

dr inż. Czesław Bywalski¹⁾
mgr inż. Michał Drzazga^{1*)}
prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński¹⁾

Zbrojenie GFRP w zginanych elementach betonowych

GFRP reinforcement in the bending concrete elements

DOI: 10.15199/33.2015.06.25

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwość stosowania prętów GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) jako zbrojenia głównego w zginanych elementach betonowych w obiektach wymagających odporności na korozję elektrolityczną lub obojętności elektromagnetycznej. Przeanalizowano dostępne zalecenia projektowe dotyczące zbrojenia GFRP. Dokonano analizy dotychczasowych badań zginanych elementów zbrojonych prętami GFRP oraz porównano te wyniki z przewidywaną nośnością teoretyczną.

Słowa kluczowe: zbrojenie GFRP, zginanie, normy projektowe, badania konstrukcji betonowych.

Abstract. This paper presents the possibility of using GFRP bars (Glass Fiber Reinforced Polymer) as the main reinforcement in bending concrete elements used in facilities where special corrosion resistance and non-electromagnetic environment is required. Paper contains also the analysis of current researches concerning bending concrete elements reinforced with GFRP bars. The research results were compared with predicted moment resistance.

Keywords: GFRP reinforcement, flexure, codes and standards, concrete research.

W środowisku agresywnym, w którym elementy żelbetowe nie spełniają stawianych im wymagań, coraz częściej wykorzystuje się zbrojenie polimerowe [1]. Charakteryzuje się ono dużą wytrzymałością na rozciąganie ($600 \div 3700$ MPa) i obojętnością elektromagnetyczną oraz odpornością na korozję. Pręty GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) wykorzystywane są jako zbrojenie główne elementów betonowych w obiektach, które wymagają obojętności elektromagnetycznej (m.in. dotyczy to obiektów przemysłu miedziowego i aluminiowego, np. wanny elektrolityczne czy fundamenty transformatorów). Ponadto zalety tego typu zbrojenia można wykorzystać w obiektach infrastruktury miejskiej oraz w budownictwie morskim. Duże możliwości wykorzystania prętów GFRP jako zbrojenia głównego sprawiły, że na świecie podjęto wiele badań i prób znormalizowania wymiarowania tego typu elementów. Pierwszy raz zastosowano je w latach 70. Od tego czasu nastąpił intensywny rozwój prac badawczych nad weryfikacją zbrojenia FRP w kontekście możliwości wykorzystania go w zginanych elementach betonowych.

Zalecenia projektowe dotyczące zbrojenia GFRP

Zalecenia dotyczące zbrojenia polimerowego stanowią głównie modyfikacje norm zagranicznych podejmujących tematykę

elementów żelbetowych, które w większości bazują na półprobabilistycznej metodzie stanów granicznych. Można wyróżnić następujące zbiory zaleceń projektowych dotyczących elementów betonowych zbrojonych prętami FRP:

- amerykański ACI 440.1R-06, 2006 [2];
- kanadyjski CSA-S806, 2002 [3], CHDIBC, 2006 [4] oraz instrukcja ISIS [5];
- japoński JSCE, 1997 [6];
- włoski CNR-DT 203/2006 [7].

Zagraniczne zalecenia projektowe [2 ÷ 7] uwzględniają odmienne właściwości mechaniczne zbrojenia polimerowego względem stali zbrojeniowej (mniejsza sztywność i większa wytrzymałość na rozciąganie prętów FRP oraz ich liniowo-sprężyste zachowanie w całym zakresie wytrzymałości). Ponadto bazują one na empirycznych równaniach wynikających z doświadczeń przeprowadzonych na próbkach prętów polimerowych oraz na elementach betonowych zbrojonych prętami FRP. Wytyczne zawarte w zaleceniach [2, 6, 7] dopuszczają oba mechanizmy zniszczenia przy zginaniu, tzn. zmiążdżenie betonu oraz zerwanie prętów FRP. Instrukcja ISIS [5] wydana w 2001 r. w oparciu o zalecenie zawarte w [4] dopuszcza zerwanie prętów FRP jako mechanizm zniszczenia zginanego elementu, zakładając współczynnik redukcyjny uwzględniający gwałtowność tego typu zniszczenia. Wytyczne [2, 5, 6, 7] jako preferowany mechanizm zniszczenia podają zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej, gdyż cechy plastyczne betonu umożliwiają sygnalizację osiągnięcia stanu granicznego nośności (mechanizm

zniszczenia elementu zginanego jest wówczas mniej gwałtowny). W przypadku prętów FRP nie obserwuje się zachowania plastycznego w granicznych warunkach odkształceń, dlatego ich zerwanie przebiega w sposób gwałtowny, bez jakichkolwiek ostrzeżeń. Stąd w przeciwieństwie do zaleceń projektowania elementów żelbetowych (np. wg [8]) każde zalecenie [2, 5, 6, 7] wprowadza konieczność ograniczenia odkształceń zbrojenia FRP w zginanym elemencie z betonu.

