

dr inż. Julita Krassowska^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9209-1285

mgr inż. Jan Klimasara¹⁾

ORCID: 0000-0001-7366-4957

Algorithm for determining the bending capacity of concrete beams reinforced with BFRP bars according to ACI 440.1R-15 and fib Model Code 2010

Algorytm określania nośności na zginanie belek betonowych zbrojonych prętami BFRP zgodnie z ACI 440.1R-15 oraz fib Model Code 2010

DOI: 10.15199/33.2024.11.04

Abstract. The article analyzes the available design recommendations for FRP reinforcement in relation to the standard ACI 440.1R-15 and fib Model Code 2010. Own tests on flexural capacity of concrete reinforced elements with BFRP bars were analyzed and the results were compared with the predicted theoretical load capacity.

Keywords: BFRP; bending capacity; calculation procedures.

Streszczenie. W artykule przeanalizowano dostępne zalecenia projektowe dotyczące zbrojenia FRP w świetle norm ACI 440.1R-15 oraz fib Model Code 2010. Dokonano analizy badań własnych zginanych elementów zbrojonych prętami BFRP, a wyniki porównano z przewidywaną nośnością teoretyczną.

Słowa kluczowe: BFRP; nośność na zginanie; procedury obliczeniowe.

Composite rods (Fiber Reinforced Polymer – FRP) used as concrete reinforcement have been available on the international market for the past 20 years. The types of composite rods include those made from glass fibers (GFRP), carbon fibers (CFRP), aramid fibers (AFRP), and basalt fibers (BFRP) [1]. FRP rods offer an alternative to traditional steel reinforcement in reinforced concrete elements exposed to monotonic and cyclic loading, or when corrosion resistance or electromagnetic neutrality is required [2]. However, due to their brittleness and limited bond with concrete, they have not been widely used in construction. The lack of Polish guidelines for designing FRP-reinforced elements, as well as appropriate software that accounts for the differences between the design of concrete structures with metallic and FRP reinforcement, limits their use in construction. Polish guidelines may be based on international standards, which are based on modified recommendations for reinforced concrete structures under serviceability limit state (SLS) and ultimate limit state (ULS). The key difference between the approaches to ULS and SLS analysis is the consideration of the linear-elastic behavior of composite materials, through the introduction of appropriate reduction factors [3].

However, the problem with the current standards is that they are based on incomplete studies. Most of the research on non-metallic reinforcement in the form of longitudinal bars has been conducted on beams in semi-technical scale with glass (GFRP)

Pręty kompozytowe (Fiber Reinforced Polymer – FRP) stosowane jako zbrojenie betonu są dostępne na rynku międzynarodowym od 20 lat. Wyróżnia się pręty kompozytowe z włókien szklanych (GFRP), węglowych (CFRP), aramidowych (AFRP) oraz bazaltowych (BFRP) [1]. Pręty FRP stanowią alternatywę dla tradycyjnych prętów stalowych w elementach żelbetowych poddanych obciążeniom monotonicznym i cyklicznym oraz gdy wymagana jest odporność na korozję lub obojętność elektromagnetyczna [2]. W związku z tym, że są kruche i wykazują ograniczoną przyczepność do betonu, dotychczas nie były szeroko stosowane w budownictwie.

Brak polskich wytycznych dotyczących projektowania elementów ze zbrojeniem FRP oraz odpowiedniego oprogramowania, które uwzględni różnice pomiędzy projektowaniem konstrukcji betonowych ze zbrojeniem metalicznym i zbrojeniem FRP, ogranicza jego zastosowanie w budownictwie. Polskie wytyczne można byłoby wzorować na normach zagranicznych, które bazują na zmodyfikowanych zaleceniach dotyczących konstrukcji żelbetowych w stanie granicznym nośności SGN i użytkowalności SGU. Zasadniczą różnicą w podejściu do analizy SGN i SGU jest uwzględnienie sprężysto-liniowej charakterystyki wytrzymałościowej materiałów kompozytowych, przez wprowadzenie odpowiednich współczynników redukcji [3].

Problem z obecnymi normami polega jednak na tym, że są one oparte na niekompletnych badaniach. Większość badań dotyczy zbrojenia niemetalicznego w postaci prętów podłużnych prowadzona jest na belkach w skali półtechnicznej ze zbroje-

¹⁾ Białystok University of Technology

^{*} Correspondence address: j.krassowska@pb.edu.pl

reinforcement. There is a shortage of sufficient studies on full-scale beams with basalt-based (BFRP) reinforcement. To fill this gap, research was conducted at the Białystok University of Technology aimed at determining the bending capacity of full-scale beams reinforced with FRP bars and basalt stirrups.

The article presents the methods for designing elements reinforced with composite rods in light of the ACI 440.1R-15 standard [4] and the Fib Bulletin Model Code 2010 [5], and compares the bending capacity of beams reinforced with BFRP according to both standards, checking which recommendation is closest to the real bending capacity. The article also outlines the differences in the design approach of each of the standards.

Mechanics of FRP-Reinforced Cross-Section Behavior

Most standards for designing FRP-reinforced concrete are based on modified guidelines for reinforced concrete structures. In the analysis of a concrete cross-section with steel reinforcement, two basic assumptions are considered. First, it is assumed that plane sections remain plane at every stage of loading, and second, that there is perfect bonding between the concrete and the reinforcement, ensuring compatibility of deformations along the cross-section. The validity of these assumptions for concrete cross-sections with FRP reinforcement was confirmed by Duránovic et al. [6]. As a result, traditional techniques for calculating bending capacity cannot be applied to FRP bars with the appropriate characteristics.

