

prof. dr hab. inż. Józef Jasiczak*
dr inż. Agnieszka Ślosarczyk*
inż. Bartosz Gołąbek*

Efektywność napraw belek żelbetowych cienką warstwą fibrobetonu cementowego

*The effectiveness of repairing works of defected concrete beams
by the cement fiber composite thin layer*

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań belek betonowych z alternatywnymi formami zbrojenia, przyjmując stały poziom objętościowy (1,65%) włókien krótkich stalowych i polipropylenowych oraz makrowłókien w postaci prętów stalowych ϕ 6 mm. Najwyższą nośność i odporność na pęknięcie kompozytu wykazywały belki betonowe wzmacniane prętami stalowymi. Zarysowane i ugięte belki betonowe poddano procesowi naprawy. W warstwie rozciąganej nałożono 1,5 cm warstwę fibrobetonu o średniej wytrzymałości na ściskanie 139,2 MPa oraz 25,5 MPa na rozciąganie przy zginaniu i $> 2,5$ MPa przy odrywaniu. Potwierdzono efektywność tak wykonanej naprawy i wskazano możliwości aplikacyjne metody.

Słowa kluczowe: zarysowane belki żelbetowe, metoda naprawy, fibrokompozyt cementowy.

Abstract. This paper presents the results of laboratory research on concrete beams with alternative types of reinforcement, assuming a constant volume (1,65%) of short steel and polypropylene fibers and microfibers in the form of steel rods ϕ 6 mm. It was shown that the highest load-carrying capacity and the toughness of the composite, was obtained for concrete beams reinforced with steel rods. All the defected concrete beams were repairing by the 1,5 cm cement fiber composite thin layer which was put in the stretching zone of beams. The technical data of repairing mortar were as follows: compressive strength 139,2 MPa, flexural strength 25,5 MPa, adhesive $> 2,5$ MPa. Presented results indicated on the effectiveness and possibility of practical application of such repairing system.

Keywords: defected concrete beams, repairing method, cement fiber composite.

Europejski Komitet Normalizacyjny opracował w ciągu ostatnich piętnastu lat zbiór dziesięciu norm, przyjętych do stosowania także w Polsce, pod ogólnym tytułem PN-EN 1504: *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności*. Norma wskazuje, iż naprawa budowli to złożony sposób postępowania, mający na celu całkowite lub częściowe przywrócenie obiektowi wyjściowego lub wymaganego projektem stanu użytkowania [1, 2]. Dużą grupę rozwiązań stanowią systemy stosowane do naprawy i wzmacniania konstrukcji betonowych przywracające ciągłość i trwałość konstrukcji. Należą do nich:

- uzupełnienie lub wymiana wewnętrznych lub zewnętrznych prętów zbrojeniowych;

- zakotwienie prętów w przygotowanych wcześniej lub wywierconych otworach w betonie;

- doklejenie płyt wzmacniających;

- iniekcja rys i pustek poprzez ich wypełnianie;

* Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

- sprężanie (strunobeton lub kablobeton);
- nadkład zaprawy lub betonu o dużej wytrzymałości traktowany jako warstwa wzmacniająca uszkodzoną konstrukcję.

Ostatnia metoda ma wiele przykładów realizacji opisanych w światowej literaturze, a dotyczących zarówno wzmacniania w warunkach laboratoryjnych zwykłych belek betonowych 10 x 10 x 35 cm warstwą betonu ultrawysokowartościowego [3, 5] grubości 1 cm, czy wzmocnienia – w skali naturalnej – podpór mostowych także betonem tego typu [4]. Wzoruując się na przesłankach opisanych w pracach [3, 5], wykonaliśmy cykl badań wzmocnienia zarysowanych i ugiętych belek żelbetowych o różnych formach zbrojenia scalonych ponownie 1,5 cm warstwą fibrobetonu wysokiej wytrzymałości nałożonej w strefie rozciąganej zniszczonych wcześniej belek żelbetowych.

Opis i przebieg badań

Wykonano 6 serii belek żelbetowych o wymiarach 10 x 10 x 40 cm. Przyjęto beton klasy C45/55 i alternatywne zbroje-

nie: włókna stalowe; włókna polipropylenowe; pręty ϕ 6 mm gładkie; pręty ϕ 6 żebrowane; wspólny procent zbrojenia – 1,65% objętościowo. Wyniki badań betonu na ściskanie podano w tabeli 1. Użytkowano zakładaną klasę betonu przy zróżnicowanej jego gęstości [6].

