

mgr inż. Damian Szczech<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0002-8357-2877

prof. dr hab. inż. Renata Kotynia<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-7247-1229

# Badania na ścinanie belek zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami FRP

## *Shear tests of beams reinforced longitudinally and transversely with FRP bars*

DOI: 10.15199/33.2024.04.06

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przegląd literatury w dziedzinie badania na ścinanie belek zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami FRP. Przegląd badań obejmuje zestawienie parametrów różnych zmiennych: rodzaju zastosowanego zbrojenia; wysokości użytecznej elementu; szerokości belek; smukłości ścinania; wytrzymałości betonu na ściskanie; stopnia zbrojenia podłużnego i poprzecznego; modułu sprężystości prętów; kształtu strzemion; porównania z elementami zbrojonymi prętami stalowymi, a także schematu statycznego. Na podstawie przeglądu wiedzy zaproponowano program badań własnych.

**Słowa kluczowe:** ścinanie; FRP; strzemiona GFRP; przekrój teowy; nośność na ścinanie.

**Abstract.** This article presents a review of research in the field of shear tests of beams with longitudinal and transverse FRP reinforcement. The research review includes a summary of the parameters of various variables: type of reinforcement, depth of the element, width of the beams, shear span to depth ratio, compressive strength of concrete, longitudinal and transverse reinforcement ratio, modulus of elasticity of bars, shape of stirrups, comparison with elements reinforced with steel bars, as well as the static scheme. Based on the foreign studies the own research program has been proposed.

**Keywords:** shear; FRP; GFRP stirrups; T-section beams; Shear strength.

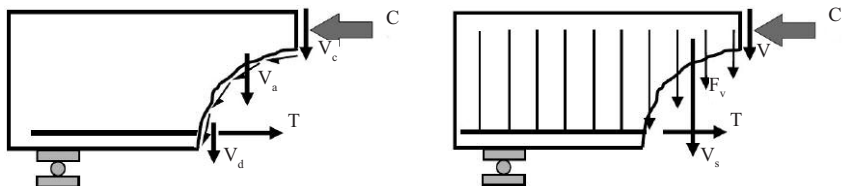
Zagadnienie ścinania w konstrukcjach z betonu zbrojonego jest bardzo złożone ze względu na jednoczesne działanie momentu i siły poprzecznej w strefach przypodporowych [1, 2]. Złożony stan naprężenia spowodowany jednoczesnym występowaniem momentu zginającego i sił poprzecznych jest trudny do jednoznacznego opisu, ponieważ w przenoszeniu siły tnącej współpracuje w pierwszej kolejności beton i zbrojenie poprzeczne, a pośrednio także zbrojenie podłużne projektowane na zginanie. Ścinanie w belkach betonowych zależy zatem nie tylko od wytrzymałości betonu na rozciąganie i ściskanie, ale także od właściwości zbrojenia podłużnego i poprzecznego [1, 3, 4].

Zjawisko ścinania w strefie przypodporowej jest wieloaspektowe ze względu na występowanie kilku mechanizmów przeniesienia siły poprzecznej wewnątrz elementu betonowego pod obciążeniem. Do podstawowych mechanizmów należą udział: siły przenoszonej przez zbrojenie poprzeczne  $V_s$ ; siły w strefie ściskanej betonu niezarysowanego  $V_c$ ; tarcie wzdłuż

rysy spowodowanej ząbieniem się kruszywa (ang. *aggregate interlock*)  $V_a$ ; poprzeczna praca zbrojenia podłużnego (ang. *dowel action*)  $V_d$  oraz resztkowa wytrzymałość na rozciąganie betonu w poprzek rysy ukośnej [2, 4]. Udział betonu i zbrojenia w przenoszeniu obciążeń przedstawiono na rysunku 1. Na nośność na ścinanie wpływ ma wiele czynników, m.in.: kształt przekroju elementu; rodzaj, ilość i rozstaw zbrojenia podłużnego i poprzecznego; wytrzymałość betonu i prętów; moduł sprężystości zbrojenia; przyczepność prętów kompozytowych do betonu; rodzaj i wielkość kruszywa oraz wpływ smukłości ścinania [1 – 4].

