

Marlena Rajczyk, Damian Jończyk

WZMACNIANIE KONSTRUKCJI BETONOWYCH KOMPOZYTAMI WŁÓKNISTYMI FRP

Wprowadzenie

Wykorzystanie kompozytów włóknistych w budownictwie jest coraz bardziej powszechne. Szczególnym zainteresowaniem cieszy się zastosowanie materiałów FRP (Fiber Reinforced Polymers) do zbrojenia konstrukcji betonowych. Wzmacnianie elementów może odbywać się poprzez wykorzystanie prętów kompozytowych, zastosowanych jako uzupełnienie lub zamiennik prętów stalowych, albo poprzez przyklejenie do zewnętrznej powierzchni belki taśm i mat.

Ze względu na korzystne właściwości materiałów kompozytowych oraz coraz większą wiedzę w zakresie pracy statycznej wzmacnianych elementów powstają w różnych krajach przepisy normatywne [1-3], służące do projektowania konstrukcji zbrojonych materiałami FRP. Szeroki przegląd przepisów normatywnych do projektowania z wykorzystaniem materiałów kompozytowych przedstawiono w [4]. Jednak kompozyty są stosunkowo nowym materiałem i jeszcze niedokładnie zbadanym, dlatego w wielu ośrodkach naukowych cały czas trwają intensywne badania nad możliwościami wynikającymi z zastosowania materiałów kompozytowych do wzmacniania konstrukcji betonowych. Głównym sposobem badań nowych elementów i materiałów jest przeprowadzanie doświadczeń, lecz dzięki oprogramowaniu typu Ansys, Abaqus czy Adina możemy bez ponoszenia kosztów modelować różnego rodzaju konstrukcje, pamiętając o tym, żeby do wyników otrzymanych tą drogą podchodzić z dystansem przede wszystkim dlatego, iż wiele danych jest przyjmowanych z góry przez osobę prowadzącą obliczenia numeryczne.

W artykule przedstawiono przegląd badań eksperymentalnych i numerycznych konstrukcji betonowych wzmacnianych materiałami kompozytowymi FRP z zastosowaniem różnych metod wzmacniania. Ponadto podano podstawowe informacje na temat właściwości kompozytów włóknistych oraz ich wykorzystania w budownictwie.

1. Kompozyty w budownictwie

Kompozyty znalazły szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu ze względu na bardzo korzystne właściwości, do których można zaliczyć bardzo dobre parametry wytrzymałościowe oraz niski ciężar własny. W rzeczywistości oprócz kompozytu nie występuje drugi taki materiał, łączący w sobie obie powyższe cechy [5]. W budownictwie właściwości kompozytów są szczególnie pożądane, dlatego elementy wykonane z różnych materiałów można wzmacniać za pomocą kompozytów włóknistych. Szeroki przegląd sposobów wzmacniania konstrukcji budowlanych za pomocą materiałów kompozytowych zaprezentowano w [6].

Przykłady wzmacniania konstrukcji budowlanych kompozytami włóknistymi przedstawiono na rysunku 1.

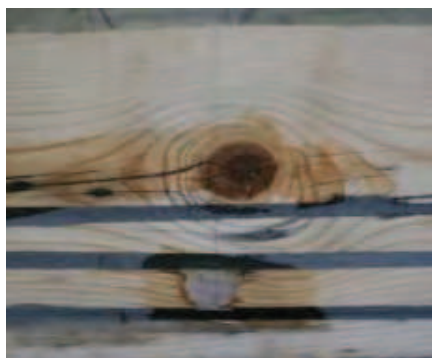
a)



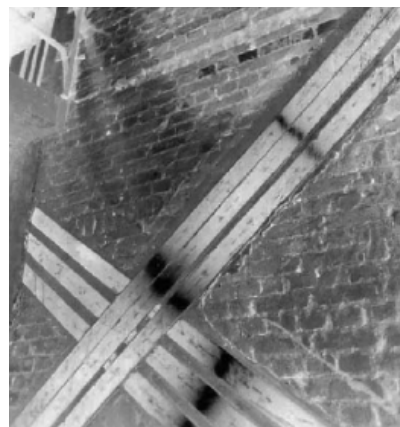
b)



c)



d)