Belki, bez zbrojenia i zazbrojone wariantowo, poddano dwupunktowemu obciążeniu. W programie założono ugięcie belek rzędu 3,5 mm, czyli 1/100 rozpiętości w świetle podpór, przy dopuszczalnym w przypadku belek żelbetowych 1/200, tj. 1,75 mm. Belki celowo przeciążono dwukrotnie, by uzyskać obraz rys przy nadmiernym ugięciu, co odpowiada w praktyce stanom awaryjnym stropów żebrowych. Zastosowano procedury badawcze opisane w normach [8, 9] i określono: maksymalną siłę zginającą [kN]; maksymalne naprężenie przy zginaniu [MPa]; energię przy maksymalnej sile zginającej [J]; energię przy ugięciu 3,5 mm [J]. Porównując wyniki zawarte w tabeli 2, można zauważyć zależność nośności i ugięcia od rodzaju przyjętego zbrojenia mimo objętościowo porównywalnej jego wartości. Także charakter zarysowań jest zróżnicowany, choć

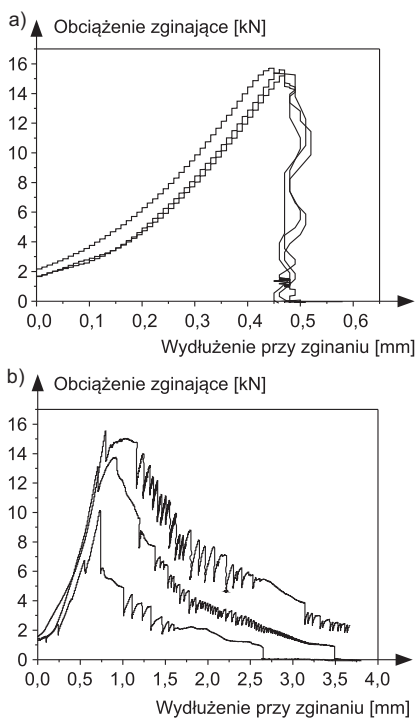
wszystkie belki zbrojone obciążano do uzyskania ugięcia rzędu 3,5 mm.

Zarysowane belki betonowe i żelbetowe wzmocniono w pasie dolnym 1,5 cm warstwą zaprawy o wysokiej wytrzymałości. Wykorzystano do tego celu firmową zaprawę Fast Fibre – jednoskładnikową, szybkowiążącą zaprawę naprawczą stosowaną zwykle w warunkach bardzo wysokich obciążeń konstrukcji wpływami dynamicznymi. Jest to zaprawa cementowa o szczególnie korzystnych cechach mecha-

Tabela 1. Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek 10 x 10 x 10 cm, świadków dla belek 10 x 10 x 40 cm, bez zbrojenia i ze zbrojeniem tradycyjnym, z włóknem polipropylenowym, z włóknem stalowym

Masa [kg]	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
bez zbrojenia, z prętami ϕ 6 mm		
2,39	2,39	71,5
2,49	2,49	74,2
2,40	2,40	63,7
2,44	2,44	70,6
2,49	2,49	69,4
2,38	2,38	67,4
2,43	2,43	69,5
włókna polipropylenowe		
2,35	2,35	58,3
2,38	2,38	65,4
2,38	2,38	43,0
2,38	2,38	64,2
2,37	2,37	64,1
2,37	2,37	56,9
2,37	2,37	57,7
włókna stalowe		
2,45	2,45	70,1
2,48	2,48	62,8
2,43	2,43	72,4
2,41	2,41	72,6
2,39	2,39	65,3
2,48	2,48	71,0
2,44	2,44	69,03

nicznych, w której zastosowano dwa rodzaje włókien (stalowych i z tworzyw sztucznych), gwarantujących plastyczność materiału. Cechy mechaniczne po 28 dniach podawane przez producenta zaprawy: wytrzymałość na ściskanie – 104 MPa; wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – 25 MPa; przyczepność do podłoża betonowego – 3 MPa. Zaprawa wykazuje także niski skurcz < 0,3 mm. W laboratorium Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Poznańskiej sprawdzono wymienione parametry zaprawy i uzyskano następujące wyniki [7]: wytrzymałość na ściskanie – 129,6 do 148,4 MPa; wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – 20,5 do 33,5 MPa, przyczepność do podłoża betonowego – 3,1 do 3,9 MPa. Zaprawa wykazuje także bardzo niski skurcz < 0,175 mm/m. Z opisanej zaprawy fibrobetonowej wykonano 1,5 cm warstwy wzmacniające i uciągające zarysowane dolne części belek. Beton pierwotny został uprzednio oczyszczono-