The common methods for designing structures with steel reinforcement allow for determining the optimal reinforcement, at which the cross-section undergoes failure in the compression zone due to concrete crushing, and in the tension zone due to the plastic deformation of the reinforcement. If the reinforcement is less than optimal, meaning the concrete is "under-reinforced," the reinforcement yields before the concrete reaches ultimate strain in the extreme tensile fibers of the concrete. As the load increases, the concrete's compressive strength is exhausted, and the concrete in the extreme fibers is crushed. This type of loss of capacity is referred to as failure due to tension, because the failure of the beam is initiated by the yielding of steel (failure due to tension is a gradual failure).

In the case where the beam cross-section is "over-reinforced", meaning there is too much reinforcement, the concrete reaches its maximum deformation before the reinforcement yields. In such a situation, the beam cracks in the compression zone, leading to a sudden, brittle failure. This means that the plasticity of the steel reinforcement, i.e., its ability to deform without local cracking, is not utilized. Over-reinforcement reduces the effectiveness of reinforcement in bending, as the element becomes excessively stiff. In the optimally designed cross-section, both the tensile capacity of the reinforcement and the compressive capacity of the concrete are fully utilized. For safety reasons, beams are usually designed to be "under-reinforced", which allows the reinforcement to yield (deform) before the concrete begins to crush. This ensures that in a well-designed cross-section, the tensile capacity of the reinforcement is fully exploited when the beam is "under-reinforced".

niem szklanym GFRP. Brakuje wystarczającej liczby badań belek w skali naturalnej zbrojonych podłużnie i poprzecznie zbrojeniem bazaltowym BFRP. Aby wypełnić tę lukę, na Politechnice Białostockiej przeprowadzono badania w celu określenia nośności na zginanie belek w skali naturalnej ze zbrojeniem FRP w postaci prętów i strzemion bazaltowych.

W artykule przedstawiono metody projektowania elementów zbrojonych prętami kompozytowymi w świetle norm ACI 440.1R-15 [4] oraz fib Bulletin Model Code 2010 [5] i obliczono nośność na zginanie belek ze zbrojeniem BFRP wg każdej z tych norm, sprawdzając, które zalecenie jest najbliższe rzeczywistej nośności na zginanie. W artykule można znaleźć różnice w podejściu projektowym każdej z norm.

Mechanika pracy przekroju zbrojonego FRP

Większość norm dotyczących projektowania betonu zbrojonego FRP bazuje na zmodyfikowanych wytycznych konstrukcji żelbetowych. W analizie przekroju betonowego ze zbrojeniem stalowym uwzględnia się dwa podstawowe założenia. Po pierwsze zakłada się, że płaskie sekcje pozostają płaskie na każdym etapie obciążenia, a po drugie – że istnieje doskonałe połączenie między betonem a zbrojeniem, zapewniające zgodność odkształceń wzdłuż przekroju. Zasadność przyjęcia tych założeń w przypadku przekrojów betonowych ze zbrojeniem FRP zweryfikował Duranovic i in. [6]. W efekcie, tradycyjne techniki obliczania nośności na zginanie mogą być użyte przy odpowiedniej charakterystyce prętów FRP.

Klasyczne metody projektowania konstrukcji ze zbrojeniem stalowym pozwalają na określenie optymalnego zbrojenia, przy którym przekrój ulega zniszczeniu w strefie ściskanej przez zmiążdżenie betonu, a w strefie rozciąganej przez uplastycznienie zbrojenia. Jeśli zbrojenie jest mniejsze niż optymalne, czyli beton jest „niedozbrojony”, zbrojenie uplastycznia się przed osiągnięciem odkształceń granicznych w skrajnych włóknach betonu ściskanego. Przy dalszym wzroście obciążenia wytrzymałość betonu na ściskanie wyczerpuje się, a beton ściskany zostaje zmiążdżony w skrajnych włóknach. Taki sposób utraty nośności jest określany jako zniszczenie przy rozciąganiu, ponieważ zniszczenie belki jest inicjowane przez uplastycznienie stali (zniszczenie belki przy rozciąganiu jest zniszczeniem plastycznym (zniszczenie jest stopniowe)).

W przypadku, gdy przekrój belki jest „przebrojony”, czyli ma zbyt dużo zbrojenia, beton ściskany osiąga odkształcenia maksymalne, zanim zbrojenie się uplastyczni. W takiej sytuacji belka pęka w obszarze betonu ściskanego, co prowadzi do nagłego, kruchej zniszczenia. Oznacza to, że nie wykorzystuje się plastyczności zbrojenia stalowego, czyli jego zdolności do odkształceń bez natychmiastowego pęknięcia. Przebrojenie zmniejsza skuteczność zbrojenia na zginanie, ponieważ element żelbetowy staje się zbyt sztywny. W optymalnie zaprojektowanym przekroju, zarówno wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie, jak i betonu na ściskanie, są w pełni wykorzystane. Ze względów bezpieczeństwa zwykle projektuje się belki żelbetowe jako „niedozbrojone”, co pozwala zbrojeniu ulec uplastycznieniu (odkształceniu), zanim beton zacznie się kruszyć. Oznacza to, że w dobrze zaprojektowanym przekroju,

However, the abovementioned design assumptions cannot be directly applied to the design of beams with FRP reinforcement, because, unlike steel reinforcement, composite bar reinforcement does not exhibit a plastic deformation phase under tension (see Figure 1). The stress-strain relationship during axial tension in FRP reinforcement bars is linearly elastic until failure. Due to the lack of plasticity in the reinforcement, when designing FRP-strengthened beams, the optimal degree of plasticity in the bending cross-section is sought. This occurs at the moment of crushing in the compressive zone of the concrete, which is considered less brittle than the failure of the FRP bars [13].