Rys. 1. Elementy budowlane wzmacnione za pomocą materiałów kompozytowych FRP wykonane z różnych materiałów: a) z betonu [7], b) ze stali [8], c) z drewna [9], d) z elementów murowych [10]

W przypadku wykorzystywania materiałów kompozytowych w budownictwie bardzo ważne jest także ich połączenie z tradycyjnymi materiałami budowlanymi, aby dało ono możliwość otrzymania elementów budowlanych o jak najlepszych właściwościach [4] oraz tak, aby po okresie eksploatacji nie były one kłopotliwym odpadem. Dlatego w literaturze sugeruje się wykorzystanie do produkcji kompozytów włóknistych włókien naturalnych [11]. W budownictwie najczęściej stosowane

są kompozyty włókniste: aramidowe (AFRP), węglowe (CFRP), bazaltowe (BFRP) oraz szklane (GFRP) w różnorodnej formie (pręty, taśmy, maty), co ma na celu zwiększenie możliwości zastosowania kompozytów do różnych celów, czyli zarówno wykonania nowych konstrukcji, jak i wzmacniania i naprawy istniejących.

2. Badania konstrukcji betonowych wzmacnianych materiałami FRP

2.1. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne są najpewniejszym sposobem oceny nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych, ponieważ pokazują rzeczywistą pracę elementu. Przy odpowiednim opracowaniu statystycznym można na ich podstawie prowadzić dalsze badania w poszukiwaniu modeli analitycznych oraz numerycznych. Ważne jest także, aby badania przeprowadzać na elementach w skali naturalnej, lecz, niestety, wiąże się to z bardzo dużymi kosztami.

W celu naprawy istniejących konstrukcji materiały kompozytowe są wykorzystywane w formie taśm i mat przyklejanych do zewnętrznych powierzchni wzmacnianych elementów. Taśmy te mogą być poddane wstępnemu sprężaniu. Obszerne informacje na temat wzmacniania zewnętrznego elementów żelbetowych można znaleźć w [12], lecz trzeba zwrócić uwagę, że jest to pozycja wydana w 1999 roku. Dlatego najświeższe informacje można znaleźć w bieżących artykułach naukowych.

Obecnie wiele badań porusza tematykę słupów betonowych, w których zewnętrzną warstwę stanowi materiał kompozytowy. Może on być zastosowany w różnych postaciach: jako drut, którym element betonowy został ściśle owinięty [13], jak zostało to pokazane na rysunku 2a, lub tuba wykonana z kompozytu, do której został wlany beton (rys. 2b) [14].

a)

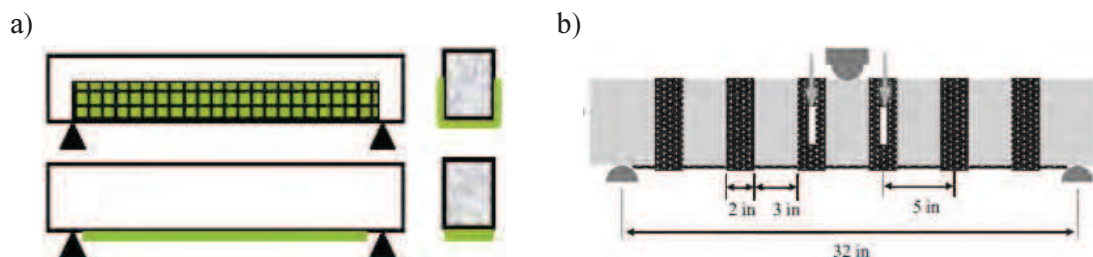


b)



Rys. 2. Próbkki betonowe wzmacniane: a) drutem kompozytowym [13],
b) tubą wykonaną z materiału FRP [14]

Pomimo faktu, iż od wielu lat prowadzone są badania nad elementami betonowymi zbrojonymi stalą, a wzmacnianymi tylko zewnętrznie kompozytami w formie taśm, nadal jest to popularny temat badań naukowych. Wzmocnienia te stosowane są w strefie rozciąganej, ale także w strefach ścinanych (rys. 3) [15, 16].



