

Szymon SERĘGA¹
Renata KOTYNIA²
Krzysztof LASEK³

OBLICZENIOWA ANALIZA BELEK ŻELBETOWYCH WZMOCNIONYCH NAPRĘŻONYMI TAŚMAMI CFRP

W artykule przedstawiono numeryczną analizę belek żelbetowych wzmocnionych wstępnie sprężonymi taśmami CFRP. Celem badań była analiza efektywności czynnego wzmocnienia w odniesieniu do powszechnych biernych metod wzmocnienia elementów zginanych. Badania miały ponadto wykazać wpływ historii obciążenia elementu przed wzmocnieniem na stopień jego wzmocnienia. Zaproponowano dwuwymiarowy model konstrukcji z uwzględnieniem fizycznie nieliniowych charakterystyk materiałów składowych. Symulacje numeryczne wykonane dla skalibrowanego modelu mechanicznego wykazały bardzo dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi.

Słowa kluczowe: belki żelbetowe, wzmocnienie, wstępne naprężenie, nośność, odkształcalność, model MES, symulacje numeryczne

1. Wprowadzenie

Technika wzmocniania elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu materiałów kompozytowych z włókien węglowych (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) w postaci laminatów przyklejanych na zewnętrznej powierzchni betonu jest już powszechnie stosowana w praktyce inżynierskiej. Jest ona jednak skuteczna jedynie w wypadku słabo obciążonych konstrukcji przed wzmocnieniem, w których udział ciężaru własnego w całkowitych obciążeniach nie jest znaczący. Jeśli na skutek obciążeń konstrukcja uległa zarysowaniu lub nadmiernemu ugięciu, zastosowanie zewnętrznego zbrojenia kompozytowego bez wstępnego naciągu jest mało skuteczne.

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Szymon Seręga, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 628 23 96, szymon.serega@pk.edu.pl

² Renata Kotynia, Politechnika Łódzka, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, tel. 42 631 38 70, renata.kotynia@p.lodz.pl

³ Krzysztof Lasek, Politechnika Łódzka, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, tel. 42 631 38 70, krzysztof.lasek@p.lodz.pl

W takich przypadkach zalecane jest użycie wstępnie naprężonych kompozytów CFRP, które wpłyną na poprawę warunków stanu użytkowości konstrukcji (poprzez zmniejszenie szerokości rozwarcia istniejących rys oraz zmniejszenie ugięć). Szczegółowy opis badań doświadczalnych będących przedmiotem obecnej analizy obliczeniowej omówiono w pracach [4], [5]. Głównym zamierzeniem autorów niniejszego artykułu było opracowanie modelu obliczeniowego, przeprowadzenie symulacji numerycznych w całym zakresie obciążeń pracy elementów badawczych oraz analiza otrzymanych wyników.

2. Badania doświadczalne

Badania przeprowadzone w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej obejmowały sześć jednoprzęsłowych, wolnopodpartych belek, o przekroju poprzecznym 500×220mm i rozpiętości w osiach podpór 6000mm, wzmocnionych przy użyciu wstępnie naprężonych taśm z włókien węglowych CFRP. Jednym z głównych parametrów uwzględnionych w badaniach był poziom wstępnego obciążenia płyty przed wykonaniem ich wzmocnienia. Pierwsza grupa belek została wzmocniona pod ciężarem własnym, który stanowił 25% lub 14% nośności elementu niewzmocnionego (różnica wynikała z różnego stopnia zbrojenia stalowego elementów zbrojonych odpowiednio prętami o średnicy 12mm i 16mm). Pozostałe belki wzmocniono pod jednoczesnym ciężarem własnym i obciążeniem zewnętrznym, co łącznie stanowiło 76% pierwotnej nośności tych elementów. Obciążenie utrzymywane było na stałym poziomie zarówno podczas wykonywania wzmocnienia, jak i wiązania kleju. W celu oceny wpływu stopnia zbrojenia stalowego na efektywność wzmocnienia elementu, w badaniach zaplanowano podłużne zbrojenie w postaci prętów o średnicach 12mm i 16mm. Dwie pierwsze serie (A i B) zawierały łącznie cztery żelbetowe belki zbrojone dołem czterema prętami o średnicy 12mm. Seria C składała się z dwóch belek zbrojonych dołem czterema prętami o średnicy 16mm. Kolejnym rozpatrywanym parametrem był wpływ przyczepności pomiędzy wstępnie naprężonym materiałem kompozytowym a powierzchnią betonu na efektywność wzmocnienia. Belki zostały wzmocnione taśmami CFRP o szerokości 100mm i grubości 1,2mm przyklejonymi na dolnej powierzchni za pomocą kleju epoksydowego. Dwie belki wzmocniono bez użycia kleju pomiędzy taśmą a betonem, tak aby laminat zachowywał się jak zewnętrzny ściąg połączony z płytą jedynie w miejscu zakotwienia. Belki serii A i element B16-a serii C wzmocniono pod obciążeniem ciężarem własnym, natomiast elementy serii B i belka B16-a-e serii C zostały wzmocnione pod ciężarem własnym i dodatkowym niezmiennym obciążeniem zewnętrznym utrzymywanym, aż do uzyskania przez klej wymaganej wytrzymałości, a następnie badano pod obciążeniem złożonym z 4 sił skupionych (rys. 1).