When analyzing the example from the ACI 440.1R-15 standard, three fundamental states of a structure with BFRP reinforcement are distinguished (Figures 2 ÷ 4), where: ρ_f – the calculated reinforcement ratio working in bending; ρ_{fb} – the limiting reinforcement ratio working in bending.

These states are as follows:

- optimally reinforced cross-section: $\rho_f = \rho_{fb}$;
- over-reinforced cross-section $\rho_f > \rho_{fb}$ – failure due to concrete crushing;
- under-reinforced cross-section: $\rho_f < \rho_{fb}$ – failure due to the rupture of the reinforcement bars.

When designing bending structures reinforced with FRP bars, it is recommended to apply appropriate reduction factors for strength or those that account for environmental effects. However, mere consideration of these factors is not sufficient for the safe design of bending strength, as it does not ensure the adequate safety of the structure nor does it reflect the true behavior of the system. Such an analysis of FRP-reinforced structures is incomplete because it changes the philosophy of their design, according to which [4]:

- concrete crushing is the most typical failure mechanism during bending, while the rupture of FRP reinforcement is a very rare occurrence;

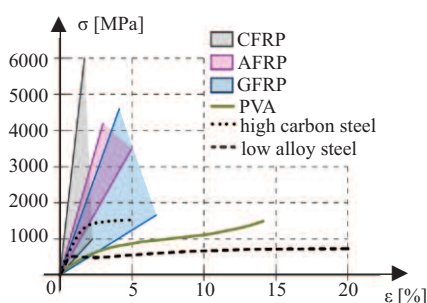


Fig. 1. The stress-strain relationship for FRP and steel bars [8]

Rys. 1. Zależność naprężenie-odkształcenie w przypadku prętów FRP oraz stali [8]

wytrzymałość zbrojenia jest w pełni wykorzystywana, gdy belka jest „niedożbrojona”. Tych założeń projektowych nie można jednak zastosować przy projektowaniu belek ze zbrojeniem FRP, ponieważ w odróżnieniu od zbrojenia stalowego, w przypadku zbrojenia prętami kompozytowymi nie występuje faza plastyczna odkształceń przy rozciąganiu (rysunek 1). Zależność naprężenie – odkształcenie podczas osiowego rozciągania w prętach zbrojeniowych FRP jest liniowo sprężysta aż do zniszczenia. Ze względu na brak uplastycznienia w zbrojeniu, przy projektowaniu belek wzmacnianych FRP szuka się optymalnego stopnia plastyczności przekroju zginanego. Następuje to w momencie zmiężdżenia strefy ściskanej betonu, co uważane jest za mniej kruche niż zerwanie prętów FRP [7].

Analizując przykład z normy ACI 440.1R-15, wyróżnia się 3 podstawowe stany pracy konstrukcji ze zbrojeniem FRP (rysunki 2 ÷ 4), gdzie: ρ_f – obliczony stopień zbrojenia pracującego na zginanie; ρ_{fb} – graniczny stopień zbrojenia pracującego na zginanie:

- przekrój o optymalnym stopniu zbrojenia $\rho_f = \rho_{fb}$;
- przekrój przezbójony $\rho_f > \rho_{fb}$ – zniszczenie przez zmiężdżenie betonu;
- przekrój niedożbrojony $\rho_f < \rho_{fb}$ – zniszczenie przez zerwanie prętów.

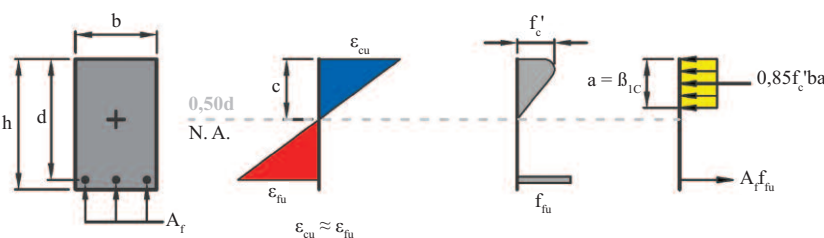


Fig. 2. Mechanics of the optimal cross-section behavior

Rys. 2. Mechanika pracy przekroju optymalnego

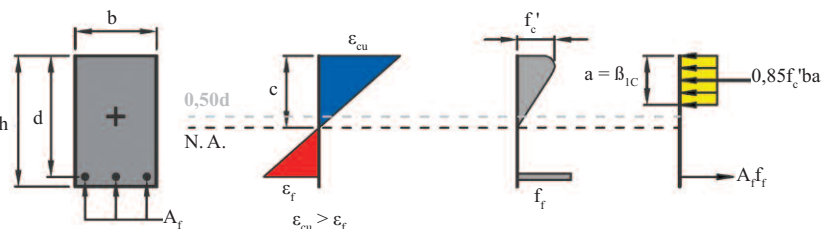


Fig. 3. Mechanics of the over-reinforced cross-section behavior

Rys. 3. Mechanika pracy przekroju przezbójonego

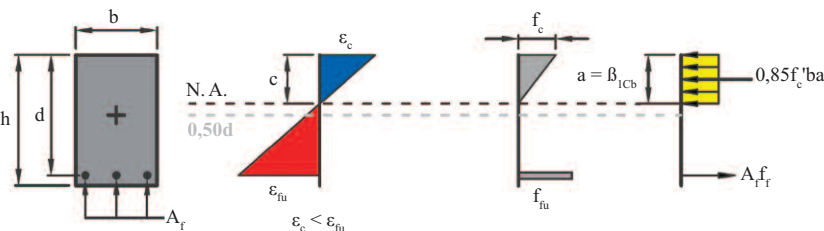


Fig. 4. Mechanics of the under-reinforced cross-section behavior

Rys. 4. Mechanika pracy przekroju niedożbrojonego

Przy projektowaniu konstrukcji na zginanie zbrojonych prętami FRP zaleca się stosować odpowiednie współczynniki redukcji wytrzymałości lub uwzględniające oddziaływanie środowiska. Samo uwzględnienie współczynników nie jest jednak wystarczające do bezpiecznego projektowania nośności na zginanie, ponieważ nie zapewnia należytego bezpieczeństwa konstrukcji i nie oddaje charakteru jej pracy. Taka analiza konstrukcji zbrojonych kompozytami FRP jest konieczna, gdyż zmienia filozofię ich projektowania, zgodnie z którą [4]:

