

Pręty kompozytowe GFRP jako zbrojenie elementów betonowych obciążonych siłą podłużną i momentem zginającym

Piotr Szymczak¹, Paweł Olbryk², Maria Kamińska³

^{1,2,3} *Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, e-mail: ¹piotr.szymczak.1@p.lodz.pl, ²pawel.olbryk@p.lodz.pl, ³maria.kaminska@p.lodz.pl*

Streszczenie: Referat dotyczy betonowych elementów zbrojonych wewnątrznie prętami kompozytowymi GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer), zawierającymi włókna szklane zatopione w matrycy żywicznej. Skupiono się na elementach obciążonych siłą podłużną i momentem zginającym. Omówiono doświadczalne badania czterech słupków obciążonych ściskającą siłą osiową, zbrojonych podłużnie i poprzecznie prętami GFRP. Słupki miały kształt walców o nominalnej średnicy 200mm i wysokości 600mm. Zbrojenie podłużne było stałe i składało się z sześciu prętów o średnicy 11mm, zbrojenie poprzeczne wykonano jako ciągłe w postaci spirali z prętów o średnicy 4mm lub 8mm, o rozstawie 45mm i 60mm. Zależność $\sigma - \epsilon$ prętów kompozytowych zbrojenia podłużnego była określona doświadczalnie, zarówno przy rozciąganiu, jak i ściskaniu.

Badania wykazały, że zbrojenie GFRP bardzo dobrze współpracuje z betonem, a w stanie zniszczenia osiąga naprężenia adekwatne do podłużnych odkształceń elementu. Wykazano, że na podstawie stanów odkształcenia przekroju takich jak przyjmowane dla przekrojów żelbetowych, zgodnie z EC2, można sporządzić krzywe interakcji $N_u - M_u$.

Słowa kluczowe: zbrojenie kompozytowe GFRP, ściskanie osiowe, krzywa interakcji

1. Wprowadzenie

Pręty kompozytowe GFRP wykazują jako zbrojenie betonu liczne zalety, takie jak odporność na korozję, dobrą izolacyjność termiczną, brak przewodności elektrycznej, nie generowanie pola magnetycznego oraz małą gęstość objętościową, około cztery razy mniejszą niż gęstość stali. Niewątpliwą wadą zbrojenia kompozytowego GFRP jest niski współczynnik sprężystości, rzędu 50-60GPa, co jest powodem małej sztywności elementów po zarysowaniu betonu.

W Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych przy Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej prowadzono badania samych prętów kompozytowych GFRP, ich współdziałania z betonem (przyczepność) oraz elementów zginanych, wolnopodpartych [1] i ciągłych. Opisane poniżej badania obejmują elementy osiowo ściskane i mają charakter wstępny.

Odrębnym zagadnieniem jest brak zasad wymiarowania elementów zbrojonych kompozytami, co uzasadnia konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie [2, 3].

2. Badania doświadczalne

2.1. Opis elementów, materiałów i metod pomiarowych

Badania objęły słupki betonowe o przekroju kołowym, zbrojone prętami kompozytowymi, zawierającymi włókna szklane (GFRP – Glass Fibre Reinforced Polymer). Zbrojenie podłużne stanowiły pręty o średnicy nominalnej #11mm, a zbrojenie poprzeczne pręty #4 i #8mm, w postaci spirali. Geometryczne i wytrzymałościowe cechy prętów kompozytowych o nominalnej średnicy 11mm, zastosowanych w badaniach, są przedstawione w tabelicy 1. Doświadczalne określenie wytrzymałości na rozciąganie prętów stanowiących zbrojenie poprzeczne nie było możliwe ze względu na ich spiralny kształt, wobec czego w tabelicy 1 podano dla porównania także wartości odnoszące się do prętów prostych o średnicy 7,5mm. Zależność $\sigma_f - \varepsilon_f$ jest przy rozciąganiu ściśle liniowa w całym zakresie obciążenia próbek.