Pręty kompozytowe zbudowane z włókien FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) są coraz częściej stosowane jako zamiennik tradycyjnego zbrojenia stalowego, szczególnie w konstrukcjach betonowych. Główne powody stosowa-

nia zbrojenia niemetalicznego w betonie to: brak właściwości magnetycznych; duża wytrzymałość na rozciąganie; bardzo mała waga (pręty kompozytowe są od 3,5 do 6 razy lżejsze w porównaniu ze stalą, co znacznie obniża koszty transportu i montażu takiego zbrojenia). Bez wątpienia jedną z największych zalet materiałów FRP jest duży stosunek wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru materiału, który jest 10 – 15 razy większy niż w przypadku stali. Ponadto, zbrojenie kompozytowe zapewnia dużą trwałość betonu zbrojonego, dzięki dobrej odporności chemicznej i odporności na korozję [5]. Właściwości mechaniczne zbrojenia kompozytowego FRP różnią się pod wieloma względami od konwencjonalnego zbrojenia stalowego i w dużym stopniu zależą od rodzaju włókien i żywic zastosowanych w produkcji tego zbrojenia [6]. Anizotropowa budowa prętów kompo-



Rys. 1. Udział betonu i zbrojenia w przenoszeniu obciążeń

Fig. 1. Contribution of concrete and reinforcement to load transfer

<sup>1)</sup> Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: damian.szczech@p.lodz.pl

zytowych powoduje, że wykazują one zupełnie odmienne właściwości mechaniczne w obu kierunkach.

Nośność belek na ścinanie jest bardziej złożona, gdy zbrojenie podłużne i poprzeczne jest wykonane z prętów kompozytowych o anizotropowej budowie. Ponadto zbrojenie FRP, ze względu na liniowo-sprężystą charakterystykę, całkiem inaczej współpracuje w przenoszeniu naprężeń ścinających w porównaniu ze zbrojeniem stalowym.

Pomimo opracowanych teoretycznych podstaw zagadnienia projektowania stref poddanych ścinaniu, powstawaniu nowych teorii i modeli ścinania oraz modyfikacji istniejących, opracowaniu oryginalnych wzorów na podstawie własnych badań doświadczalnych problem ścinania jest wciąż aktualny. Opracowano już wprawdzie wytyczne i procedury normowe do projektowania elementów zbrojonych prętami kompozytowymi (amerykańskie ACI 440.1R-15, włoskie CNR-DT-203/2006, kanadyjskie CAN/CSA S806-12, japońskie JSCE i inne zagraniczne normy), ale nie powstały dotychczas polskie zalecenia, dlatego też projektanci korzystają z zagranicznych procedur projektowych.

## Charakterystyka bazy literaturowej

Na podstawie analizy wybranej literatury stworzono bazę danych, obejmującą badania na ścinanie betonowych belek zbrojonych podłużnie na zginanie i poprzecznie na ścinanie prętami kompozytowymi [3, 4, 7 – 39]. Analizie poddano wyłącznie elementy z poprzecznym zbrojeniem na ścinanie.

Przeanalizowano wiele badań, z których wyodrębniono następujące parametry zmienne analizowane w programach badawczych: wysokość użyteczna  $d$ ; szerokość belki  $b$ ; smukłość ścinania  $a/d$ ; wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_c$ ; stopień zbrojenia podłużnego  $\rho_l$ ; stopień zbrojenia poprzecznego  $\rho_t$ ; podłużny moduł sprężystości zbrojenia  $E$  oraz kształt i typ zbrojenia poprzecznego ( $O/U$ ). Symbolem S oznaczono programy badawcze zawierające elementy zbrojone wyłącznie prętami stalowymi o takich samych parametrach zmiennych, jak belki zbrojone prętami kompozytowymi. W tabeli 1 zamieszczono wykaz