- the use of conventional safety factors (so-called material factors) in bending elements may prove ineffective in calculating the failure of an element due to the loss of capacity in the compression zone of the concrete;

- the strength of a structure with non-metallic reinforcement depends on the ratio of static to variable loads, the concrete's compressive strength, and the ratio of longitudinal reinforcement.

The article presents recommendations from the standards regarding the design of elements with FRP reinforcement and algorithms for their design.

American standard ACI 440.1R-15

The most commonly used method for calculating structures with non-metallic reinforcement is based on [4]. It utilizes the conventional methods of deformation compatibility, where the bond between FRP bars and concrete is assumed to be perfect, and methods of equilibrium for analyzed concrete cross-sections with FRP reinforcement. The analysis of the boundary moment of strength involves considering the linear-elastic behavior of the FRP bars. Figure 5 presents the algorithm for determining the cross-section according to [4]. To calculate the actual tensile strength of the reinforcement, it is necessary to multiply the tensile strength of the fibers, as provided by the manufacturer, by the environmental reduction factor, C_E . This factor allows for considering the impact of long-term loads and the effect of atmospheric conditions on the strength of the bars. The C_E factor depends on the type of fiber and the environment (Table 1). The reduction factor for basalt BFRP bars has not yet been determined.

The equilibrium condition for bending strength is defined by the formula no. 1:

$$\begin{aligned} \Phi \cdot M_n &\geq M_u \\ \Phi \cdot M_{Rd} &\geq M_{Ed} \end{aligned} \quad (1)$$

where:

M_n, M_{Rd} – bending capacity of the cross-section;

M_u, M_{Ed} – maximum bending moment from external loads;

Φ – reduction factor.

The use of the reduction factor Φ results from the lack of plastic deformation in FRP reinforcement. Its value is determined according to the formula provided in the algorithm (Figure 5). The reduction factor is typically assumed to be between $\Phi = 0.65$ to 0.55 , in order to account for the uncertainty associated with the varying degree of reinforcement. Figure 6 shows the relationship between the reduction factor Φ and the degree of reinforcement ρ_f for the analyzed element.

European Standard fib Model Code 2010

Under the computational approach of composite reinforcement bars according to the fib Model Code 2010 [5], the principle of force equilibrium and compatibility of deformations between the concrete and composite reinforcement is applied. This approach takes into account the specific material properties of composite reinforcement bars, such as lower modulus of elasticity compared to steel and

- zmiążdżenie betonu to najbardziej typowy mechanizm zniszczenia podczas zginania, a zerwanie zbrojenia FRP to bardzo rzadki przypadek;

- zastosowanie częściowych współczynników bezpieczeństwa (tzw. materiałowych) w elementach zginanych może okazać się nieskuteczne w obliczu zniszczenia elementu przez utratę nośności ściskanej strefy betonu;

- nośność konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym zależy od stosunku obciążeń stałych do zmiennych, wytrzymałości betonu na ściskanie i stopnia zbrojenia podłużnego.

W artykule przedstawiono zalecenia norm dotyczących projektowania elementów ze zbrojeniem FRP oraz algorytmy ich projektowania.

Amerykańska norma ACI 440.1R-15

Najczęściej stosowaną procedurą obliczania konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym zawarto w [4]. Wykorzystuje ona konwencjonalne metody zgodności odkształceń, gdzie zakłada się doskonałą przyczepność pomiędzy prętami FRP i betonem, oraz metody równowagi analizowanych przekrojów betonu z FRP. Analiza granicznego momentu nośności polega na uwzględnieniu liniowo-sprężystego zachowania prętów FRP. Rysunek 5 przedstawia algorytm wymiarowania przekroju zgodnie z [4]. Aby obliczyć realną wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie, należy gwarantowaną przez producenta wytrzymałość na rozciąganie włókien przemnożyć przez współczynnik redukcji środowiskowej C_E . Pozwala on uwzględnić wpływ obciążeń długotrwałych i oddziaływania środowiska atmosferycznego na wytrzymałość prętów. Współczynnik C_E zależy od rodzaju włókien i środowiska (tabela 1). Dotychczas nie określono go w przypadku prętów bazaltowych BFRP.

Warunek równowagi nośności na zginanie określa wzór:

$$\begin{aligned} \Phi \cdot M_n &\geq M_u \\ \Phi \cdot M_{Rd} &\geq M_{Ed} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

M_n, M_{Rd} – nośność przekroju na zginanie;

M_u, M_{Ed} – maksymalny moment od obciążeń zewnętrznych;

Φ – współczynnik redukcji nośności.

Zastosowanie współczynnika redukcji nośności Φ jest spowodowane brakiem odkształceń plastycznych zbrojenia FRP. Jego wartość określa się zgodnie ze wzorem podanym w algorytmie (rysunek 5). Przyjmuje się współczynnik $\Phi = 0,65 \div 0,55$, aby uwzględnić nieokreśloność związaną ze zróżnicowanym stopniem zbrojenia. Rysunek 6 przedstawia zależność współczynnika redukcji Φ od stopnia zbrojenia ρ_f analizowanego elementu.

