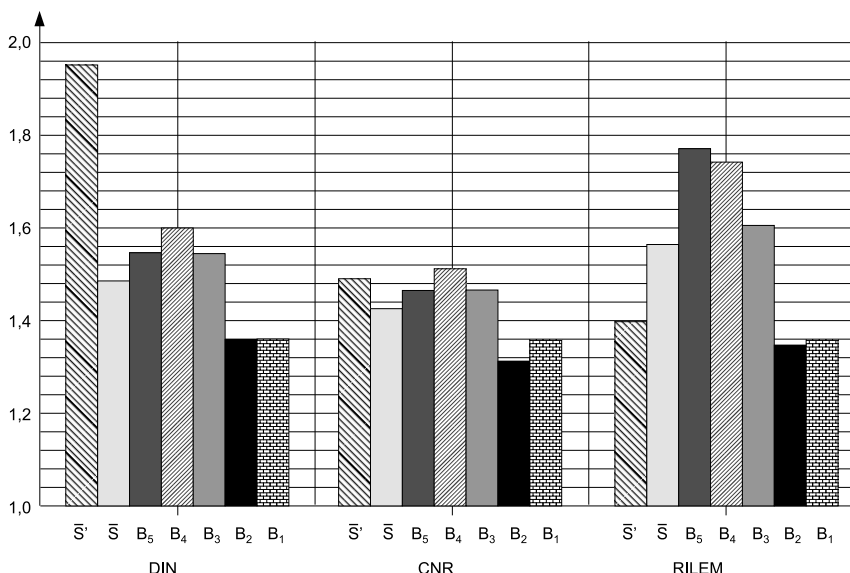
$\alpha_c^f$  – współczynnik redukujący resztkową wytrzymałość na rozciąganie uwzględniający długoterminowy i niekorzystny efekt przyłożenia obciążenia;

$b, h$  – odpowiednio szerokość i wysokość przekroju.

Podobnie jak we wcześniejszych metodach problemem jest ustalenie rezydualnej wartości na rozciąganie fibrobetonu  $f_{ctR,u}^f$ . Badanie przeprowadza się na zginanej próbce wzorcowej, poddanej obciążeniu  $F_{3,5}$  przy ugięciu 3,5 mm.

### Porównanie wyników doświadczalnych z teoretycznymi

Przeanalizowano doświadczalne, niszczące wartości sił tnących na ścinanie pięciu swobodnie podpartych belek fibrobetonowych bez strzemion (na rysunku belki B1 ÷ B5), obciążonych dwupunktowo, o przekroju prostokątnym i wymiarach 100×150×1000 mm, stopniu zbrojenia podłużnego 0,82%, wytrzymałości na ściskanie  $f_{ck} = 40$  MPa, smukłości stalowych włókien  $\lambda = 50$  oraz nominalnej zawartości zbrojenia rozproszonego 0 ÷ 2% (skok co 0,5%) [7]. Wytrzymałość resztkową na rozciąganie, wykorzystując różne metody obliczania nośności na ścinanie fibrobetonu,



Wartości współczynnika  $S = V_{exp} / V_{tot}$  dla pięciu belek z fibrobetonu,  $\bar{S}$  – średnia współczynników pięciu belek z fibrobetonu,  $\bar{S}^1$  – średnia współczynników wg [8]

określono na podstawie wzorów otrzymanych z estymacji. Teoretyczna wartość wytrzymałości resztkowej na rozciąganie jest liniową funkcją, zmienną w przedziałach, zależną od stopnia zbrojenia rozproszonego, smukłości włókien oraz wytrzymałości na ściskanie fibrobetonu [8]. Za kryterium oceny dokładności metod przyjęto średnią wartość współczynnika  $s$  wyrażającego stosunek siły doświadczalnej  $V_{exp}$  do teoretycznej  $V_{tot}$  nośności na ścinanie belek fibrobetonowych. Współczynniki  $s$  można porównać ze współczynnikami  $s$  z pracy [8] (rysunek), które dotyczyły analizy tych samych metod obliczania nośności na ścinanie fibrobetonu i zostały określone na podstawie ponad stu przebadanych belek.

### Podsumowanie

Na podstawie porównania wyników badań doświadczalnych z teoretycznymi nośnościami na ścinanie belek fibrobetonowych oraz przeglądu literaturowego sformułowano następujące wnioski:

- dla poszczególnych metod (półempirycznych) zapasy nośności wynoszą: DIN – 48%, CNR – 42%, RILEM – 56%;

- najlepszą zgodność wyników dała metoda CNR; potwierdza to również zbieżność współczynnika uzyskanego z przeanalizowanych belek z zawartym w pracy [8] wynoszącego 95% (1,42/1,49);

- wpływ na różnice w wartościach  $V_{exp} / V_{tot}$  zależą głównie od: wytrzymałości betonu na ściskanie, przyjętych

współczynników obliczeniowych, smukłości ścinania, stopnia zbrojenia włóknistego oraz sposobu estymacji wytrzymałości resztkowej na rozciąganie;

- wytrzymałość resztkowa na rozciąganie jest podstawowym, doświadczalnym parametrem projektowym fibrobetonu w określaniu nośności na ścinanie, który uwzględnia wpływ struktury zbrojenia rozproszonego oraz betonu.

### Literatura

- [1] Łapko A., Krasnowska J., Iwaniuk P.: Wzmocnienie stref ścinania belek żelbetowych z lokalnym zastosowaniem włókien stalowych, Materiały Budowlane, 10/ 2013, 32 – 35.
- [2] Glinicki M.: Beton ze zbrojeniem strukturalnym. XXV Ogólnopolskie warsztaty projektanta konstrukcji, 2010, 279 – 308.
- [3] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Materials and Structures, Vol. 36, 2003, 560 – 567.
- [4] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [5] CNR-DT 204/2006 Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures, National Research Council, November 2007.
- [6] DIN 1045-1 Stahlfaserbeton nach der DAfStb-Richtlinie, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 512, 2003.
- [7] Londhe R. S.: Experimental investigation on shear strength of sfrc beams reinforced with longitudinal tension steel rebars, Asian Journal of Civil Engineering (building and housing), vol. 11, No 3, 2010, 385 – 395.
- [8] Mondo E.: Shear Capacity of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams without Conventional Shear Reinforcement, Master of Science Thesis Stockholm, Sweden, 2011.