**Tabela 1. Parametry zmienne w programach badawczych**

*Table 1. Variable parameters in research programs*

Autorzy	FRP	d	b	a/d	$f_c$	$\rho_l$	$\rho_t$	E	O/U	S
Nagasaka, Fukuyama, Tanigaki, 1993	C, A, G, H			•	•	•				•
Tottori i Wakui, 1993	C, G, A					•	•	•		
Maruyama i Zhao, 1994	C					•	•			
Okamoto, Nagasaka, Tanigaki, 1994	A, C			•		•				
Zhao, Maruyama, Suzuki, 1995	G, C			•	•	•	•			
Nakamura i Higai, 1995	G					•				
Vijay, Kumar, Ganga Rao, 1996	G					•	•			
Zhao, Maruyama, 1996	C, G	•				•				
Duranović, Pilakoutas, Waldron, 1997	G			•		•				
Alsayed, Al-Salloum, Almusallam, 1997	G					•	•			•
Shehata, Morphy, Rizkalla, 2000	G, C					•				
Alkhrdaji, Wideman, Belarbi, Nanni, 2001	G					•	•			
Guadagnini, 2002	G, C			•		•				
Whitehead, Ibell, 2005	A					•	•		• <sup>1</sup>	
Guadagnini, Pilakoutas, Waldron, 2006	G, C			•		•	• <sup>2</sup>	•		
Matta, Nanni, Galati, Mosele, 2007	G	•				•	•			
Imjai, 2007	G, C					•	•			
Hegger, Niewels, Kurth, 2009	G					•	•			
Niewels, 2008	G			•		•	•			
Ascione, Mancusi, Spadea, 2010	G, C				•	•				
Spadea, 2010	G, C					•	•			
Ahmed, El-Salakawy, Benmokrane, 2010	C						•			
Bentz, Massam i Collins, 2010	G	•					•			
El-Mogy, El-Ragaby, El-Salakawy, 2011	G						•			
Kamińska, Szymczak, Olbryk, Chołostiakow, 2012	G						•			
Yang, 2014	G, C			•		•	•			
Tomlinson, Fam, 2014	B					•				
Issa, Ovitigala, Ibrahim, 2015	B			•		•				
Said, Adam, Mahmoud, Shanour, 2016	G				•	•				
Bywalski, Drzazga, Kaźmierowski, Kamiński, 2016	G						•		• <sup>3</sup>	
Chołostiakow, Di Benedetti, Pilakoutas, Guadagnini, 2018	C, G, B	•			•					
Jumaa i Yousif, 2019	B	•					•			
Krall i Polak, 2019	G	•				• <sup>4</sup>	•		• <sup>5</sup>	
Yuan i Wang, 2019	C						• <sup>6</sup>			
Fan, Zhou, Tu i Zhang, 2021	B	•					•			
Szczech, Kotynia 2022	G					•	•			•

• program badawczy analizował wpływ danego parametru zmiennego na nośność na ścinanie. Oznaczenie symboli: FRP – rodzaj zastosowanych prętów (G – szklane, C – węglowe, A – aramidowe, B – bazaltowe, H – hybridowe), d – wysokość użyteczna elementu, b – szerokość elementu, a/d – smukłość ścinania,  $f_c$  – wytrzymałość betonu,  $\rho_l$  – stopień zbrojenia podłużnego,  $\rho_t$  – stopień zbrojenia poprzecznego, E – moduł sprężystości prętów, O/U – wpływ kształtu zbrojenia poprzecznego; 1 – wpływ kształtu zbrojenia poprzecznego (spirale ciągłe i helisy prostokątne) oraz lokalizacja tego zbrojenia; 2 – zastosowano zbrojenie poprzeczne w formie zewnętrznych strzemion; 3 – wpływ rodzaju zbrojenia poprzecznego: strzemiona zamknięte oraz pręty pionowe z zakończeniem główkowym; 4 – wpływ liczby warstw zbrojenia podłużnego, średnicy i układu prętów w przekroju; 5 – wpływ średnicy zbrojenia poprzecznego i jego rozstaw; 6 – wpływ nachylenia i rozstawu strzemion

wybranych i poddanych analizie 35 prac doświadczalnych z wyszczególnieniem badanych czynników zmiennych. W ostatniej kolumnie tabeli oznaczono programy badawcze zawierające więcej niż jeden element belkowy ze zbrojeniem stalowym, w celu odniesienia wyników badań belek zbrojonych kompozytami do belek zbrojonych tradycyjnym zbrojeniem stalowym.