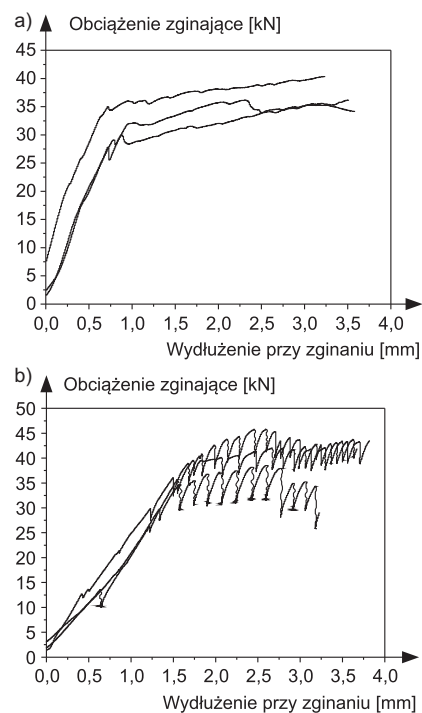


Rys. 1. Relacja obciążenie – przemieszczenie w belkach: a) bez zbrojenia, b) z warstwą fibrobetonu

Tabela 2. Porównanie cech mechanicznych pięciu rodzajów belek

Rodzaj belki	Maksymalna siła zginająca [kN]	Maksymalne naprężenie przy zginaniu [MPa]	Energia przy maksymalnej sile zginającej [J]	Energia przy ugięciu 3,5 mm [J]
Betonowa	15,59 ± 0,38	5,46 ± 0,13	4,50 ± 0,61	5,17 ± 0,57
Z włóknem polipropylenowym	20,68 ± 2,12	7,24 ± 0,74	34,34 ± 17,6	67,88 ± 6,20
Z włóknem stalowym	26,89 ± 4,14	9,42 ± 1,45	13,89 ± 3,75	69,29 ± 12,05
Z prętami gładkimi 4 ϕ 6	38,68 ± 2,10	13,54 ± 0,73	104,17 ± 20,09	111,67 ± 5,78
Z prętami zębowanymi 4 ϕ 6	59,30 ± 2,90	20,76 ± 1,02	83,31 ± 12,63	139,4 ± 42,70

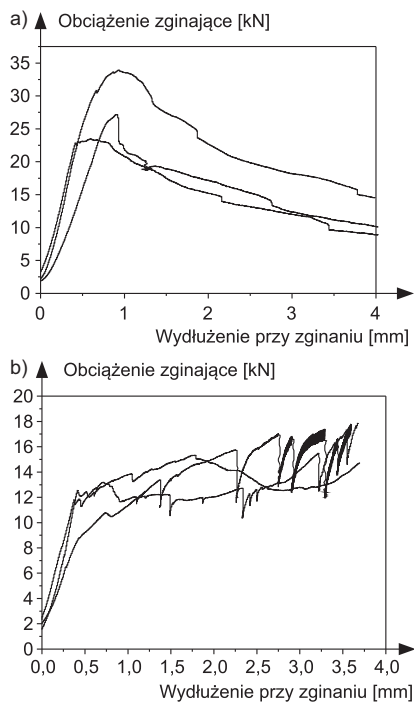
ny w sposób umożliwiający dobrą przyczepność nowej warstwy do konstrukcji zasadniczej, a występujące ugięcia zniwelowano do zera, dając obciążenie odwrotne do pierwszego. Po 28 dniach dojrzewania wzmocnionych belek przystąpiono do badań. Ocenie poddano takie same parametry jak w badaniach belek wyjściowych. Uzyskane wykresy zależności naprężenie – przemieszczenie wybranych rodzajów belek porównano parami (rysunki 1, 2, 3). Wyniki badań belek pierwotnie zarysowanych oraz po wzmocnieniu zaprawą fibrobetonową wysokiej wytrzymałości porównano w tabeli 3.