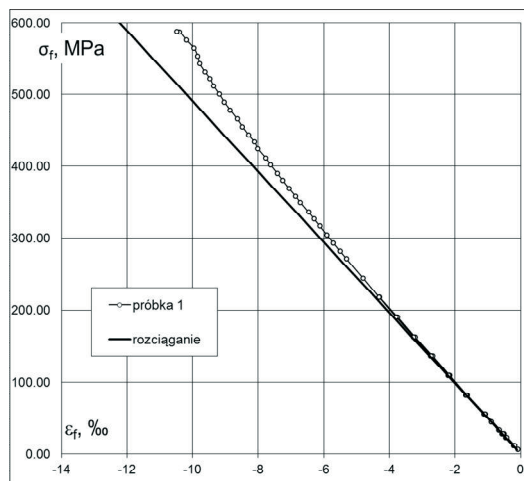
Tabela 1. Właściwości prętów kompozytowych GFRP

Nominalna średnica [mm]	Dopuszczalne odchyłki pomiarowe [mm]	Rzeczywiste pole przekroju mm ²	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości rozc./ścisk. [GPa]	Odształcenie graniczne rozciągania [%]	Masa jednostkowa [g/m]
7,5	±0,5	45,7	1054	- /40,2	26,2	85
11	±0,5	92,1	1117	49,1/50,4	22,7	190

Pręty zbrojenia głównego o średnicy 11mm poddano też próbie ściskania. Przeprowadzono ją jak dla stali prętowej, na próbkach o długości 3d, tj. 33mm w świetle pierścieni stabilizujących położenie próbki w prasie. Obraz próbki po zniszczeniu pokazano na rys. 1. Rysunek 2 przedstawia zależności $\sigma_f - \varepsilon_f$ przy ściskaniu dla wybranej próbki. Na rysunku podano także wykres analogicznej zależności przy rozciąganiu (pominięto znak odkształcenia). Jak można zauważyć, moduł sprężystości przy ściskaniu jest w zakresie odkształcenia do 5% w przybliżeniu równy modułowi przy rozciąganiu. Ten zakres odpowiada odkształceniom podłużnym, jakie zwykle osiąga przy ściskaniu beton nieskrępowany przez zbrojenie poprzeczne.



Rys. 1. Próbkę po badaniu na ściskanie



Rys. 2. Zależności $\sigma_f - \varepsilon_f$ przy ściskaniu i rozciąganiu

Zastosowano mieszankę betonową o składzie: piasek 735kg, żwir 2-8mm- 1100kg, cement CEM II 32,5R Cemex- 320kg, plastyfikatory- 8,6kg, woda- 176kg (wszystkie wartości podano w odniesieniu do jednego m³ mieszanki). Porowatość mieszanki wyniosła 2,6%.

Wytrzymałość betonu na ściskanie określano na 5 próbkach $\Phi 150/300$ mm, zgodnie z EN 12390-3, a wytrzymałość na rozciąganie metodą rozłupywania, na 2 kostkach o boku 150mm, zgodnie z EN 1290-6. Podczas badania na ściskanie próbek walcowych określano również moduł sprężystości betonu, jako sieczny, zgodnie z wymaganiami DIN 1048. Badania próbek wykonano w dniu rozpoczęcia badań słupków. Otrzymano: wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm}=34,3$ MPa (+0,7MPa; - 0,5MPa), wytrzymałość na rozciąganie $f_{cm,sp}=3,05$ MPa (+0,1MPa; - 0,1MPa), współczynnik sprężystości betonu $E_{cm}=22,8$ GPa (+0,1GPa; - 0,2GPa).