Ze względu na różnorodność parametrów zmiennych, w badaniach przedstawiono uproszczoną formę bazy danych jako skrócony wykaz parametrów zmiennych poddanych analizie w programach badawczych badań obcych (tabela 1). W analizie parametrów zmiennych ograniczono się wyłącznie do elementów zbrojonych poprzecznie na ścinanie prętami kompozytowymi.

## Analiza badań obcych

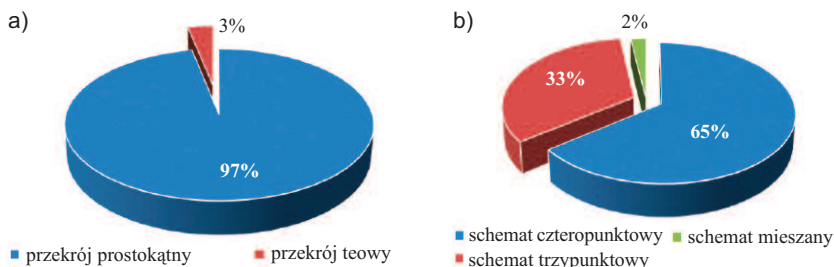
Analiza dotychczasowych badań pozwoliła na wyodrębnienie 35 prac badawczych, na podstawie których przeanalizowano 191 jednoprzęsłowych, swobodnie podpartych belek, zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami kompozytowymi. Wartości skrajne parametrów zmiennych, wraz z wartością średnią i odchyleniem standardowym, przedstawiono w tabeli 2. Przeważały belki o przekroju prostokątnym. Jedynie 6 belek miało przekrój teowy (rysunek 2). To skłoniło autorów do przeprowadzenia badań własnych na bardziej wymagających belkach o przekroju teowym, uwzględniając współpracę półek ze środnikiem. 1/3 elementów badano w trzypunktowym schemacie statycznym, w którym obciążenie przykładane było przez jeden siłownik (rysunek 2), natomiast 2/3 belek obciążano dwoma siłami skupionymi (czteropunktowy schemat statyczny). W czterech belkach elementy badano dwukrotnie, najpierw w czteropunktowym schemacie statycznym, a następnie zmieniano schemat na trzypunktowy.

W przeanalizowanych programach badawczych przyjmowano cztery typy zbrojenia podłużnego: pręty szklane GFRP (43%); pręty węglowe CFRP (27%); pręty aramidowe AFRP (23%) oraz pręty bazaltowe BFRP (6%). Najczęściej programy badawcze zakładały

**Tabela 2. Parametry zmienne badanych elementów z bazy danych**

*Table 2. Variable parameters of research elements in the database*

Parametr	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia	Mediana	Dominanta	Odchylenie standardowe
<b>Geometria</b>						
h [mm]	200	1000	360	300	300	152
b [mm]	110	914	207	200	150	97
d [mm]	145	937	304	253	250	135
<b>Schemat statyczny</b>						
$L_{tot}$ [mm]	1500	7000	2901	3000	3300	798
$L_{span}$ [mm]	600	5000	1986	2000	900	943
a [mm]	300	3050	821	700	625	466
a/d [-]	1,2	4,4	3,0	2,6	2,5	1,0
<b>Beton</b>						
$f_c$ [MPa]	20,0	84,2	42,0	37,7	48,0	15,0
$a_g$ [mm]	8	20	11	10	9,5	4
<b>Zbrojenie podłużne</b>						
$\rho_l$ [%]	0,32	3,98	2,00	1,43	1,90	1,00
$E_l$ [GPa]	29	165	72	58	56	33
$f_l$ [MPa]	397	2200	1058	1089	1295	351
$\phi_l$ [mm]	7,9	32	17	16	16	6
n [szt.]	2	12	5	4	4	3
<b>Zbrojenie poprzeczne</b>						
$\rho_t$ [%]	0,03	1,50	0,50	0,37	0,12	0,40
$E_t$ [GPa]	27,9	241	72,0	58,0	27,9	42,0
$f_t$ [MPa]	230	4140	1022	93	903	537
s [mm]	24	406	148	150	233	81
$\phi_t$ [mm]	4	20	9	8	8	3