Rys. 2. Relacja obciążenie – przemieszczenie w belkach: a) zbrojonych stalowymi prętami gładkimi 6 mm przed wzmocnieniem; b) po wzmocnieniu warstwą fibrobetonu

Analiza wyników badań

Biorąc pod uwagę parami zestawione wykresy naprężenie – ugięcie oraz porównawcze wyniki badań parametrów wytrzymałościowych belek stwierdzono, że naprawa konstrukcji żelbetowych przy użyciu betonów wysokowartościowych jest skuteczna, tym bardziej że wytrzymałość zaprawy naprawczej na rozciąganie przy zginaniu przekracza 20 MPa, a wytrzymałość betonu zwykłego zwykle nie przekracza 4 MPa. W większości przypadków następuje wzmocnienie elementu przynajmniej do stopnia pierwotnego, a czasami nieznaczny wzrost wytrzymałości belki.



Rys. 3. Relacja obciążenie – przemieszczenie w belkach: a) z włóknami stalowymi przed wzmocnieniem, b) po wzmocnieniu warstwą fibrobetonu

Tabela 3. Porównanie cech mechanicznych belek zarysowanych oraz poddanych w drugim etapie badań wzmocnieniu warstwą fibrobetonu

Rodzaj belki	Maksymalna siła zginająca [MPa]	Maksymalne naprężenia zginające [MPa]	Energia przy maks. naprężeniu zginającym [J]	Energia przy ugięciu 3,5 mm [J]
Betonowa	15,59 ± 0,38	5,46 ± 0,13	4,50 ± 0,61	5,17 ± 0,6
Betonowa po naprawie	13,16 ± 2,74	4,60 ± 0,96	6,08 ± 1,67	18,41 ± 9,1
Z włóknem polipropylenowym	20,68 ± 2,12	7,24 ± 0,74	34,3 ± 17,2	67,88 ± 6,2
Z włóknem polip. po naprawie	20,90 ± 10,41	7,32 ± 3,64	46,0 ± 23,1	49,69 ± 26,9
Z włóknem stalowym	26,89 ± 4,14	9,42 ± 1,45	13,9 ± 3,8	69,29 ± 12,1
Z włóknem stalowym po naprawie	16,99 ± 1,45	5,95 ± 0,51	39,4 ± 14,5	48,01 ± 10,7
Z prętami gładkimi 4 φ 6	38,68 ± 2,10	13,54 ± 0,73	104,2 ± 20,1	111,67 ± 5,8
Z prętami gładkimi 4 φ 6 po naprawie	42,74 ± 3,79	14,96 ± 1,33	83,5 ± 24,2	108,3 ± 20,3
Z prętami żebrowanymi 4 φ 6	59,30 ± 2,90	20,76 ± 1,02	83,3 ± 12,7	139,4 ± 42,7
Z prętami żebrowanymi 4 φ 6 po naprawie	56,47 ± 18,48	19,76 ± 6,47	90,8 ± 21,9	116,6 ± 42,5

Analizując tabelę 3 porównującą wyniki pierwszego badania z badaniem po naprawie, można zauważyć, iż z wyjątkiem belek bez zbrojenia oraz z włóknami stalowymi różnice wyników są nieznaczne. Dobry efekt wzmocnienia uzyskują elementy niezbrojone, pęknięte na całej wysokości przekroju w wyniku pierwotnego obciążenia. Nałożenie 1,5 cm warstwy fibrobetonu powoduje istotne wzmocnienie belki, czego dowodem jest wykres b na rysunku 1. Przekrój pracuje także aktywnie w strefie rozciąganej, czego nie można powiedzieć o belce niezbrojonej. Energia wymuszająca 3,5 mm ugięcie wynosi w przy-

padku belek niezbrojonych 5,17 J, a w przypadku warstwy fibrobetonowej aż 18,4 J. Istnieje także związek pierwotnej nośności belki z nośnością po naprawie. Przy takiej samej klasie betonu C45/55 nośność jest różna, w zależności od rodzaju zbrojenia (tabela 3). Stwierdzono, iż wpływ na wyniki badań mogą mieć również czynniki związane z wykonaniem naprawy. W analizowanym przypadku **negatywny wpływ na wytrzymałość naprawionego elementu mogą mieć:**