Europejska norma fib Model Code 2010

Podstawą podejścia obliczeniowego prętów kompozytowych wg fib Model Code 2010 [5] jest zasada równowagi sił i zgodności odkształceń między betonem a zbrojeniem kompozytowym. Podejście to uwzględnia specyficzne właściwości materiałowe prętów kompozytowych, takie jak mniejszy moduł sprężystości w porównaniu ze stałą oraz ich podatność na zwię-

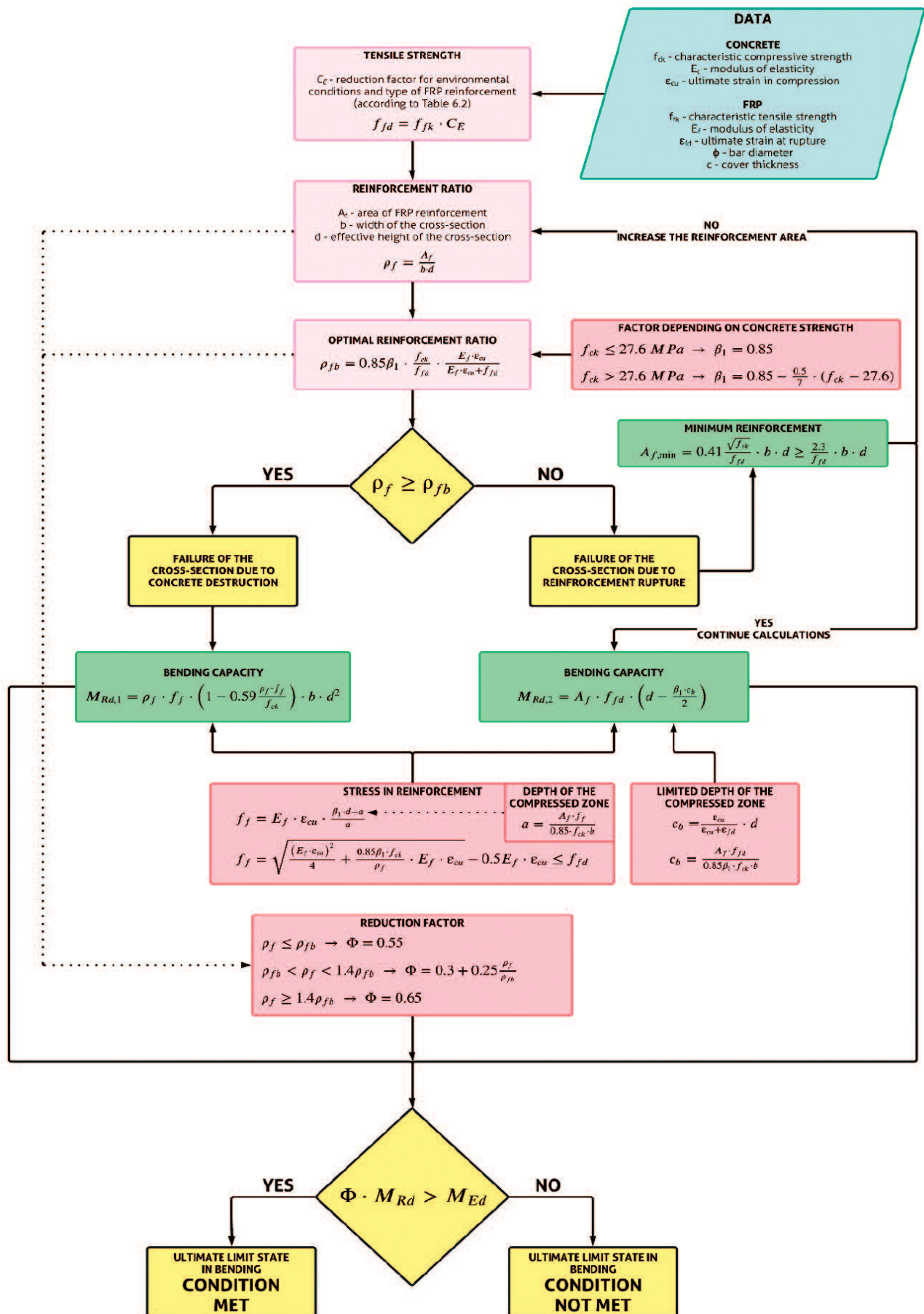


Fig. 5. Algorithm for flexural reinforcement design according to ACI [4]

Rys. 5. Algorytm wymiarowania zbrojenia na zginanie wg ACI [4]

their susceptibility to increased deformation under loads close to the ultimate strength.

According to [5], the parameters describing composite reinforcement FRP bars are: f_f – tensile strength; ϵ_{fk} – percentage of total elongation at the stress f_{fk} ; ϵ_{fuk} – percentage of maximum elongation at the rupture stress of the bar f_{fuk} . Table 2 presents various values of strength and stiffness of FRP bars. Taking into account the limited modulus of elasticity under compression and the risk of micro-cracking or fiber breakage in the area of material anchorage, non-metallic reinforcement is generally not suitable for transferring large compressive stresses. It has excellent chemical resistance and is insensitive to aggressive factors. The material coefficient values γ_f for non-metallic reinforcement are given in Table 3. For design purposes, the idealized stress-strain diagram should be applied as shown in Figure 7.

Similarly to the ACI standard [4], two mechanisms of structural failure are assumed:

- over-reinforced section $\rho_f > \rho_{fb}$ – failure due to concrete crushing;
- under-reinforced section $\rho_f < \rho_{fb}$ – failure due to bar rupture.