**Rys. 2. Podział belek wg przekroju poprzecznego (a) i schematów statycznych elementów (b)**  
*Fig. 2. Division of beams by cross-section (a) and static schemes of elements (b)*

jednolity rodzaj zbrojenia podłużnego i poprzecznego. W kilku zastosowano mieszany rodzaj zbrojenia (inny rodzaj prętów podłużnych i inny rodzaj strzemion), co pokazuje rysunek 3. Tylko w jednym programie badawczym [36] w trzech belkach przyjęto nachylone strzemiona pod kątem 45°, 60° i 65°, podczas gdy w pozostałych 188 badanych elementach przyjęto pionowe zbrojenie poprzeczne. Zamkniętych strzemion użyto w 184 belkach, a w siedmiu zbrojenia poprzecznego w formie taśm. Niestety, w opublikowanych wynikach prac doświadczalnych brakuje wielu danych, co uniemożliwia

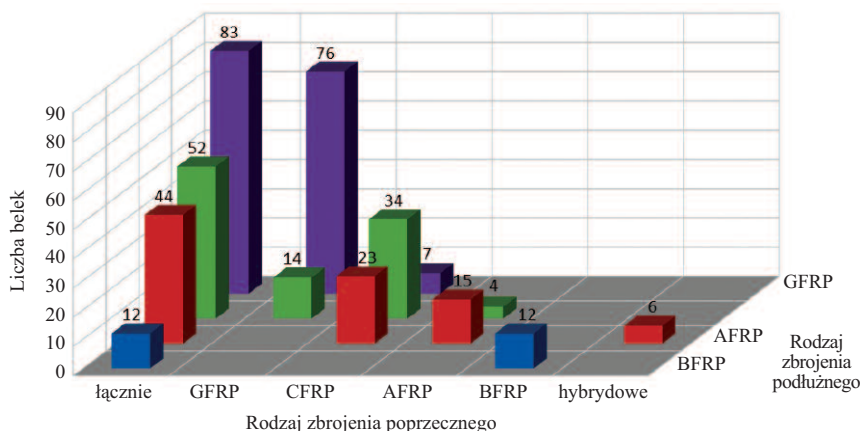
głębszą analizę uzyskanych wyników. Informacje o wartościach siły rysującej można znaleźć zaledwie w 12% badań.

Nieliczne badania [7] obejmowały elementy porównawcze, w których zarówno zbrojenie podłużne, jak i poprzeczne było stalowe i w niewielu publikacjach opisano pojedyncze elementy referencyjne zbrojone prętami stalowymi [14], natomiast pozostałe publikacje nie obejmują analizy porównawczej zbrojenia FRP i stalowego [17, 18, 22]. W części badań porównano belki zbrojone w całości prętami szklanymi z belkami zbrojonymi w sposób mieszany, tj. z podłużnym zbrojeniem stalowym

i poprzecznym zbrojeniem GFRP lub CFRP [4, 10, 11, 16, 32]. Zdecydowana większość elementów bez zbrojenia poprzecznego (świadków) umożliwiła porównywanie tylko jednego bądź dwóch elementów zbrojonych prętami GFRP. Ze względu na brak parametrów zmiennych w belkach zbrojonych stalą w odniesieniu do belek z prętami FRP takie analizy są mało wiarygodne.

tym samym różne parametry zmienne i odnosząc je do belek ze zbrojeniem stalowym [38, 39]. Większość zagranicznych norm i wytycznych projektowych dotyczących elementów zbrojonych prętami kompozytowymi bazuje na modyfikacji norm odnoszących się do konstrukcji żelbetowych, dlatego istotnym celem naszych badań jest porównanie elementów zbrojonych prętami kompozytowymi