Przyjęte oznaczenia słupków, ich nominalne i rzeczywiste wymiary oraz układ zbrojenia przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Rzeczywiste wymiary i układ zbrojenia słupków

Symbol słupka	Wymiary [mm]				Zbrojenie podłużne	Zbrojenie poprzeczne	
	Nominalne		Rzeczywiste			średnica min.	rozstaw min.
	średnica	wysokość	średnica	wysokość			
<i>G-4/45</i>				598		#4	45
<i>G-4/60</i>	200	600	198	599	6#11	#4	60
<i>G-8/45</i>				598		#7,5	45
<i>G-8/60</i>				598		#7,5	60

Zbrojenie podłużne i poprzeczne było łączone zaciskami instalacyjnymi z tworzywa sztucznego. Słupki wykonywano w tekturowych formach, ustawianych w pozycji pionowej. Przed obciążaniem szlifowano podstawy słupków, aby zapewnić równoległość powierzchni docisku.



Rys. 3. Zbrojenie słupka G-8/45; widoczne podkładki dystansowe

Próbki były obciążane siłą podłużną przykładaną osiowo, w prasie o zakresie 6000kN. Wielkość przykładanej siły była oceniana na podstawie wskazań czujnika ciśnieniowego, umieszczonego w układzie hydraulicznym prasy. Siła była przykładana skokowo, a w ostatniej fazie badania stosowano ciągły przyrost siły, aby nie przeoczyć zniszczenia.

Podłużne odkształcenia (osiowe) słupków mierzono dwoma sposobami:

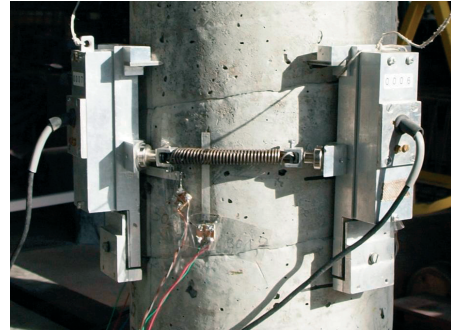
- za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych o bazie 50mm, rozmieszczonych na obwodzie słupka co 120°; w słupkach zbrojonych poprzecznie spiralą o średnicy 4mm,
- za pomocą trójpunktowego miernika tensometrycznego (ekstensometr) o bazie pomiarowej 148mm; w odniesieniu do wszystkich czterech słupków.

Odształcenia poprzeczne mierzono za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych o bazie 50mm, także rozmieszczonych na obwodzie co 120° . Wszystkie odczyty były zapisywane co jedną sekundę, za pomocą komputerowego systemu akwizycji danych.

Widok próbki ustawionej w prasie i przygotowanej do badań przedstawia rys. 4, a na rys. 5 są pokazane szczegóły oprzyrządowania pomiarowego.



Rys. 4. Próbka na stanowisku badawczym



Rys. 5. Szczegóły oprzyrządowania – widoczne są pojedyncze tensometry elektrooporowe, umieszczone poziomo i pionowo, oraz miernik tensometryczny (ekstensometr)