Zestawienie wszystkich badanych elementów wraz z parametrami zmiennymi przedstawiono w Tabeli 1. Najczęściej obserwowanym sposobem zniszczenia w badaniach było odspojenie kompozytu od powierzchni betonu, zainicjowane w miejscu rysy powstałej pod jedną z sił obciążających. Drugorzędym efektem postępującego zniszczenia było wysunięcie taśmy spod stalowej płyty kotwiącej [5].

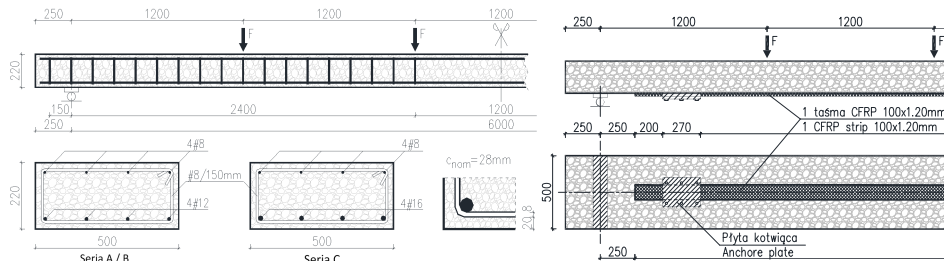
Tabela 1. Zestawienie elementów badawczych i podstawowych wyników badań

Table 1. Summary of tested members and essential test results

Seria	Element	Zbrojenie ozciążane	Wstępne obciążenie; ($2F_p/2F_{u0}$ 100%), [%]	$2F_{u_0}$ [kN]	ϵ_{fp} [‰]	σ_{fp} [MPa]	$\epsilon_{f,test}$ [‰]	η_{ef} [%]
A	B12-a	4#12	ciężar własny; (25)	53,0	5,20	900 (0,32 f_{tu})	9,30	86
	B12	4#12	ciężar własny; (25)	47,3	4,60	796 (0,28 f_{tu})	6,90	68
B	B12-a-e	4#12	ciężar własny + obciążenie zewnętrzne; (76)	49,0	4,75	822 (0,29 f_{tu})	6,85	69
	B12-e	4#12	ciężar własny + obciążenie zewnętrzne; (76)	45,5	4,40	762 (0,27 f_{tu})	5,00	56
C	B16-a	4#16	ciężar własny; (14)	74,4	4,80	831 (0,29 f_{tu})	8,00	76
	B16-a-e	4#16	ciężar własny + obciążenie zewnętrzne; (76)	72,0	4,85	840 (0,29 f_{tu})	7,15	71

$2F_p$ - wstępne obciążenie; $2F_p / 2F_{u0}$ 100% - stopień obciążenia elementu do nośności przed wzmocnieniem; $2F_u$ - obciążenie niszczące; ϵ_{fp} - odkształcenie wstępne kompozytu w trakcie wzmocniania; σ_{fp} - naprężenie wstępne kompozytu w trakcie wzmocniania; $\epsilon_{f,test}$ - maksymalne odkształcenie kompozytu podczas badania (zniszczenia elementu); $\epsilon_{f,tot}$ - całkowite odkształcenie kompozytu, $\epsilon_{f,tot} = \epsilon_{fp} + \epsilon_{f,test}$; ; ϵ_{fu} - odkształcenie graniczne kompozytu (przy zerwaniu);