obejmujący zarówno belki zbrojone podłużnie, jak i poprzecznie prętami kompozytowymi. Dodatkowo zaprojektowano belki bez zbrojenia poprzecznego, a także belki zbrojone prętami stalowymi w celu porównania nośności belek zbrojonych prętami szklanymi i stalowymi. W celu analizy wpływu ilości zbrojenia podłużnego na ścinanie przyjęto dwa stopnie zbrojenia podłużnego:  $\rho_l = 2,9\%$  ( $5 \phi 25$ ) oraz  $\rho_l = 3,7\%$  ( $5 \phi 28$ ). W celu analizy wpływu ilości zbrojenia poprzecznego GFRP na nośność belek na ścinanie przyjęto trzy różne stopnie zbrojenia poprzecznego, modyfikując rozstaw strzemion z zachowaniem jednolitej średnicy strzemion  $\phi 8$ :  $\rho_w = 0,16\%$  (250 mm),  $\rho_w = 0,20\%$  (200 mm) oraz  $\rho_w = 0,33\%$  (120 mm). Ostatnim parametrem zmiennym był wpływ układu zbrojenia poprzecznego na nośność. W tym zakresie zmieniono średnicę i rozstaw strzemion z  $\phi 8$  co 120 mm na  $\phi 12$  co 270 mm, zachowując tym samym jednakowy stopień zbrojenia poprzecznego  $\rho_w = 0,33\%$ . Na rysunku 4 przedstawiono zbrojenie przykładowej belki ze schematem statycznym.



**Rys. 3. Podział belek ze względu na rodzaj zbrojenia podłużnego i poprzecznego w badanych elementach**

Fig. 3. Division of beams by type of longitudinal reinforcement and type of transverse reinforcement in research elements

## Wnioski z przeglądu literatury

Z przeglądu literatury wynika, że wpływ niektórych parametrów nie został jednoznacznie opisany, a fakt jednoczesnego wpływu kilku czynników zmiennych nie pozwala na precyzyjne wyodrębnienie poszczególnych parametrów. Istnieje więc potrzeba przeprowadzenia większej liczby badań doświadczalnych z wnikliwą analizą i precyzyjnym opisem ich wyników, czego bardzo często brakuje w opublikowanych dotychczas badaniach.

Analiza przeprowadzonych dotychczas badań skłoniła nas do dalszej pracy w celu uporządkowania stanu wiedzy i analizy parametrów zmiennych na nośność na ścinanie elementów ze zbrojeniem niemetalicznym. Na podstawie zebranych informacji dokonaliśmy wnikliwego opracowania wyników badań oraz zaplanowaliśmy własny program badawczy dziesięciu elementów belkowych zbrojonych zarówno podłużnie, jak i poprzecznie prętami stalowymi, w celu rzetelnego odniesienia większości z analizowanych belek zbrojonych prętami GFRP do belek zbrojonych stalą, uwzględniając

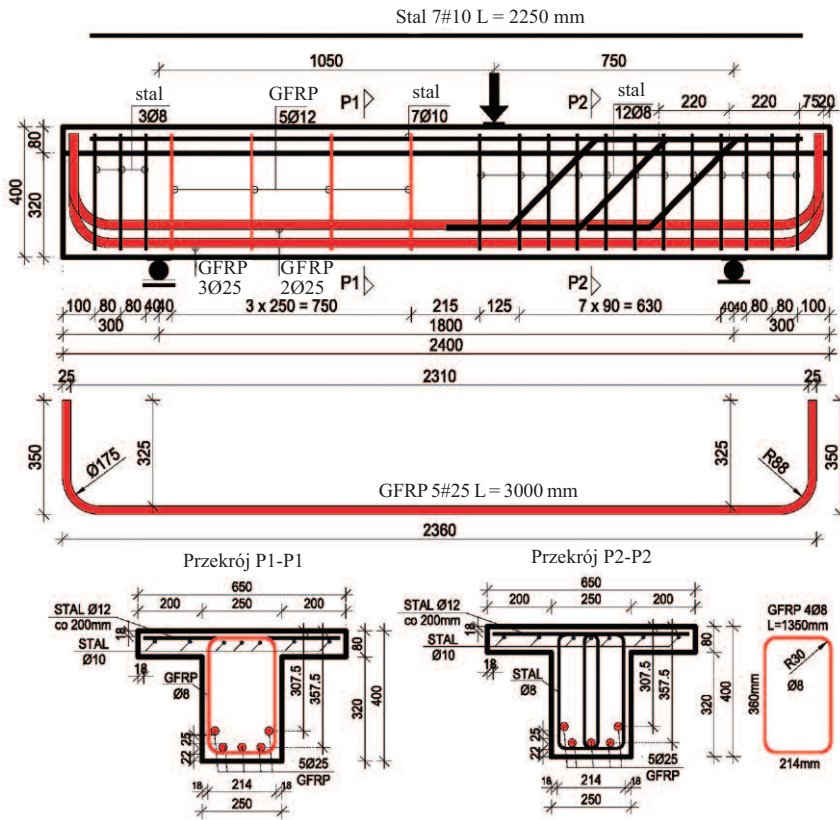
mi z elementami zbrojonymi stalą, czego brakuje w dotychczasowych badaniach lub porównanie poszczególnych elementów nie jest możliwe ze względu na różniące się inne parametry zmienne. Takie porównanie elementów jest kluczowe, ponieważ elementy ze zbrojeniem niemetalicznym różnią się nie tylko nośnością w porównaniu z elementami zbrojonymi stalą, ale także mechanizmem zniszczenia oraz wykazują inne zachowanie pod obciążeniem. Belki zbrojone prętami kompozytowymi charakteryzują się większą szerokością rozwarcia rys, większym ugięciem, a często występującym powodem zniszczenia jest zerwanie strzemion w narożnikach prętów FRP ze względu na ich anizotropową budowę i koncentrację naprężeń w zagięciach. Ponadto, brak wpływu szerokości strefy ściskanej belek w dotychczasowych badaniach skłonił nas do wykonania dalszych badań.