Rys. 3. Wzmocnienie elementów betonowych zewnętrznymi taśmami kompozytowymi w strefach: a) rozciąganych [15], b) ścinanych [16]

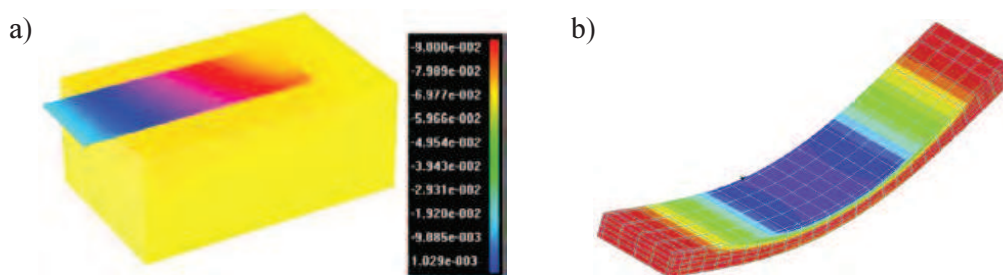
Dużą uwagę poświęca się zbrojeniu elementów betonowych prętami kompozytowymi jako zamiennikami tradycyjnych prętów stalowych. Jednymi z najbardziej popularnych zamienników są pręty bazaltowo-epoksydowe (BFRP), których pierwsze próby praktycznego wykorzystania zostały przeprowadzone także w Polsce. Ponieważ jedną z zalet prętów kompozytowych jest odporność na korozję chemiczną i biologiczną, szczególną uwagę zwraca się na pracę tego typu elementów np. w wodzie morskiej [17].

Ponieważ w większości przypadków zastosowania zbrojenia w formie biernej nośność prętów nie jest w pełni wykorzystana, dlatego bada się zachowanie prętów w przypadku wstępnego sprężania. Korzystny wpływ sprężania prętów stalowych i kompozytowych wykazano w pracy [18]. Nadmienić jednak należy, że większość wyników jest otrzymana w drodze analizy parametrycznej, na podstawie kilku badań laboratoryjnych. Sprężeniu mogą także podlegać zewnętrznie przymocowane taśmy kompozytowe [19].

2.2. Badania numeryczne

Dzięki rozwojowi programów obliczeniowych opartych na metodzie elementów skończonych (MES) można modelować elementy, których badania eksperymentalne byłyby bardzo drogie lub niewykonalne. Przy odpowiednim wprowadzeniu danych do programu, np. opartych na prostych i niedrogich badaniach laboratoryjnych, można otrzymać dużą dokładność otrzymywanych wyników obliczeń. Dzięki powyższemu można prowadzić analizę wielowariantową różnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Wyniki, które otrzymujemy z tego typu programów, pozwalają na wielopłaszczyznową analizę, gdyż możemy je przedstawiać w postaci: wizualizacji, wykresów, tabel.



Rys. 4. Przykładowe wizualizacje z programów MES: a) badanie przyczepności, b) badanie zginania

Jednak najbardziej czytelnym sposobem prezentacji wyników są wizualizacje, które pokazano na rysunku 4. Tematyka badań numerycznych jest bardzo podobna jak eksperymentalnych [20-23], a często oba te sposoby łączy się w celu wzajemnej weryfikacji.

Podsumowanie

Wzmacnianie konstrukcji betonowych kompozytami włóknistymi FRP jest już znane od wielu lat, lecz istnieje tylko niewielka liczba przepisów normowych, pozwalających na powszechne zastosowanie materiałów kompozytowych. Nadal pewne szczególne zagadnienia, takie jak zjawisko przyczepności materiałów kompozytowych do betonu, są mało zbadane, zatem potrzebne są dalsze badania. Doświadczenia jednak są prowadzone w wielu ośrodkach, więc dziedzina ta bardzo szybko się rozwija, szczególnie dzięki wykorzystaniu komputerowych metod obliczeniowych.