W celu porównania dostępnych zaleceń projektowych w kontekście wyznaczania nośności zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami GFRP dokonano analizy wyników badań 56 belek z 10 prac badawczych [9]. Dla każdej belki wyznaczono nośność zgodnie z procedurami zaleceń [2, 5, 6, 7]. Algorytmy wyznaczania nośności wg wymienionych zaleceń przedstawiono w pracy [10]. Z analiz wynika, iż pomijając wszelkie współczynniki redukcyjne (materiałowe czy związane z mechanizmem zniszczenia), w przypadku wszystkich belek otrzymano zbliżone rezultaty nośności na zginanie M_R . Wynika to z faktu, iż wszystkie zalecenia [2, 5, 6, 7] stanowią modyfikację norm do wymiarowania zginanych elementów żelbetowych zbrojonych prętami stalowymi przez wprowadzenie identycznych założeń dla zachowania się betonu, a modyfikację założeń dla prętów polimerowych [11]. Dostępne zalecenia podejmujące tematykę zbrojenia polimerowego zakładają:

■ maksymalne odkształcenia w betonie wynoszą $\varepsilon_{cu} = 3\text{‰}$ ([2]) i $\varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$ [5, 6, 7];

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: michal.drzazga@pwr.edu.pl

- prostoliniowy wykres odkształceń (hipoteza płaskich przekrojów);
- pominięcie wytrzymałości betonu w strefie rozciąganej;
- liniową zależność $\sigma - \varepsilon$ rozciąganych prętów FRP, aż do zniszczenia;
- występowanie przyczepności pomiędzy betonem i prętami FRP.

W tabeli przedstawiono rezultaty analiz porównawczych między nośnością wynikającą z prac doświadczalnych (M_{exp}) oraz wyznaczoną wg algorytmów dostępnych zaleceń projektowych (M_R). Nośność M_R określono bez uwzględnienia współczynników redukcyjnych oraz z ich uwzględnieniem. Do analiz przyjęto współczynniki materiałowe zgodnie z [2, 5, 6, 7] determinujące największą redukcję nośności. Określono wartość średniej arytmetycznej stosunku M_R/M_{exp} dla wszystkich analizowanych belek [9] oraz odchylenie standardowe. Ponadto w tabeli zawarto procentowy udział belek, których teoretyczny mechanizm zniszczenia zgadzał się z doświadczalnym, oraz procentowy udział belek, których nośność teoretyczna M_R była większa niż doświadczalna M_{exp} (czyli $M_{R,i}/M_{exp,i} > 1,0$).

W przypadku nieuwzględnienia współczynników redukcyjnych zaobserwowano znaczny poziom zmienności stosunku M_R/M_{exp} . Uwzględnienie współczynników redukcyjnych doprowadziło do zmniejszenia poziomu zmienności stosunku M_R/M_{exp} . Oznacza to, iż w przypadku uwzględnienia współczynników redukcyjnych wartości M_R/M_{exp} są bardziej skupione wokół wartości średniej, niż gdy tych współczynników nie uwzględnia się. Należy zauważyć, że przy uwzględnieniu współczynników redukcyjnych średnia arytmetyczna wartość M_R/M_{exp} znacznie maleje, co jest spowodowane dość konserwatywnym podejściem zaleceń [2, 5, 6, 7]. Ponadto oceniono, jaki udział wśród badanych belek stanowią te, których nośność teoretyczna M_R (wyznaczona bez uwzględnienia i z uwzględnieniem współczynników redukcyjnych) była większa niż M_{exp} . Nieuwzględnienie współczynników redukcyjnych prowadziło do przeszacowania nośności odpowiednio w 27, 25, 23 i 36% badanych belek. Przy wyznaczaniu nośności z uwzględnieniem współczynników redukcyjnych zaobserwowano, że żadna procedura (dla każdej z belek) nie doprowadziła do wyznaczenia nośności M_R większej od wartości uzyskanej w badaniu doświadczalnym M_{exp} . Oznacza to, że wszystkie algorytmy dotyczące zginanych elementów betono-

Wyniki analiz porównawczych nośności momentowych (M_R) wyznaczonych zgodnie z [10] z wartościami nośności eksperymentalnych (M_{exp})
Results of comparative analyses between predicted moment capacities (M_R) according to [10] and experimental moment capacities (M_{exp})