- niewłaściwa pielęgnacja fibrobetonowej zaprawy naprawczej podczas całego procesu twardnienia;
- niedokładne połączenie i wypełnienie klejem do płytek ubytków w uszkodzonych elementach powstałych po pierwszym zarysowaniu;
- osłabiona konstrukcja belek podczas niwelowania pierwotnego ugięcia 3,5 mm;
- nierówne rozproszczenie zaprawy naprawczej (zmiennosc wysokości przekroju).

Cechą pozytywną przy wykonywaniu badań jest brak zjawiska delaminacji w dolnej warstwie, co skłania do konkluzji, że

wzmacnianie konstrukcji betonami wysokowartościowymi, a szczególnie fibrobetonem z dodatkiem włókien stalowych i polipropylenowych jest skuteczną metodą naprawy żelbetu. Należy zdawać sobie także sprawę z losowego charakteru zniszczeń, w związku z czym naprawione elementy charakteryzują się dużymi rozrzutami wyników poszczególnych parametrów wytrzymałościowych. Nie można więc przy pracach projektowych posługiwać się wynikami średnimi z badań, lecz wynikami charakterystycznymi szacowanymi z rozkładu statystycznego z uwzględnieniem rzeczywistego odchylenia standardowego.

Wnioski

Oceniając wartości aplikacyjne wykonanych badań, można wskazać na możliwość zaadaptowania metody do naprawy stropów żelbetonowych belkowo-żebrowych. Warstwą wzmacniającą i uciążającą może być 3 – 5 cm warstwa betonu natryskowego z włóknami stalowymi i polipropylenowymi. Wykonane próby wskazują na możliwość naniesienia torkretu o wytrzymałości na ściskanie do 100 MPa przy wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu 10 – 12 MPa i wytrzymałości na odrywanie > 2,5 MPa. W miejscach wskazanych przez projektanta można w warstwie torkretu zatopić siatki stalowe o okach 10 x 10 cm z prętów φ 4,5 mm lub φ 6 mm, przez co zwiększa się wytrzymałość betonu naprawczego na rozciąganie przy zginaniu. Naprawa taka obejmuje: ocenę stanu technicznego konstrukcji; wykonanie projektu naprawy; podparcie naprawianego stropu; oczyszczenie powierzchni od dołu metodą strumieniowo-ścierną; zamocowanie siatek stalowych w miejscach wskazanych przez projektanta; naniesienie betonu natryskowego w dwóch warstwach; pielęgnację ułożonego torkretu. W szczególnych przypadkach nanosi się powłoki ochronne, co dokładnie precyzuje PN-EN 1504.

Literatura

- [1] Czarnecki L., Łukowski P., Jasiczak J.: Ochrona i naprawa betonowych obiektów oczyszczania ścieków w ramach strategii zarządzania konstrukcją w świetle Norm Europejskich z serii PN-EN 1504. Ochrona przed korozją, 1/2013.
- [2] Raupach M.: Concrete repair according to the New European Standard EN 1504. In Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (M. Alexander, H. D. Beushausen, F. Dehn and P. Moyo eds.), Taylor & Francis Group, London, 2006.
- [3] Lee Ming-Gin, Wang Yung Chich, Chiu Chui-Te: A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. Construction and Building Materials, 21/2007.
- [4] Structures in BSI®-CERACEM. A selection of reference projects with BSI®-CERACEM. Sika Services AG. 2002.
- [5] Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T.: Betony ultrawysokowartościowe. Właściwości, technologie, zastosowania. Polski Cement. Kraków 2008.
- [6] Ślosarczyk A., Jasiczak J.: Alternative ways of reinforcing cement composites. Composites, Theory and Practice, 4/2012.
- [7] Balcerzak J.: Wpływ włókien stalowych i polipropylenowych na wybrane właściwości zapraw do napraw betonu. Praca magisterska przygotowana pod kierunkiem J. Jasiczaka. Poznań 2011.
- [8] ASTM/C/1018-97 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
- [9] JCI-SF4 Method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete.