

BUILDER FOR THE FUTURE | BUILDER FOR THE YOUNG ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

Dorota Urbańska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wrocławska

OPIEKUN NAUKOWY
dr hab. inż. Tomasz Trapko
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,
Politechnika Wrocławska

Wzmacnianie konstrukcji betonowych za pomocą materiałów kompozytowych FRP (ang. *Fibre Reinforced Polymers*) jest znanym i coraz częściej uwzględnianym sposobem naprawy istniejących konstrukcji. Właściwości mechaniczne systemu FRP zależą głównie od temperatury. W systemach FRP kompozyt łączy się z betonem za pomocą żywicy epoksydowej, której temperatura zeszklenia zawarta jest w przedziale 40–80°C i to ona decyduje o trwałości oraz skuteczności wzmocnienia, niezależnie od zastosowanych włókien. Po przekroczeniu temperatury zeszklenia matryca traci swoje właściwości, a system FRP traci przyczepność między żywicą oraz włóknami i staje się nieefektywnym wzmocnieniem. W odpowiedzi na ten problem powstał system FRCM, który może być stosowany w środowiskach narażonych na wysokie temperatury czy ogień.

System FRCM

W systemie FRCM (ang. *Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) zastąpiono żywicę zaprawą mineralną, którą pokrywany jest wzmacniany element i która łączy się z włóknami siatki kompozytowej, zapewniając jej przyczepność do betonu. Jednym z materiałów wzmacniających stosowanych w tym systemie jest siatka wykonana z włókien PBO (p-Phenylene BenzobisOxazole). System ten oznacza się w literaturze jako PBO-FRCM. Badania przeprowadzone na belkach zginanych wzmocnionych zarówno na zginanie, jak i ścinanie materiałami PBO-FRCM [1,2,3,4] wykazały, że system ten pozwala na efektywne wzmocnienie, jednak przy-

WZMOCNIENIE KOMOZYTOWE PBO-FRCM

Część 1.

W artykule przedstawiono badania przeprowadzone na teowych belkach żelbetonowych wzmocnionych na ścinanie materiałami kompozytowymi PBO-FRCM.

rost nośności jest mniejszy niż w przypadku wzmocnień FRP. Wiąże się to z efektem poślizgu, jaki występuje między zaprawą mineralną a włóknami, ponieważ zaprawa nie jest w stanie tak dokładnie pokryć wszystkich włókien, jak żywica epoksydowa. Do zniszczenia dochodzi w wyniku przedwczesnego odspojenia się włókien od matrycy. Prowadzi to do niepełnego wykorzystania właściwości mechanicznych włókien PBO. Aby zwiększyć efektywność wzmocnień FRCM, należy stosować zakotwienia siatek PBO, które mogą zapobiec przedwczesnemu odspajaniu się włókien i tym samym zwiększyć wykorzystanie nośności siatki PBO.

Badania doświadczalne

Przedmiotem badań były 4 belki żelbetowe o przekroju teowym. Jedna belka była belką kontrolną, natomiast 3 pozostałe były wzmocnione na ścinanie materiałami kompozytowymi PBO-FRCM, o takiej samej konfiguracji wzmocnienia (szerokość pasków PBO, kąt nachylenia włókien do osi belki). W każdej ze wzmocnionych belek zastosowano taką samą metodę zakotwienia kompozytu w półce belki. Wszystkie wzmocnienia wykonano z jednej warstwy siatki PBO.

Elementy badawcze

Badania przeprowadzono na belkach teowych o wymiarach przekroju poprzecznego 350 x 400 mm, szerokości środnika 150 mm i długości 2300 mm. Belki zbrojone były dołem 5 prętami o średnicy $\varnothing 20$ mm i górą 2 prętami o średnicy $\varnothing 20$ mm, oraz strzemionami o średnicy $\varnothing 8$ mm ze stali B500SP. Zbrojenie

SYSTEM PBO-FRCM

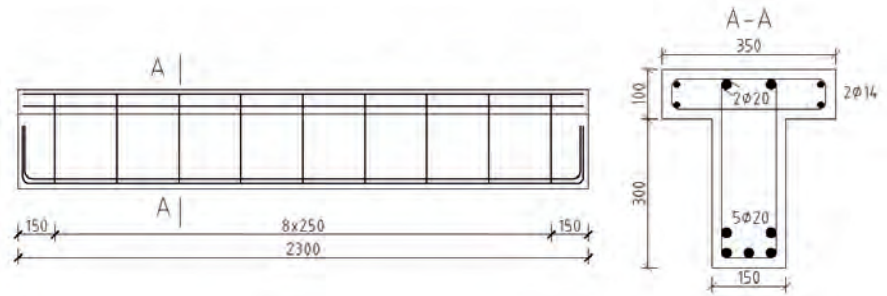
Jest to system składający się z włókien PBO (p-Phenylene BenzobisOxazole), które są przyklejane do powierzchni elementu za pomocą zaprawy mineralnej. System ten może być używany równie efektywnie jak system FRP, jednak z powodu przedwczesnego odklejania się kompozytu od powierzchni betonu ważnym elementem jest odpowiednie zakotwienie kompozytu.

główne rozciągane zostało dobrane tak, aby nie wystąpiło zniszczenie ze względu na zginanie przed wyczerpaniem nośności na ścinanie. Rozstaw strzemion wynosił 250 mm. Na rysunku 1. przedstawiono schemat belek użytych do badań.

Belki oraz próbki do określenia cech betonu wykonano w zakładzie prefabrykacji podczas jednego betonowania. Do określenia cech wytrzymałościowych betonu wykonano próbki sześciennie 150 x 150 x 150 mm i próbki walcowe o średnicy $\varnothing 150$ mm i wysokości 300 mm. Przed przystąpieniem do badań zostały określone następujące cechy betonu:

- średnia wytrzymałość na ściskanie określona na próbkach walcowych – 47,75 MPa,
- średnia wytrzymałość na ściskanie określona na próbkach sześciennych – 45,95 MPa,

- średni moduł sprężystości – 32,13 GPa.
 - Określono również właściwości mechaniczne prętów zbrojeniowych:
 - średnia granica plastyczności prętów – 526,2 MPa,
 - średni moduł sprężystości stali – 206,7 GPa.
- Belki wzmocniono na ścinanie za pomocą siatki z włókna PBO Ruredil X Mesh Gold na zaprawie mineralnej Ruredil X Mesh M750. Właściwości włókien PBO i całego systemu PBO-FRCM na podstawie danych producenta podano w tabeli 1.



Rys. 1. Elementy badawcze

Przygotowanie elementów badawczych i metodyka pomiarowa

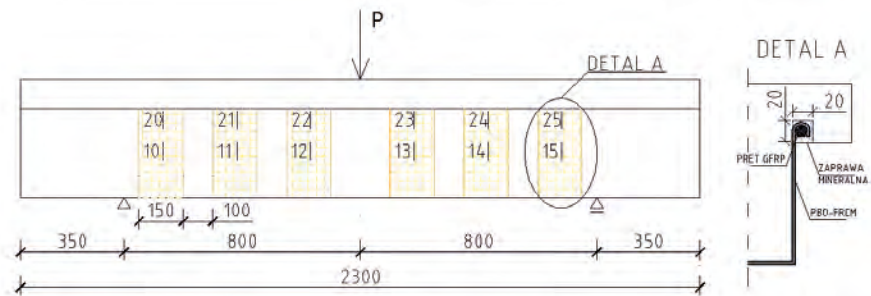
W zakładzie prefabrykacji wykonano w belkach pod półką podłużne rowki o wymiarach 20 x 20 mm, które posłużyły do wykonania zakotwienia końcówek siatek PBO. Przed nałożeniem pierwszej warstwy zaprawy mineralnej oczyszczono i zwilżono powierzchnię betonu oraz wyoblono naroża. W każdej ze wzmocnionych belek zastosowano taki sam sposób ukształtowania wzmocnienia na ścinanie oraz jego zakotwienie. Belki zostały wzmocnione paskami siatki PBO o szerokości 150 mm, w rozstawie w świetle co 100 mm (rys. 2.), a nachylenie głównych włókien do osi podłużnej belki wynosiło 90°. Zakotwienia wykonano, nawijając końcówki siatki, po obydwu stronach, na pręt kompozytowy z włókien szklanych (detal A na rysunku 2.). Pręt miał długość równą długości belki. Po nawinięciu końcówek siatki PBO był on wklejany w rowki pod półką za pomocą zaprawy mineralnej, która była również używana do wzmacniania belek.

Badania wykonano w maszynie wytrzymałościowej o zakresie 0–6000 kN. Elementy były obciążane w sposób ciągły do zniszczenia, w schemacie trójpunktowego zginania z siłą skupioną umieszczoną w połowie rozpiętości przęsła. Dla każdego poziomu obciążenia rejestrowano odkształcenia i ugięcia oraz mierzo- no szerokość rozwarcia rys.

Odształcenia betonu, stali oraz kompozytów mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych. Na zewnętrznych strzemionach z siatki PBO naklejo no tensometry w połowie wysokości belek, zgodnie z kierunkiem włókien. Tensometry naklejo no również w miejscu zakotwienia siatek, po obu stronach belki. Ugięcia belek mierzono za pomocą czujników indukcyjnych.

Wyniki i analiza

Wszystkie elementy zniszczyły się na ścinanie w wyniku powstania ukośnej rysy niszczącej. Belka kontrolna, która nie posiadała wzmocnienia, zniszczyła się przy obciążeniu P równym 396,6 kN. Wzmocnione belki zniszczyły się przy obciążeniach równych kolejno 432,4; 464,1 i 485,9 kN, a odpowiadające im ugięcia wynosiły 11,4; 11,8 i 14,9 mm. Miarą efektywności wzmocnienia jest stopień



Rys. 2. Schemat wzmocnienia elementów badawczych



Rys. 3. Zniszczenie belki: a) ukośna rysa niszcząca, b) odspojenie paska PBO i zarysowanie zakotwienia

Tablica 1. Właściwości włókien i systemu PBO-FRCM [5]

	Wytrzymałość na rozciąganie f_{tu} [MPa]	Moduł Younga E_t [GPa]	Graniczne odkształcenia rozciągające ϵ_t [%]
włókna PBO	5800	270	2,15
system PBO-FRCM	1664	137	1,76

wzmocnienia, który zdefiniowano jako stosunek nośności belki wzmocnionej do nośności belki kontrolnej. W przeprowadzonych badaniach otrzymano wartość stopnia wzmocnienia w zakresie 1,10–1,23.

Mechanizm zniszczenia wszystkich wzmocnionych belek polegał na odspojeniu się siatki PBO, któremu towarzyszył rozwój rys ukośnych. W żadnej z belek nie nastąpiło rozerwanie włókien siatki PBO. Pomimo odspojenia kompozyt dalej przenosił siłę ścinającą i zapobiegał szybkiemu rozwojowi rys ukośnych pod półką. We wzmocnionych belkach najszybciej odspajały się siatki, gdzie rysa ukośna przebiegała w środku ich wysokości (paski 11 i 14 na rysunku 2.), a następnie paski przy podporach

(10 i 15). Przed samym zniszczeniem dochodziło do nagłego rozwijania się rysy ukośnej w półce, która nie była wzmocniona. W miarę przrostu obciążenia rysa ta dochodziła do zakotwienia, a następnie biegła wzdłuż pręta GFRP. W wyniku tego doszło do odspojenia zakotwienia i rozwoju ukośnej rysy niszczącej (rys. 3.). Na paskach siatki PBO zarysowaniu uległa także zewnętrzna warstwa zaprawy cementowej w wyniku poślizgu między włóknami siatki a matrycą, który jest typowy dla wzmocnień FRCM. Jest to związane z niedokładnym pokryciem wszystkich włókien zaprawą i powstaniem efektu „teleskopowego”, w którym włókna środkowe w wiązce włókien mają większe odkształcenia niż włókna zewnętrzne, pokryte zaprawą.

Maksymalne odkształcenia kompozytu mierzone w połowie wysokości paska PBO to 8,23%, co oznacza wykorzystanie jego całkowitej nośności na poziomie około 47% (tabela 1.). W momencie przekroczenia nośności betonu na ścinanie dochodziło do powstawania rys ukośnych i nagłego przyrostu odkształceń w strzemiach PBO, znajdujących się w miejscu przebiegu rysy (paski 11 i 14), co oznacza,

System PBO-FRCM jest skutecznym sposobem wzmocnienia belek żelbetonowych na ścinanie. W przypadku zastosowania przedstawionego sposobu zakotwienia otrzymano wzrost nośności o 10–23% w porównaniu z belką niewzmocnioną.

że włączyły się one w przenoszenie naprężeń rozciągających w zarysowanym przekroju.

Strzemięna znajdująca się bliżej podpory włączyła się we współpracę odpowiednio później, w momencie kiedy rysa ukośna rozwijała się w kierunku podpory.

Maksymalne odkształcenia kompozytu pod zakotwieniem wyniosły 2,91%. Gwałtowny przyrost odkształceń w miejscu zakotwienia miał miejsce po przekroczeniu nośności belki niewzmocnionej. Powstawała wtedy rysa wzdłuż zakotwienia i włączało się ono w pełni do współpracy w przenoszeniu siły ścinającej aż do momentu jego odspojenia.

Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań można potwierdzić, że system PBO-FRCM jest skutecznym sposobem wzmocnienia belek żelbetonowych na ścinanie. W przypadku zastosowania przedstawionego sposobu zakotwienia otrzymano wzrost nośności o 10–23% w porównaniu z belką niewzmocnioną. Ponieważ charakter pracy wzmocnienia FRCM wyróżnia się występującym poślizgiem między włóknami a matrycą, odpowiednio zakotwienie kompozytu jest ważnym elementem, który zapobiega przedwczesnemu odspojeniu się siatki.

Zaproponowany w artykule sposób zakotwienia, z wykorzystaniem wklejonego pod półkę pręta kompozytowego, spełnił swoje zadanie i nie uległ zniszczeniu. Pozwoliło to na lepsze wykorzystanie właściwości wytrzymałościowych siatki PBO. W przedstawionych badaniach uzyskano maksymalne odkształcenia kompozytu wynoszące 8,23%, co stanowi około 47% jego nośności przy próbie rozciągania. W badaniach na belkach wzmocnionych w systemie PBO-FRCM bez zakotwienia maksymalne odkształcenia kompozytu



Rys. 4. Widok ukośnej rysy niszczącej, na pasku 15 widoczny poślizg włókien

tu wyniosły 3,5% [6], co potwierdza efektywność zastosowanego wzmocnienia. Zaproponowany sposób wzmocnienia z zakotwieniem nie zapewnił jednak pełnego wykorzystania wytrzymałości siatki PBO na rozciąganie. W żadnej z belek nie doszło do zerwania włókien PBO.

We wszystkich elementach zaobserwowano ten sam mechanizm zniszczenia, który polegał na odspojeniu się siatki PBO i rozwoju rys ukośnych. Wzdłuż zakotwienia powstawały rysy podłużne, które powodowały jego odspojenie i w konsekwencji zniszczenie całego elementu. W żadnej z belek nie nastąpiło rozerwanie włókien siatki PBO. Odspojenie zewnętrznych strzemi kompozytowych od powierzchni elementu występowało w warstwie pomiędzy włóknami a matrycą.

Kolejnym etapem prac powinno być zaproponowanie innych sposobów zakotwienia materiałów PBO-FRCM oraz znalezienie skutecznego sposobu zahamowania poślizgu i odspojenia się siatki PBO od powierzchni elementu. W kolejnym numerze: *Mechanizm pracy wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM przy naprężeniach rozciągających i ścinających*.

Bibliografia

- [1] Brückner A. & Ortlepp R. & Curbach M., 2007. Anchoring of shear strengthening for T-beams made of textile reinforced concrete (TRC), *Materials and Structures*, 2008; 41, pp. 407–418.
- [2] Baggio D. & Soudki K. & Noël M., 2014. Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems, *Construction and Building Materials*, 2014; 66, pp. 634–644.

- [3] Tzoura E. & Triantafyllou T. C., 2016. Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets, *Materials and Structures*, 49 (2016), pp. 17–28.
- [4] Trapko T., Urbańska D., Kamiński M., Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites, *Composites Part B-Engineering*, 2015; 80, pp. 63–72.
- [5] Ruredil, X Mesh Gold Data Sheet, Ruredil SPA, Milan, Italy, 2009.
- [6] Ombers L., Structural performances of reinforced concrete beams strengthened in shear with a cement based fiber composite material. *Composite Structures*, 2015; 12, pp. 2316–2329.

Abstract. SHEAR STRENGTHENING OF RC BEAMS USING PBO-FRCM COMPOSITES WITH BAR ANCHORAGES. The article presents a study on the t-shaped reinforced concrete beams strengthened in a shear with PBO-FRCM composite materials. It is a system consisting of PBO fibers (p-Phenylene Benzobisoxazole) which are adhered to the surface of the element by mineral mortar matrix. This system can be used as effectively as FRP system, but due to premature debonding of composite from the concrete surface, proper anchoring of the composite is very important. Experimental studies were made on 4 reinforced concrete beams, where 3 of them were shear strengthened with PBO-FRCM with the anchorage, and one was a control beam. The anchorage system consisted of a glass fibre bar pasted in to the groove under the flange of a beam. Failure mechanism and effectiveness of PBO-FRCM shear strengthening are discussed.

Keywords: PBO-FRCM, beams, shear, composites, anchorage