η_{ef} - stopień wykorzystania odkształceń materiału kompozytowego, $\eta_{ef} = \epsilon_{f,tot} / \epsilon_{fu}$ 100%



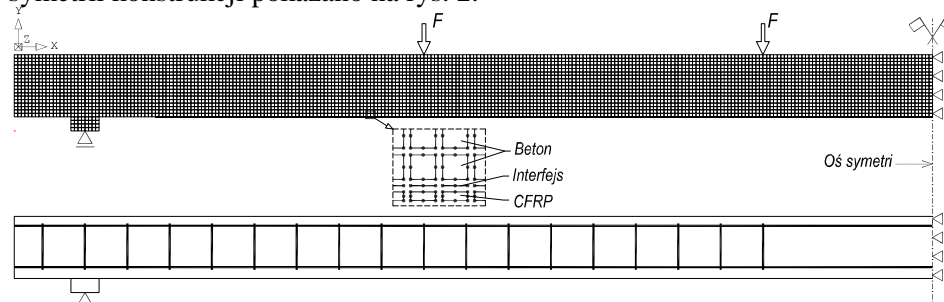
Rys. 1. Sposób zbrojenia i wzmocnienia elementów, schemat badawczy

Fig. 1. Steel reinforcement, strengthening configuration and test set-up

3. Analiza numeryczna

Do obliczeniowej analizy żelbetowych belek wzmocnionych naprężonymi taśmami CFRP wykorzystano program DIANA [9], który opiera się na przemieszczeniowej wersji metody elementów skończonych. Belki żelbetowe zamodelowano jako obiekty dwuwymiarowe (2D), pracujące w płaskim stanie naprężenia. Topologię siatki elementów skończonych z wykorzystaniem

symetrii konstrukcji pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Skończenie elementowy model belek żelbetowych

Fig. 2. Finite element model for reinforced concrete beams

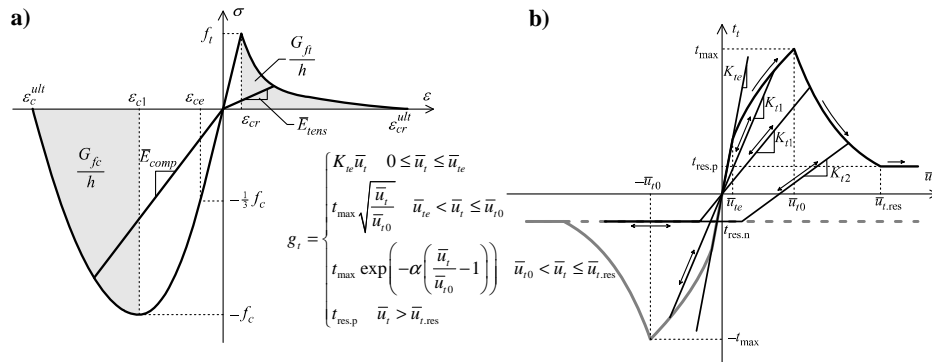
Obciążenie belek opisano w modelu obliczeniowym w postaci czterech schematów obejmujących: wymuszone oddziaływanie skurczu, ciężar własny, zewnętrzne obciążenie w postaci sił skupionych (wstępne i dodatkowe) oraz zewnętrzne sprężenie elementów.

Do opisu betonu przyjęto model oparty na koncepcji rys rozmytych sformułowany w całkowitych odkształceniach ([8]). W podejściu tym, do chwili zarysowania, zależności naprężenie-odkształcenie betonu rozciąganego i ściskanego definiowane są zgodnie z kierunkami głównych odkształceń. Po przekroczeniu wytrzymałości betonu na rozciąganie kierunki definiowania związków fizycznych są „zamrażane”, tzn. pozostają współosiowe z kierunkiem pierwszej rysy. Jest to klasyczne podejście rys o stałym kierunku. Dodatkowo zredukowana jest sztywność ścinania na kierunku stycznym do rysy (moduł Kirchhoffa mnożony jest przez współczynnik retencji ścinania $\beta < 1.0$). Jednoosiowe związki naprężenie odkształcenie betonu ściskanego przyjęto według [2], natomiast betonu rozciąganego według [1] – rys. 3a. Zgodność otrzymanych wyników względem przyjętego podziału MES została zapewniona przez utrzymanie stałych energii pęknięcia betonu przy rozciąganiu $G_{ft} = 90 \text{ N/m}$ oraz ściskaniu (miażdżeniu betonu w strefie ściskanej) $G_{fc} = 10^4 \text{ N/m}$.

Związek konstytutywny stali zbrojeniowej opisano jako sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem liniowym, definiowany przez rzeczywiste charakterystyki wytrzymałościowe określone na podstawie badań doświadczalnych [4]. Zależność przyczepnościowo-poślizgową pomiędzy rozciąganą stalą zbrojeniową i matrycą betonową przyjęto zgodnie z [7]. Również model kompozytu CFRP określono na podstawie badań doświadczalnych taśm na rozciąganie, jako idealnie liniowo-sprężysty z modułem sprężystości $E_f = 173.3 \text{ GPa}$ i odkształcalności granicznej $\varepsilon_{fu} = 16.5\%$.

W belkach wzmocnionych na zginanie siły normalne do powierzchni połączenia (interfejsu) pomiędzy betonem i laminatem CFRP są stosunkowo niewielkie. W związku z tym przyjęto, że związki fizyczne opisujące zależność

sił wewnętrznych (trakcji) od względnych przemieszczeń w połączeniu beton-taśma opisane są niezależne. Przyjęto model przyczepność-poślizg wg [3] i [6] – rys. 3b. Związek ten został oprogramowany na poziomie punktu całkowania wykorzystując podprogram użytkownika w systemie DIANA.



Rys. 3. a) model konstytutywny betonu, b) przyczepność-poślizg pomiędzy betonem i laminatem
 Fig. 3. a) uniaxial constitutive model for concrete, b) traction-slip between concrete and laminate

Tabela 2. Parametry mechaniczne betonu i interfejsu beton-laminat przyjęte w modelu

Table 2. Mechanical properties of concrete and concrete-laminate interface adopted in the model

Element	E_c [GPa]	ν [-]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	G_{fi} [N/m]	G_{fc} [N/m]	β [-]	K_{t0} [GPa/m]	K_n [GPa/m]	t_{max} [MPa]	\bar{u}_{t0} [mm]	α [-]	$t_{res,p}$ ^{*)} [MPa]
B12-a	23.7	0.2	32.2	1.9	90	10^4	0.2	$3.85 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^2$	3.2	0.042	0.27	0.65
B12	24.7	0.2	28.7	1.9	90	10^4	0.2	0.07	$4.0 \cdot 10^2$	-	-	-	-
B12-a-e	24.7	0.2	41.6	2.2	90	10^4	0.2	$3.85 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^2$	2.8	0.036	0.21	0.50
B12-e	25.4	0.2	40.9	3.2	90	10^4	0.2	0.05	$4.0 \cdot 10^2$	-	-	-	-
B16-a	25.4	0.2	49.0	2.5	90	10^4	0.2	$3.85 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^2$	2.5	0.032	0.18	0.27
B16-a-e	26.4	0.2	51.0	4.1	90	10^4	0.2	$3.85 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^2$	4.3	0.056	0.46	0.50