The method for determining bending capacity assumes that the tensile strength of FRP bars is ignored. The mechanism of action for an under-reinforced section Figure 8. The algorithm in Figure 9 shows the differences compared to the ACI standard [4] (e.g., in the formula defining the value of the reinforcement ratio).

Theoretical and Actual Load Capacity from Full-Scale Beam Testing

In order to verify which of the analyzed standards can be considered more suitable for the design of concrete structures reinforced with BFRP, concrete beams with a cross-section of 120 x 300 mm and a length of 4500 mm, with different types

Table 1. Environmental reduction factor for different fibers
Tabela 1. Współczynnik redukcji środowiskowej różnych włókien [4]

Exposure condition/ Warunki ekspozycji	Fiber type/ Rodzaj włókna	Environmental reduction factor C_E / Współczynnik redukcji środowiskowej C_E
Concrete not exposed to earth and weather/Beton nienażony na działanie gruntu i warunki atmosferyczne	carbon/węglowe	1
	glass/szklane	0,8
	aramid/aramidowe	0,9
Concrete exposed to earth and weather/Beton narażony na działanie gruntu i warunki atmosferyczne	carbon/węglowe	0,9
	glass/szklane	0,7
	aramid/aramidowe	0,8

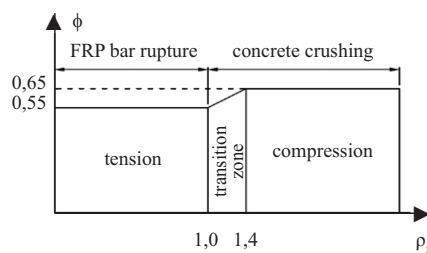


Fig. 6. The dependence of the reduction factor Φ as a function of the reinforcement ratio ρ_f
Rys. 6. Zależność współczynnika Φ w funkcji stopnia zbrojenia ρ_f

Table 2. Properties of FRP bars
Tabela 2. Właściwości prętów FRP

Properties/Parametr	Rod/pręta		
	CFRP	GFRP	AFRP
Tensile strength f_f [MPa]/ Wytrzymałość na rozciąganie f_f [MPa]	600 – 3000	400 – 1600	600 – 2500
Modulus of elasticity E_f [GPa]/ Moduł sprężystości E_f [GPa]	80 – 500	30 – 60	30 – 125
Ultimate strain ϵ_{fu} [%]/ Odształcenie ϵ_{fu} [%]	0,5 – 1,8	1,2 – 3,7	1,8 – 4,0

Table 3. Value of the material factor for non-metallic reinforcement γ_f
Tabela 3. Wartość współczynnika materiałowego zbrojenia niemetalicznego γ_f

Basic variable/ Zmienna podstawowa	Design situation/Sytuacja projektowa	
	persistent/transient/ trwała/przejściowa	accidental/ wyjątkowa
Non-metallic reinforcement Tensile strength (f_{fk}), γ_f / Wytrzymałość na rozciąganie (f_{fk}), γ_f	1,25	1

optimal

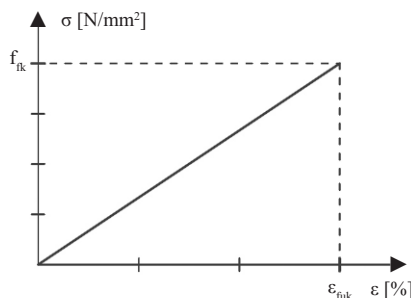


Fig. 7. Idealized stress-strain relationship of FRB reinforcement
Rys. 7. Wyidealizowana zależność naprężenie-odkształcenie zbrojenia FRP

szone odształcenia przy obciążeniach zbliżonych do wytrzymałości granicznej.

Zgodnie z [5] parametrami opisującymi pręty kompozytowe FRP są: f_f – wytrzymałość na rozciąganie; ϵ_{fk} – procentowe całkowite wydłużenie przy naprężeniu f_{fk} ; ϵ_{fuk} – procentowe maksymalne wydłużenie przy naprężeniu zrywającym pręt f_{fuk} . Tabela 2 przedstawia różne

wartości wytrzymałości i sztywności prętów FRP. Biorąc pod uwagę ograniczony moduł sprężystości przy ściskaniu i ryzyko mikrowyboczeń lub załamań włókna w obrębie utwierdzenia materiału osnowy, niemetaliczne zbrojenie na ogół nie jest stosowane do przenoszenia dużych naprężeń ściskających. Ma ono doskonałą odporność chemiczną i jest niewrażliwe na czynniki agresywne. Wartości współczynnika materiałowego γ_f zbrojenia niemetalicznego podano w tabeli 3. Do celów projektowych należy zastosować wyidealizowany wykres naprężenie-odkształcenie przedstawiony na rysunku 7.

Podobnie jak w przypadku normy ACI [4] zakłada się dwa mechanizmy zniszczenia konstrukcji:

- przekrój przezbrojony $\rho_f > \rho_{fb}$ – zniszczenie przez zmiążdżenie betonu;
- przekrój niedozbrojony $\rho_f < \rho_{fb}$ – zniszczenie przez zerwanie prętów.

Metoda wyznaczania nośności na zginanie bazuje na założeniu, że ignorowana jest wytrzymałość na ściskanie prętów FRP. Przykład mechaniki pracy przekroju niedozbrojonego przedstawia rysunek 8. W algorytmie na rysunku 9 pokazano różnice w porównaniu z normą ACI [4] (np. we wzorze określającym wartość optymalnego stopnia zbrojenia).

Wartość optymalnego stopnia zbrojenia

Nośność teoretyczna a rzeczywista z badań belek w skali naturalnej

W celu weryfikacji, którą z analizowanych norm można uznać za bardziej przydatną w projektowaniu konstrukcji betonowych zbrojonych BFRP, analizowano

of longitudinal and transverse reinforcement, were analyzed. The tests are described in [9].