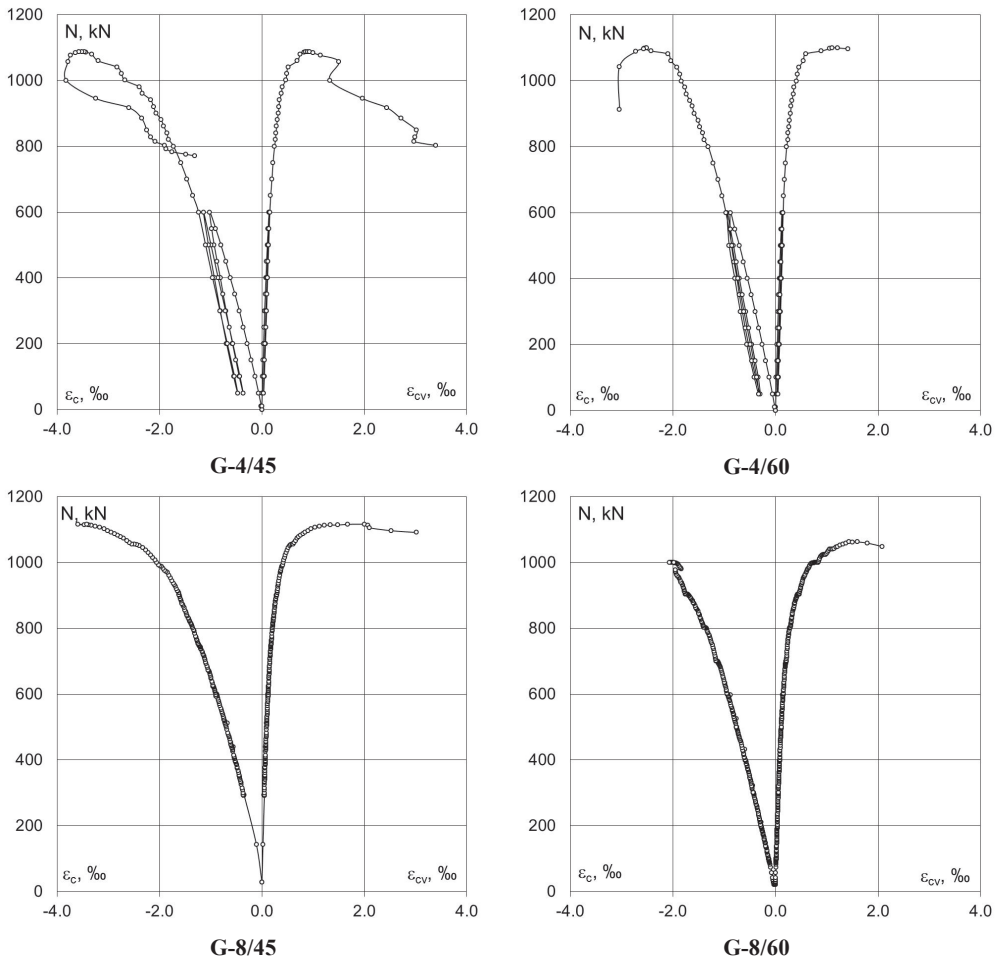
Obciążenie słupków miało charakter doraźny, całe badanie trwało około dwóch godzin. Badając słupki ze zbrojeniem poprzecznym o średnicy 4 mm zastosowano dodatkowo dwukrotne odciążenie z poziomu siły 600kN. Badanie uznawano za zakończone, gdy nastąpił spadek siły z towarzyszącym mu przyrostem odształceń.

2.2. Rezultaty i obserwacje

Wszystkie słupki zniszczyły się w sposób gwałtowny, przez zmiżdżenie betonu. Wartości sił niszczących oraz towarzyszące im odształcenia zestawiono w Tablicy 3. Podano średnie wartości odształceń podłużnych i poprzecznych przy sile niszczącej N_u , oraz największe jednostkowe odształcenia, jakie wykazywały pojedyncze czujniki po spadku siły obciążającej. W tym drugim przypadku uwzględniano tylko siły większe niż $0,85 N_u$.

Tablica 3. Siły niszczące oraz odształcenia podłużne i poprzeczne

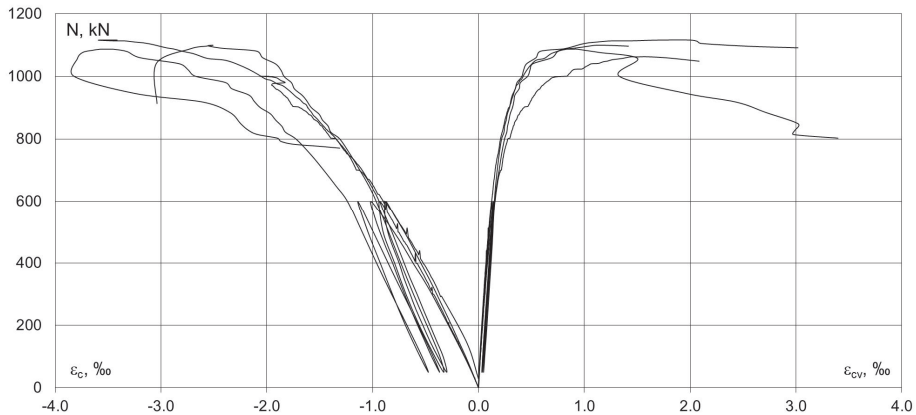
Symbol słupka	Siła niszcząca N_u [kN]	Odształcenie podłużne ϵ_c [%]		Odształcenie poprzeczne ϵ_v [%]	
		Średnie przy N_u	Jednostkowe maksymalne	Średnie przy N_u	Jednostkowe maksymalne
G-4/45	1087	-3,57	-4,51	0,93	2,44
G-4/60	1100	-2,52	-5,80	1,11	2,49
G-8/45	1116	-3,59	-4,11	2,00	4,01
G-8/60	1063	-2,06; N=1000	-7,09	1,45	5,46