^{*)} $t_{res,n} = -t_{res,p}$, oznaczenia zdefiniowano na rys. 3b

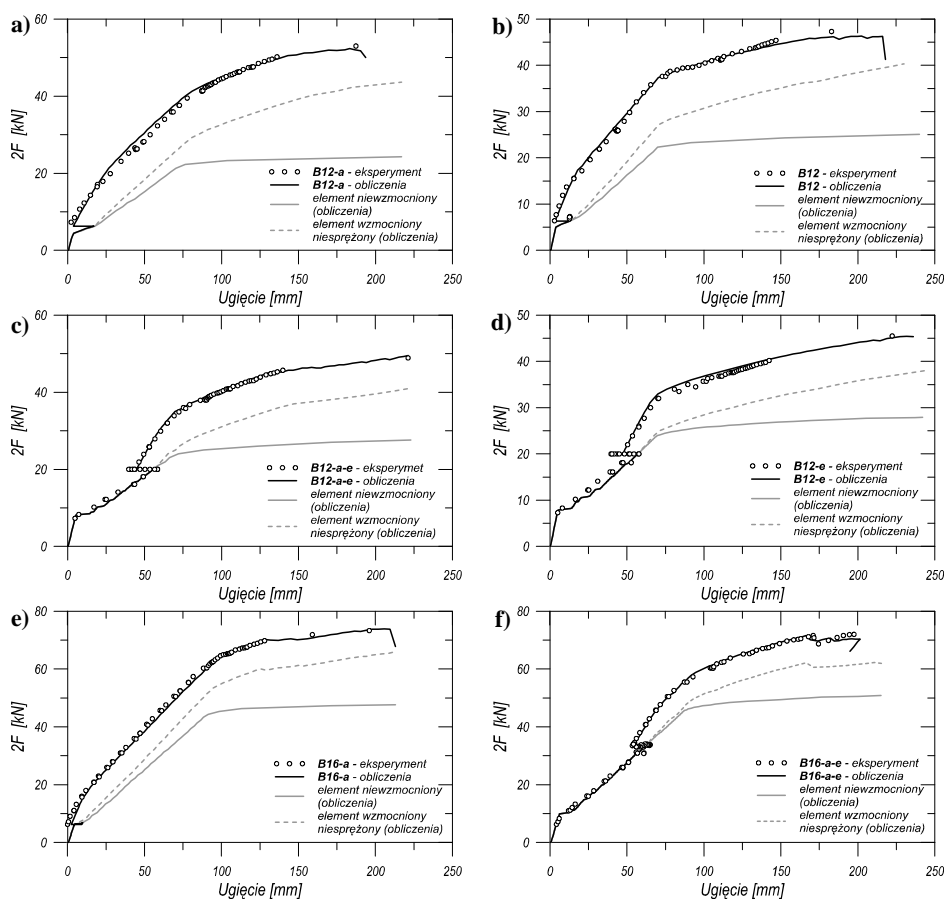
W przypadku elementów wzmocnionych bez przyczepności w przęśle pomiędzy betonem i taśmą zastosowano nieliniowo-sprężysty model cierny interfejsu [9]. W obszarze kotwienia taśmy zamodelowano sprężysto-plastyczny model interfejsu z odciążeniem liniowym.

Obliczenia przeprowadzono w sposób przyrostowy, sterując wartościami przyrostu obciążenia zewnętrznego oraz sprężenia. Przyrost obciążenia określono dla obciążenia wstępnego, sprężenia i części obciążenia po wzmocnieniu. Dla obciążeń bliskich obciążeniu niszczącemu zmieniano sposób sterowania procesem obliczeniowym na metodę długości łuku. W każdym kroku obciążeniowym równowagę pomiędzy wektorem sił zewnętrznych i wewnętrznymi ustalono iteracyjnie z wykorzystaniem procedury Newtona-

Raphsona. Proces iteracyjny uważano za zbieżny w przypadku jednoczesnego spełnienia dwóch warunków: przemieszczeń oraz sił rezydualnych. W celu możliwie wiernego odtworzenia badań doświadczalnych przeprowadzono analizę fazową złożoną z czterech etapów. „Etap 0” – uwzględniający tylko skurcz betonu, aktywne są w nim tylko elementy matrycy betonowej oraz zbrojenie stalowe. „Etap 1” – uwzględnia obciążenie konstrukcji niewzmocnionej; element obciążony do wartości wstępnej, odpowiadającej ciężarowi własnemu każdej z belek wraz z dodatkowym obciążeniem zewnętrznym. „Etap 2” – odpowiada sprężeniu belki zewnętrzną taśmą. W przypadku belek wstępnie wyteżonych zastosowano dodatkowe podpory na kierunku pionowym w miejscu przyłożenia obciążeń, modelujące tymczasowe podparcie zrealizowane w doświadczeniu na czas sprężania oraz wiązania żywicy. „Etap 3” – odzwierciedla stan przekazania siły sprężającej na zakotwienie (oprócz elementów z etapu 2 aktywne są elementy interfejsowe w obszarze kotwienia, a w przypadku elementów z przyczepnością również elementy interfejsowe beton-laminat). Obciążenie wywołane wstępnym sprężeniem taśmy na jej końcach jest stopniowo zmniejszane do zera i przekazywane lokalnie na miejsce zakotwienia. „Etap 3a” – to usunięcie podpór z miejsc przyłożenia siły. Etap ten występuje jedynie w belkach wstępnie obciążonych. „Etap 4” – obejmuje proces obciążania belki po wzmocnieniu do chwili jej zniszczenia (aktywne są wszystkie elementy skończone modelu).