For the production of the test elements, concrete with a water-cement ratio of 0.5, using Portland cement

CEM I 42.5R in the amount of 320 kg/m^3 , with a compressive strength $f_{cm} = 43.78 \text{ MPa}$, bending tensile strength $f_{ctm} = 5.5 \text{ MPa}$, and a modulus of elasticity $E_{cm} = 40.46 \text{ GPa}$ was used. The reinforcement of the samples consisted of ribbed bars with diameters of 6 and 16 mm, made of BSt500s steel with yield strength $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$. Alternatively, BFRP composite bars with basalt fibers of the same diameter were used. The mechanical properties of the 6 mm diameter bars were as follows: guaranteed tensile strength $f_{u,ave} = 1180 \text{ MPa}$, guaranteed modulus of elasticity $E_f = 47.6 \text{ GPa}$, and guaranteed strain at rupture $e_{fu}^* = 2.0\%$.

Two series of beams were designed. In series A, the longitudinal reinforcement was steel bars (RC), while in series B, basalt bars (BFRC) were used. In both series, in the compressed zone, 2 $\varnothing 12 \text{ mm}$ bars were used, while in the tensile zone, in series A – 4 $\varnothing 16 \text{ mm}$ steel bars, and in series B – 4 $\varnothing 16 \text{ mm}$ basalt bars were used. The transverse reinforcement was designed in the form of stirrups spaced 200 mm apart. In series A, it consisted of $\varnothing 6 \text{ mm}$ steel bars, while in series B – $\varnothing 6 \text{ mm}$ BFRP bars were used.

The beam loading diagram is shown in Figure 10. The simply supported beams were loaded in a four-point bending system with a span length of $l_{eff} = 4200 \text{ mm}$. They were subjected to failure due to bending (photograph). The failure model of all beams occurred progressively. In the initial stages, vertical cracks appeared in the central part of the cross-section; as the load increased, the number and length of these cracks increased. In the final phase, diagonal cracks appeared (not always on both sides of the cross-section), and failure occurred due to concrete crushing in the central area.

In the case of concrete beams with steel reinforcement, the ratio of bending capacity calculated according to the ACI standard to the experimental capacity was 1.31, while the ratio of bending capacity calculated according to the fib Model Code 2010 was 0.93 (Table 4, Figure 11). The 31% higher bending capacity value according to the ACI standard compared to the experimental results may result from the more simplified model used by ACI. In contrast, the calculation of bending capacity according to the fib Model Code 2010 uses more advanced material models, considering non-linear behavior of concrete and steel, resulting in a lower calculated-to-experimental capacity ratio.

In the case of concrete beams with basalt reinforcement, the ratio of bending capacity calculated according to ACI and according to the fib Model Code 2010 to the experimental capa-

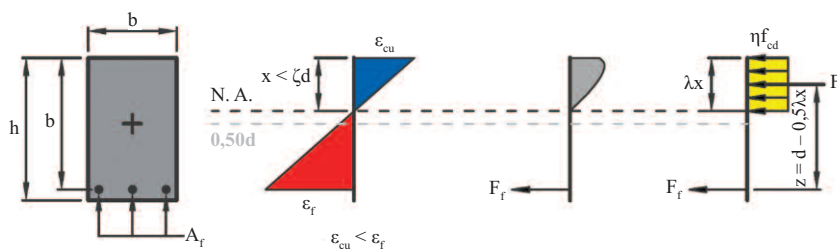


Fig. 8. Mechanics of the under-reinforced cross-section behavior according to the fib Model Code [5]

Rys. 8. Mechanika pracy przekroju niedozbrojonego wg fib Model Code [5]

beton o $w/c = 0,5$, na cemencie portlandzkim CEM I 42,5R w ilości 320 kg/m^3 , o wytrzymałości na ściskanie $f_{cm} = 43,78 \text{ MPa}$, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{ctm} = 5,5 \text{ MPa}$ i module sprężystości $E_{cm} = 40,46 \text{ GPa}$. Do zbrojenia próbek zastosowano pręty żebrowane o średnicy 6 i 16 mm, wykonane ze stali BSt500s o granicy plastyczności $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$. Alternatywnie użyto prętów kompozytowych BFRP z włókien bazaltowych o takiej samej średnicy. Właściwości mechaniczne prętów o średnicy 6 mm: gwarantowana wytrzymałość na rozciąganie $f_{u,ave} = 1180 \text{ MPa}$, gwarantowany moduł sprężystości $E_f = 47,6 \text{ GPa}$ oraz gwarantowane odkształcenie przy zerwaniu $e_{fu}^* = 2,0\%$.

Zaprojektowano dwie serie belek. W serii A zbrojeniem podłużnym były pręty stalowe (RC), a w serii B pręty bazaltowe (BFRP). W obu seriach w strefie ściskanej zastosowano pręty 2 $\varnothing 12 \text{ mm}$, natomiast w strefie rozciąganej serii A – pręty stalowe 4 $\varnothing 16 \text{ mm}$, a w serii B – pręty bazaltowe 4 $\varnothing 16 \text{ mm}$. Zbrojenie poprzeczne zaprojektowano w postaci strzemion w rozstawie 200 mm. W serii A składało się ono z prętów stalowych $\varnothing 6 \text{ mm}$, a w serii B – z prętów BFRP $\varnothing 6 \text{ mm}$.