Rys. 6. Średnie odkształcenia podłużne (ze znakiem minus, pomiar ekstensometrem) i poprzeczne (ze znakiem plus) w funkcji obciążenia

Rozwój średnich odkształceń podłużnych i poprzecznych w funkcji obciążenia, w całym jego zakresie, ilustruje rys. 6. Jak można zauważyć, średnie odkształcenia podłużne przekraczają umowną wartość $\epsilon_{cu}=2,0\%$ i zbliżają się do nawet 4%. Małą wartość zapisaną dla słupka G-8/60 należy przypisać temu, że obszar zniszczenia nie pokrywał się z obszarem pomiarowym (148mm w środkowej części słupka). Podobnie poza częścią środkową zniszczył się słupek G-4/45, ale w tym przypadku obszar zniszczenia był na tyle rozległy, że wpłynął na efekty pomiaru (por. rys.8).

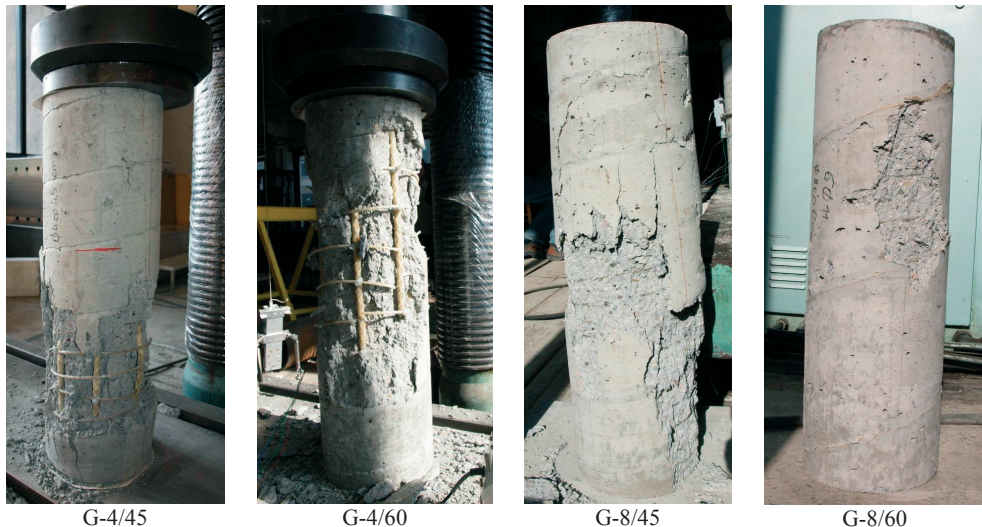
Zbrojenie poprzeczne we wszystkich przypadkach było mało aktywne, aż do obciążenia odpowiadającego około 80% siły niszczącej, potem odkształcenia poprzeczne szybko przyrastały. Odkształcenia średnie nie osiągały wprawdzie wartości granicznych, ale lokalnie tak było, bo dochodziło do zerwania zbrojenia poprzecznego (por. rys. 8) w słupkach zbrojonych poprzecznie spiralą #4mm. W słupkach zbrojonych poprzecznie spiralą #8mm obserwowano odspojenie otuliny, ale dopiero w fazie zniszczenia.