Literatura

- [1] Concrete Society, Strengthening concrete structures using fibre composite materials: acceptance, inspection and monitoring, TR57, Camberley, UK 2003.
- [2] ACI, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, 440.2R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills (MI) 2002.
- [3] Federation Internationale du Beton, fib Task Group 9.3. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. FIB, Lausanne 2001.
- [4] Hollaway L.C., A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, *Construction and Building Materials* 2010, 24, 2419-2445.
- [5] German J., *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*, Kraków 2001, wydanie internetowe.
- [6] Rajczyk M., Jończyk D., *Wzmacnianie konstrukcji budowlanych kompozytami włóknistymi*, [w:] *Zwiększenie efektywności procesów budowlanych i materiałowych*, red. nauk. J. Rajczyk, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2012, 140-153.
- [7] www.bow-ingenieure.de, [dostęp: 08.02.2016].
- [8] Peiris N.A., *Steel beams strengthened with ultra high modulus CFRP laminates*, Doctoral dissertations, Kentucky 2011.
- [9] Nowak T.P., Jankowski L., Jasieńko J., Application of photoelastic coating technique in tests of solid wooden beams reinforced with CFRP strips, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010, 10, 53-66.

- [10] Schwegler G., Seismic strengthening of unreinforced masonry buildings with carbon fibers, Publication of Federal Institute of Technology, Zurich 1995.
- [11] Ku H., Wang H., Pattarachaiyakooop N., Trada M., A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites, *Composites: Part B* 2011, 42, 856-873.
- [12] Strengthening of Reinforced Concrete Structures. Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering, eds. L.C. Holloway, M.B. Leeming, CRC Press, Boston 1999.
- [13] Eunsoo Choi, Jong-Su Jeon, Baik-Soon Cho, Kyoungsoo Park, External jacket of FRP wire for confining concrete and its advantages, *Engineering Structures* 2013, 56, 555-566.
- [14] Tianyu Xie, Togay Ozbakkaloglu, Behavior of recycled aggregate concrete-filled basalt and carbon FRP tubes, *Construction and Building Materials* 2016, 105, 132-143.
- [15] Attari N., Amziane S., Chemrouk M., Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets, *Construction and Building Materials* 2012, 37, 746-757.
- [16] Yazdanbakhsh A., Bank L. C., The effect of shear strength on load capacity of FRP strengthened beams with recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials* 2016, 102, 133-140.
- [17] Zhiqiang Dong, GangWu, Bo Xu, Xin Wang, Luc Taerwe, Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction, *Materials and Design* 2016, 92, 552-562.
- [18] Barros J.A.O., Taheri M., Salehian H., Mendes P.J.D., A design model for fibre reinforced concrete beams pre-stressed with steel and FRP bars, *Composite Structures* 2012, 94, 2494-2512.
- [19] Qi Cao, Jinju Tao, Zhongguo John Ma, Prestress loss in externally FRP reinforced self prestressing concrete beams, *Construction and Building Materials* 2015, 101, 667-674.
- [20] Xu T., He Z.J., Tang C.A., Zhu W.C., Ranjith P.G., Finite element analysis of width effect in interface debonding of FRP plate bonded to concrete, *Finite Elements in Analysis and Design* 2015, 93, 30-41.
- [21] Lo S.H., Kwan A.K.H., Ouyang Y., Ho J.C.M., Finite element analysis of axially loaded FRP-confined rectangular concrete columns, *Engineering Structures* 2015, 100, 253-263.
- [22] Xin Wang, Jianzhe Shi, Gang Wu, Long Yang, Zhishen Wu, Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique, *Engineering Structures* 2015, 101, 34-44.
- [23] Domenico D. De, Pisano A.A., Fuschi P., A FE-based limit analysis approach for concrete elements reinforced with FRP bars, *Composite Structures* 2014, 107, 594-603.

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu współczesnej tematyki badań dotyczących wzmacniania konstrukcji betonowych z wykorzystaniem kompozytów włóknistych. Jest to w ostatnich latach bardzo popularny temat badań naukowych, dzięki którym można osiągnąć zwiększenie nośności betonowych elementów budowlanych. W pracy zaprezentowano najnowsze osiągnięcia światowe w zakresie badań eksperymentalnych i numerycznych z wykorzystaniem materiałów FRP.

Słowa kluczowe: beton, kompozyty, FRP, MES

Strengthening of concrete structures with FRP composites

Abstract

The article presents an overview of contemporary research of strengthening concrete structures using fiber composites. In recent years it has been a very popular topic of research, thanks to which we can achieve an increase in capacity of concrete elements. The paper presents the latest world achievements in the field of experimental and numerical research using FRP materials.

Keywords: concrete, composites, FRP, FEM