## Program badań własnych

W celu szczegółowej analizy zachowania się i zniszczenia belek zbrojonych na zginanie i ścinanie prętami GFRP przyjęto program badań

## Literatura

- [1] Godycki-Ćwirko T. Ścinanie w żelbecie. Wydawnictwo Arkady 1968.
- [2] Knauff M. Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2. Wydawnictwo Naukowe PWN 2017.
- [3] Tottori S, Wakui H. Shear capacity of RC and PC beams using FRP reinforcement. Special Publication. 1933: 138: 615 – 632.
- [4] Guadagnini M. Shear Behaviour and Design of FRP RC Beams. Dissertation PhD thesis, The University of Sheffield 2002.
- [5] FIB Task Group 9.3 FRP reinforcement in RC structures. Bulletin No. 40, 2007.
- [6] Clarke JL. Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete. Blackie Academic & Professional, London, England 1993.
- [7] Nagasaka T, Fukuyama H, Tanigaki M. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups. Special publication 1993: 138 789 – 812.
- [8] Maruyama K, Zhao W. Flexural and Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced by FRP Rods. International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield. 1994, p. 1330 – 1339.
- [9] Okamoto T, Nagasaka T, Tanigaki M. Shear capacity of concrete beams using FRP reinforcement. Journal of Structural and Construction Engineering. 1994: 455 27 – 136.



**Rys. 4. Geometria, schemat statyczny i zbrojenie belek**

*Fig. 4. Geometry, static scheme and reinforcement of beams*

[10] Zhao W, Maruyama K, Suzuki H. Shear behavior of concrete beams reinforced by FRP rods as longitudinal and shear reinforcement. RILEM Proc. Chapman & Hall 1995.

[11] Nakamura H, Higai T. Evaluation of shear strength of concrete beams reinforced with FRP. Concrete Library of JSCE 1995, No. 508/V-26: 111-123.

[12] Vijay PV, Kumar SV, Ganga Rao HVS. Shear and ductility behavior of concrete beams reinforced with GFRP rebars. Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Montreal 1996.

[13] Zhao W, Maruyama K. Size effect in shear behavior of FRP reinforced concrete beams. Advanced composite materials in bridges and structures. 1996, p. 227 – 234.

[14] Duranovic N, Pilakoutas K, Waldron P. Tests on concrete beams reinforced with Glass Fibre Reinforced Plastic bars. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structure. Proceedings on the Third International Symposium, Vol. 2, October 1997: 479-486.

[15] Alsayed SH, Al-Salloum YA, Almusallam T.H. Shear design for beams reinforced by GFRP bars. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structure. Proceedings on the Third International Symposium. 1997, Vol. 2, October, p. 285-292.

[16] Shehata E, Morphy R, Rizkalla S. Fibre Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Members: Behaviour and Design Guidelines. Canadian Journal of Civil Engineering. 2000; 27: 859 – 872.