4. Analiza porównawcza wyników symulacji numerycznych i badań doświadczalnych

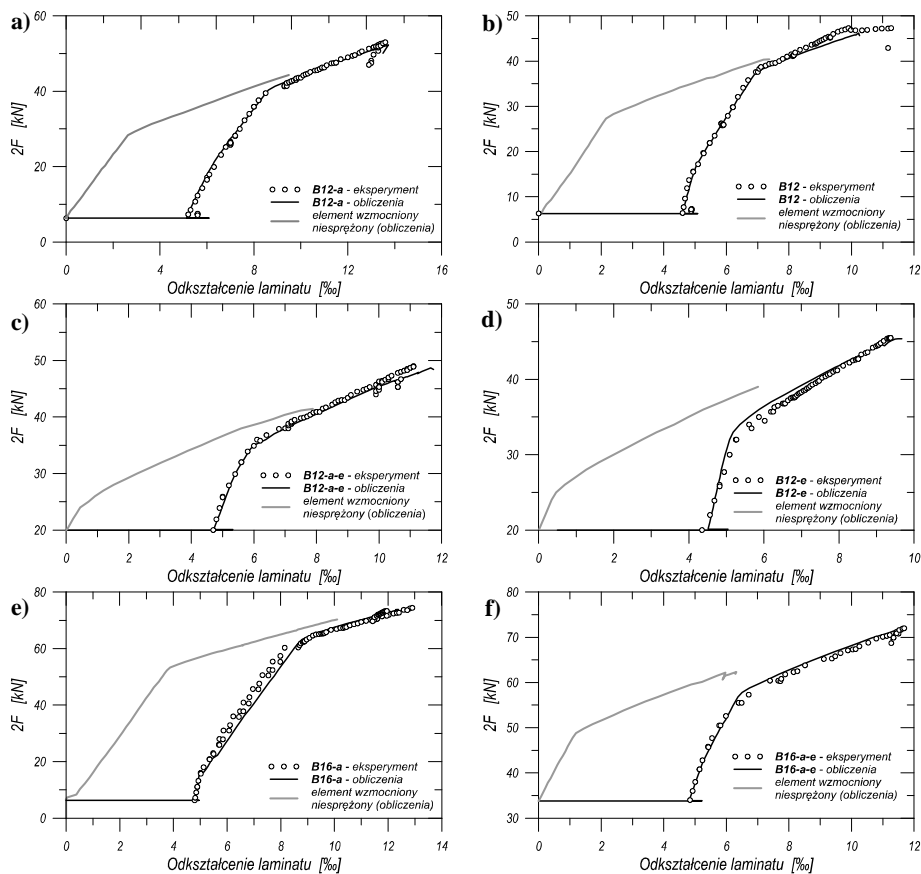
Analiza porównawcza ma na celu weryfikację przyjętego modelu numerycznego w odniesieniu do wyników uzyskanych z badań doświadczalnych. W analizie uwzględniono wszystkie parametry zmierzone w badaniach, a więc przemieszczenia pionowe belek, uśrednione na odcinku czystego zginania odkształcenia betonu w ściskanej i rozciąganej strefie belek oraz uśrednione odkształcenia taśm kompozytowych na tym samym odcinku. Wykonano analizę obliczeń belek niewzmocnionych oraz belek wzmocnionych biernie. Takie szersze ujęcie analizy porównawczej pozwala nie tylko na konfrontację modelu obliczeniowego z badawczym, ale przy braku wyników badań, umożliwia bardzo szeroką analizę efektów wzmocnienia w stosunku do elementów niewzmocnionych. Na rys. 4 pokazano wykresy porównawcze przemieszczeń pionowych belek w funkcji obciążenia. Wykresy badawcze i obliczeniowe pozostają w dużej zgodności w całym zakresie obciążeń. Zaproponowany model numeryczny prawidłowo opisuje redukcję sztywności konstrukcji niewzmocnionej po wstępnym obciążeniu, następnie częściowe odzyskanie sztywności w wyniku sprężenia przy użyciu naprężonej taśmy oraz ponowną utratę sztywności elementu wzmocnionego, jako skutek dalszego obciążania do chwili zniszczenia.