Rys. 7. Średnie odkształcenia podłużne i poprzeczne wszystkich czterech słupków w funkcji obciążenia

Na rys. 7 wykresy obu analizowanych odkształceń są przedstawione łącznie, dla wszystkich czterech słupków. Można zauważyć, że wykresy właściwie się pokrywają. Oznacza to, że zbrojenie poprzeczne nie wpływa na nośność badanych elementów, a zatem efekty skrępowania betonu poprzecznym zbrojeniem kompozytowym są pomijalnie małe. Świadczy o tym także bardzo mały rozrzut sił niszczących – wartość średnia wynosi $N_u=1092\text{kN}$, a odchylenia od tej wartości $+24\text{kN}$ i -29kN . Zbrojenie kompozytowe spełnia jednak znaczącą rolę, ponieważ generuje pewną plastyczność elementu po przekroczeniu siły niszczącej, tak ważną dla odpowiedzi konstrukcji na obciążenie.

Sposób zniszczenia słupków jest przedstawiony na rys. 8. Obserwowano odpadanie betonowej otuliny zbrojenia, pionowe rysy w betonie wewnątrz uzwojenia oraz zerwanie prętów poprzecznych. Pręty zbrojenia podłużnego o średnicy #11mm bardzo dobrze współpracowały z betonem, nie zauważono oznak lokalnego wyboczenia prętów ani zniszczenia ich przekrojów.



Rys. 8. Obraz zniszczenia słupków

3. Analiza obliczeniowa

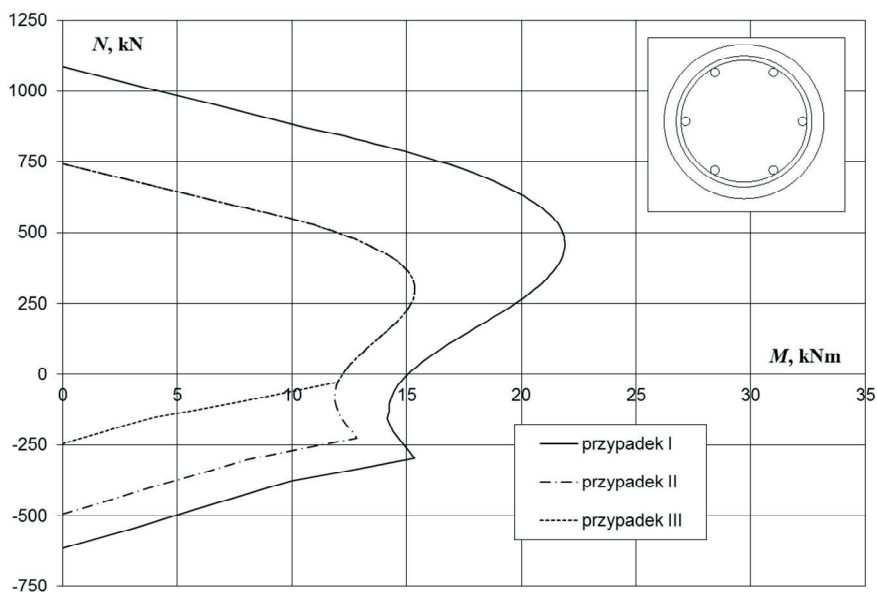
Liniowo-sprężysta charakterystyka wytrzymałościowa prętów kompozytowych oznacza, że podstawą analizy nośności przekroju musi być stan jego odkształcenia. Badania doświadczalne potwierdzają, że tak samo jak w odniesieniu do żelbetu można przyjmować założenie, że odkształcony przekrój pozostaje płaski, a odkształcenia kompozytowych prętów i otaczającego je betonu są jednakowe.

Przy tych założeniach oraz nieliniowej zależności $\sigma_c - \varepsilon_c$, opisującej beton strefy ściskanej, określono krzywe interakcji $N_{fu} - M_{fu}$ dla przekroju kołowego. Dane materiałowe i wymiary przyjęto jako odpowiadające wyżej opisanemu badaniu. Ograniczenie odkształceń przekroju w strefie ściskanej przyjęto według EC2 jak dla betonu klasy nie wyższej niż C50/60 – odkształcenie ε_{cl} odpowiednio do wytrzymałości betonu oraz $\varepsilon_{cuI}=3,5\%$.