[17] Alkhrdaji T, Wideman M, Belarbi A, Nanni A. Shear strength of GFRP RC beams and slabs. Proceedings of the international conference, Composites in Construction 2001.

[18] Matta F, Nanni A, Galati N, Mosele F. Size effect on shear strength of concrete beams reinforced with FRP bars. Proc. of the 6th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Balkema/Taylor & Francis. 2007; 2: 17 – 22.

[19] Imjai T. Design and analysis of curved FRP composites as shear reinforcement for concrete structures. Dissertation PhD thesis, The University of Sheffield, Dept. of Civil and Structural Engineering, 2007.

[20] Hegger J., Niewels J., Kurth M. Shear analysis of concrete members with Fiber Reinforced Polymers (FRP) as internal reinforcement. Sydney, Australia, 2009.

[21] Niewels J. Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoffbewehrung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau. PhD diss., Dissertation in Vorbereitung. 2008.

[22] Ascione L, Mancusi G, Spadea S. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. Strain. International Journal for Experimental Mechanics. 2010; 46: 460 – 469.

[23] Spadea S. Comportamento di elementi di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrinforzato. University of Salerno, Fisciano, Italy. 2010.

[24] Ahmed EA, El-Salakawy EF, Benmokrane B. Shear Performance of RC Bridge Girders Reinforced with Carbon FRP Stirrups. Journal of Bridge Engineering ASCE. 2010.

inforced with Carbon FRP Stirrups. Journal of Bridge Engineering ASCE. 2010.

[25] Bentz EC, Massam L, Collins MP. Shear Strength of Large Concrete Members with FRP Reinforcement. Journal of Composites for Construction. 2010; 14 (6): 637 – 646.

[26] El-Mogy M, El-Ragaby A, El-Salakawy E. Effect of transvers reinforcement on the flexural behaviour of continuous concrete beams reinforced with FRP. Journal of Composites for Construction ASCE 2011.

[27] Kamińska M, Szymczak P, Olbryk P, Choleśiakow S. Badania betonowych belek zbrojonych prętami kompozytowymi. Sprawozdanie z badań. Łódź, 2012.

[28] Yang F. Deformation Behaviour of Beams Reinforced with Fibre Reinforced Polymer Bars under Bending and Shear. Dissertation PhD. University of Sheffield, 2015.

[29] Tomlinson D, Amir F. Performance of concrete beams reinforced with basalt FRP for flexure and shear. Journal of Composites for Construction. 2014; 19.2.

[30] Issa MA, Ovitigala T, Ibrahim M. Shear Behavior of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams with and without Basalt FRP Stirrups. Journal of Composites for Construction. 2015; 20.4.

[31] Said M, Adam MA, Mahmoud AA, Shanoor AS. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. Construction and Building Materials. 2016; 102: 574 – 591.

[32] Bywalski C, Drzazga M, Kaźmierowski M, Kamiński M. Badania belek zbrojonych na ścinanie prętami GFRP. Materiały Budowlane. 2016; 9 (529): 72 – 73.

[33] Choleśiakow S, Di Benedetti M, Pilakoutas K, Guadagnini M. Effect of Beam Depth on Shear Behaviour of FRP RC Beams. J. of Comp. for Constr. 2018; 10.1061.

[34] Jumaa GB, Yousif AR. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. Construction and Building Materials. 2019; 209: 77-94.

[35] Krall M, Polak MA. Concrete beams with different arrangements of GFRP flexural and shear reinforcement. Engineering Structures. 2019: 198.

[36] Yuan Y, Wang Z. Shear behavior of large-scale concrete beams reinforced with CFRP bars and handmade strip stirrups. Composite Structures. 2019: 227.

[37] Fan X, Zhou Z, Tu W, Zhang M. Shear behaviour of inorganic polymer concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups. Composite Structures. 2021: 255.

[38] Szczech D, Kotynia R. Shear tests on GFRP reinforced concrete beams. 10th International Conference on Advanced Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures. MAT-TEC Web od Conferences 2020 Vol. 323.

[39] Szczech D, Kotynia R. Effect of shear reinforcement ratio on the shear capacity of GFRP reinforced concrete beams. Archives of Civil Engineering. 2021, Volume 67, Issue 1.

*Przyjęto do druku: 2.04.2024 r.*