Zalecenie projektowe	Średnia arytmetyczna M_R/M_{exp} [%]		Odchylenie standardowe M_R/M_{exp} [%]		Zgodność mechanizmu zniszczenia [%]		Procentowy udział belek z przeszacowaną nośnością [%]	
	bez wsp.	ze wsp.	bez wsp.	ze wsp.	bez wsp.	ze wsp.	bez wsp.	ze wsp.
JSCE [6]	89,02	58,91	18,76	12,39	73,2	69,6	23,2	0,0
ISIS [5]	89,23	56,14	19,07	12,07	73,2	67,9	25,0	0,0
ACI [2]	89,64	42,97	19,48	10,86	71,4	57,1	26,8	0,0
CNR [7]	94,46	51,56	19,53	16,47	69,6	44,6	35,7	0,0

wych zbrojonych prętami GFRP podane w zaleceniach [2, 5, 6, 7] zapewniają pewien poziom bezpieczeństwa przez stosowanie współczynników redukcyjnych. Należy zauważyć, że nośność M_{exp} podaną w tabeli uzyskano w przypadku doraźnego obciążenia belek. Taki sposób obciążenia uniemożliwia uwzględnienie długotrwałych procesów zachodzących w betonie i prętach GFRP oraz oddziaływania agresywnego środowiska. Stąd w przypadku uwzględniania współczynników redukcyjnych w analizach uzyskano stosunkowo małą wartość zgodności zarówno nośności M_R , jak i mechanizmów zniszczenia. Analizując wartość średnią stosunku M_R/M_{exp} zaobserwowano, iż zalecenie amerykańskie [2] charakteryzuje się najbardziej konserwatywnym (asekuracyjnym) podejściem przy najmniejszej wartości odchylenia standardowego. Natomiast największą nośność na zginanie (przy uwzględnieniu współczynników redukcyjnych) uzyskano z uwzględnieniem zaleceń japońskich [6].

Wnioski

Zalecenia [2, 5, 6, 7] wprowadzają znaczną redukcję wytrzymałości prętów GFRP w zginanych elementach betonowych ze względu na wpływ środowiska oraz nośność długotrwałą wynikającą z właściwości zbrojenia polimerowego [1]. Z analizy nośności kilkudziesięciu belek ze zbrojeniem GFRP wynika, że największą zgodność nośności M_R z nośnością doświadczalną M_{exp} otrzyma się, postępując zgodnie z procedurą podaną w japońskim zaleceniu [6] (przy uwzględnianiu współczynników redukcyjnych). Największą zgodność mechanizmów zniszczenia przy nieuwzględnianiu współczynników redukcyjnych (73,2%) zaobserwowano w przypadku algorytmów podanych w [5, 6], z kolei przy uwzględnianiu współczynników redukcyjnych największą zgodność mechanizmu zniszczenia (69,6%) uzyskano wg procedury podanej w [6]. W przypadku zalecenia [7] zgodność mechanizmu

zniszczenia wynosiła 44,6% w porównaniu z doświadczalnym, co wynika z dużych współczynników redukcyjnych dotyczących zbrojenia GFRP. Stąd najczęstszym przewidywanym mechanizmem zniszczenia było zerwanie prętów GFRP [9]. Duża zmienność wyników zarówno w przypadku obliczeń uwzględniających, jak i nieuwzględniających współczynników redukcyjnych sugeruje, iż procedury zaleceń [2, 5, 6, 7] w zakresie wymiarowania zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami GFRP wymagają dalszych badań i analiz.

Literatura

- [1] Szumigala M., Pawłowski D.: Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych. Przegląd Budowlany 3/2014.
- [2] ACI 440.1R-06 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars.
- [3] CSA-S806-02 (2002) Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers.
- [4] CAN/CSA (2006) Canadian Highway Bridge Design Code.
- [5] ISIS (2007) Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. Design Manual.
- [6] JSCE (1997) Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials.
- [7] CNR-DT 203/2006 Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars.
- [8] PN-EN 1992-1-1: 2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [9] Bywański Cz., Drzazga M., Kamiński M., Kaźmierowski M.: Porównanie metod obliczania zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami FRP. Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego. Maszynopis.
- [10] Drzazga M., Kamiński M.: Pręty zbrojenio-we FRP jako główne zbrojenie zginanych elementów betonowych – przegląd zaleceń i efektywność projektowania. Przegląd Budowlany 3/2015.
- [11] Bywański Cz., Drzazga M., Kamiński M.: Obliczanie zginanych elementów zbrojonych prętami FRP. Materiały Budowlane 6/2014.

Otrzymano 29.04.2015 r.