Rozważono trzy przypadki, przyjmując:

(I) wartości materiałowe jako średnie, graniczne odkształcenie kompozytu $\varepsilon_{fu}=22,7\%$,
 (II) wartości materiałowe jako obliczeniowe, $\gamma_c=1,5$ oraz $\gamma_f=1,25$ [2], wobec czego graniczne odkształcenie kompozytu $\varepsilon_{fu}=22,7/1,25=18,2\%$,

(III) wartości materiałowe jako obliczeniowe, $\gamma_c=1,5$ oraz graniczne odkształcenie kompozytu $\varepsilon_{fu}=0,4 \times 22,7=9,1\%$, ze względu na „creep rupture” i założenie, że z tego powodu trwałe naprężenie, a zatem i odkształcenie kompozytu nie może przekroczyć 40% jego wytrzymałości na rozciąganie [3].



Rys. 9. Krzywe interakcji $N_{fu} - M_{fu}$ określone przy różnych założeniach dotyczących granicznych odkształceń prętów kompozytowych

Wyniki obliczeń są przedstawione na rys. 9. Decyzje o ograniczeniu odkształcenia prętów kompozytowych wyraźnie wpłynęły na nośność przekroju, a także na kształt krzywych, odbiegający od krzywych opisujących przekrój żelbetowy. Wklęsłość wykresów przy niewielkich siłach podłużnych należy przypisać właśnie ograniczeniu odkształcenia kompozytu. Nośność zbadanych słupków ściśle odpowiada obliczeniowej – przypadek (I).

4. Podsumowanie

Wyniki doświadczalnego badania oraz analizy obliczeniowej dają podstawy do stwierdzenia, że nośność przekrojów zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP można określać według założeń stosowanych w odniesieniu do przekrojów żelbetowych, ale ze ścisłą kontrolą stanu odkształcenia przekroju.

Oprócz nośności elementów zbrojonych prętami GFRP równie ważna, a czasem nawet najważniejsza, jest ich odkształcalność. Nadmierne ugięcia mogą znacznie ograniczyć obszar zastosowania betonowych elementów zbrojonych prętami GFRP.

Podziękowania

Badania dofinansowane z funduszy projektu UE POIG "Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju", POIG.01.01.02-10-106/09-00, za co autorzy serdecznie dziękują.

Literatura

- 1 Olbryk P., Szymczak P., Kamińska M.E., Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass and basalt fibre – reinforced polymer (FRP), Proceedings of the 9th Central European Congress on Concrete Engineering CCC2013; Wrocław, 2013, pp.344-347
- 2 Nonmetallic reinforcement, fib Model Code for Concrete Structures 2010, s. 139-143
- 3 440.1R-06, ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE 2010, PART 5

Composite GFRP bars as reinforcement of concrete members under axial force and bending moment

Piotr Szymczak¹, Paweł Olbryk², Maria Kamińska³

^{1,2,3} *Department of Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology, e-mail: ¹piotr.szymczak.1@p.lodz.pl, ²pawel.olbryk@p.lodz.pl, ³maria.kaminska@p.lodz.pl*

Abstract: This paper discusses concrete members reinforced internally with composite GFRP bars (Glass Fibre Reinforced Polymer). The studies are focused on members under axial force and bending moment. Experimental studies of 4 RC columns loaded with compressive axial force, longitudinally and transversally reinforced with GFRP bars were discussed. Columns had cylinder shape with the nominal diameter of 200mm and height of 600mm. Longitudinal reinforcement contained six bars with 11mm diameter and transversal reinforcement of continuous spiral bars # 4 and #8 with spacing equal to 45mm and 60mm.

Studies show that the GFRP reinforcement has very good adhesion to concrete and, in failure state reaches stresses adequate to longitudinal strains of members. This paper proves that the interaction curves can be determined on the same strain state basis as used in RC members according to EC2.

Keywords: composite GFRP reinforcement, axial compression, interaction curves