Rys. 4. . Obliczeniowe i doświadczalne wykresy obciążenie - ugięcie

Fig. 4. Calculated and test charts of load – displacement

W bardzo dobrej zgodności z obliczeniowymi pozostają również wykresy doświadczalne odkształceń taśm kompozytowych w funkcji obciążenia (rys. 5). Model numeryczny również dobrze przewiduje odkształcalność taśm przyklejonych i tych nieprzyklejonych do powierzchni betonu. Na uwagę zasługuje porównanie odkształcalności taśm zarówno w elementach wzmocnionych biernie, jak i czynnie, które potwierdza wyższy stopień wykorzystania wytrzymałości tego materiału na rozciąganie we wzmocnieniach czynnych.



Rys. 5. Obliczeniowe i doświadczalne wykresy obciążenie – odkształcenie laminatu CFRP

Fig. 5. Calculated and test charts of load –strain of CFRP laminate

5. Wnioski

Na podstawie porównawczej analizy wyników doświadczalnych i obliczeniowych można wysnuć następujące wnioski:

- efektywność wzmocnienia malała wraz ze wzrostem stopnia istniejącego zbrojenia stalowego – efekt ten prawidłowo odtwarza się numerycznie,
- porównanie wyników doświadczalnych i obliczeniowych potwierdza poprawność przyjętego obliczeniowego modelu MES w całym zakresie obciążeń obejmującym stan wstępnego obciążenia przed wzmocnieniem oraz stan po wzmocnieniu aż do zniszczenia,
- zaproponowany model obliczeniowy może być więc skutecznie stosowany do przewidywania efektów wzmocnienia, jak również do analizy propagacji rys w elementach słabo i silnie obciążonych przed wzmocnieniem.

Literatura

- [1] H. A. W. Cornelissen, D. A. Hordijk, H. W. Reinhardt. Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete. *Heron*, 31(2):45–56, 1986.
- [2] P. H. Feenstra. *Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete*. Praca doktorska, Delft University of Technology, 1993.
- [3] H. Ko, Y. Sato. Bond stress–slip relationship between FRP sheet and concrete under cyclic load. *J. of Comp. for Construction*, 11(4):419–426, August 2007.
- [4] R. Kotynia, K. Lasek. Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie przy użyciu naprężonych taśm z włóknami węglowymi. *Inżynieria i Budownictwo*, Maj 2016.
- [5] R. Kotynia, K. Lasek, M. Staśkiewicz. Flexural Behavior of Preloaded RC Slabs Strengthened with Prestressed CFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 18(3): A4013004, May/June 2013.
- [6] X.Z. Lu, J.G. Teng, L.P. Ye, J.J. Jiang. Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, 27(6):920–937, May 2005.
- [7] H. Shima, L. L. Chou, H. Okamura. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *J. of the Fac. of Engin., The Univ. of Tokyo (B)*, 22:133–194, 1987.
- [8] F. J. Vecchio. Reinforced concrete membrane element formulations. *Journal of Structural Engineering*, 116(3):730–750, 1990.
- [9] *DIANA. User's Manual*. TNO DIANA BV., 2015.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH PRESTRESSED CFRP LAMINATES

Summary

The article presents numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened with pre-tensioned CFRP laminates. The aim of the tests was to analyse the effectiveness of the active strengthening in relation to the general passive methods of strengthening RC members in flexure. Moreover, studies have shown the influence of the loading history before strengthening on the strengthening ratio. The calculated two-dimensional structural model taking into account the physical characteristics of the nonlinear component materials was proposed in the paper. Numerical simulations performed for the calibrated mechanical model showed a very good agreement with experimental results. Numerical analysis was broadened to include elements of non-strengthened RC members and the strengthened ones with passive CFRP laminates.

Keywords: reinforced concrete beams, strengthening, initial prestressing, load carrying capacity, deformability, FEM model, numerical simulations

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.33