Schemat podparcia i obciążenia belek przedstawiono na rysunku 10. Belki jednoprzęsłowe obciążono w układzie czteropunktowym o rozpiętości przęsła $l_{eff} = 4200 \text{ mm}$. Ulegały one zniszczeniu przez zginanie (fotografia). Model zniszczenia wszystkich belek przebiegał jednakowo. W pierwszej kolejności powstawały rysy pionowe w środkowej części przekroju, następnie ze wzrostem obciążenia zwiększała się ich liczba i wysokość. W ostatniej fazie pojawiały się rysy ukośne (nie zawsze z obu stron przekroju) i następowało zniszczenie przez zmiażdżenie betonu w strefie środkowej.

W przypadku belek betonowych ze zbrojeniem stalowym stosunek nośności na zginanie obliczonej wg normy ACI do nośności doświadczalnej wyniósł 1,31, natomiast stosunek nośności na zginanie obliczonej wg fib Model Code 2010 wyniósł 0,93 (tabela 4, rysunek 11). Większa o 31% wartość nośności na zginanie wg normy ACI niż nośność na zginanie z badań doświadczalnych może wynikać z bardziej uproszczonego modelu stosowanego przez ACI. Natomiast do obliczania nośności na zginanie zgodnie z fib Model Code 2010 wykorzystuje się bardziej zaawansowane modele materiałowe, uwzględniające nieliniowe zachowanie betonu i stali, w wyniku czego stosunek nośności obliczonej do doświadczalnej jest mniejszy.

W przypadku belek betonowych ze zbrojeniem bazaltowym stosunek nośności na zginanie obliczonej według ACI i wg fib Model Code 2010 do nośności doświadczalnej wynosił odpo-

belki betonowe o przekroju poprzecznym $120 \times 300 \text{ mm}$ oraz długości 4500 mm i różnym rodzaju zbrojenia podłużnego oraz poprzecznego. Badania opisano w [9].

Do wykonania elementów badawczych wykorzystano

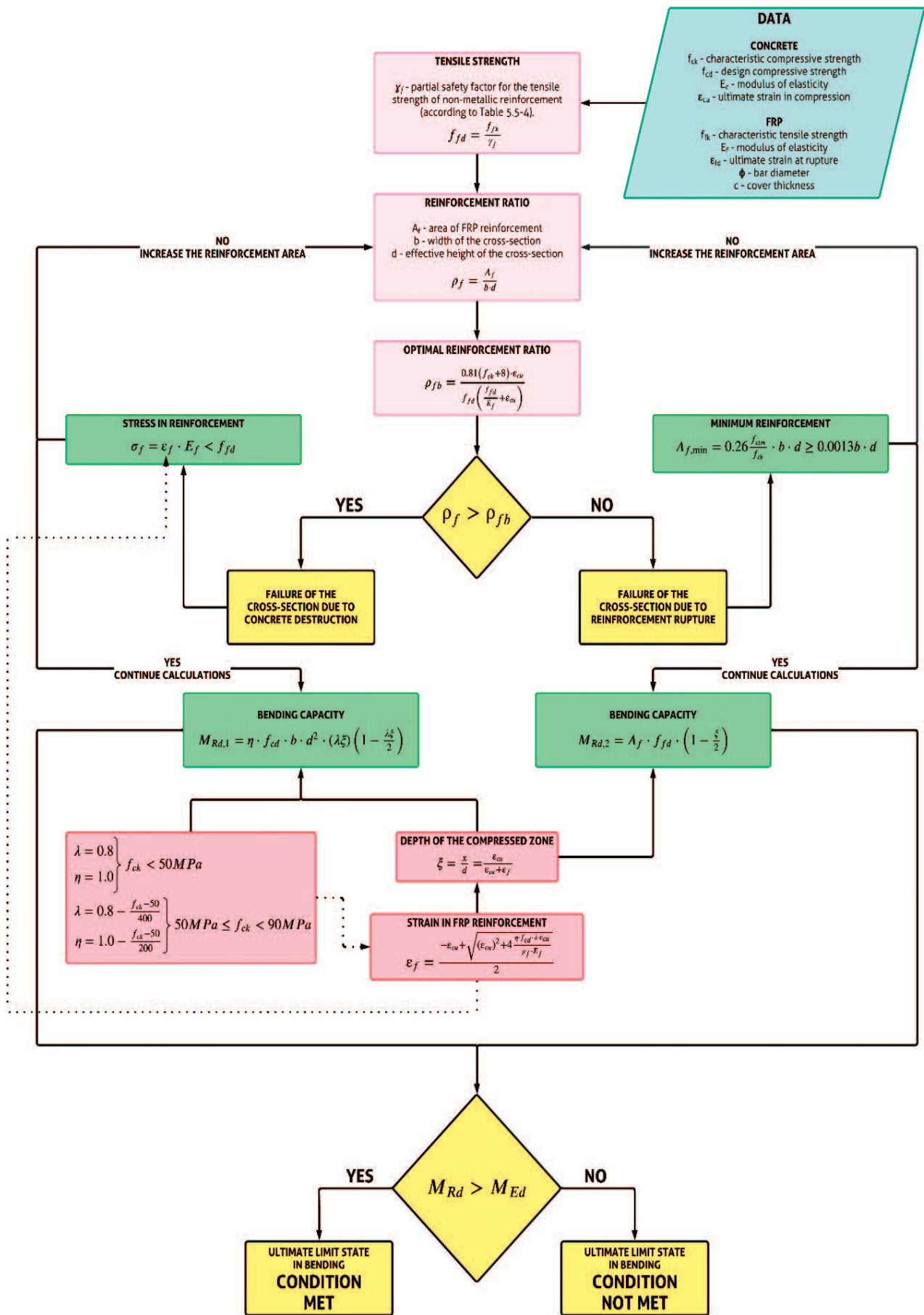


Fig. 9. Algorithm for flexural reinforcement design according to fib Model Code [5]
 Rys. 9. Algorytm wymiarowania zbrojenia na zginanie wg fib Model Code [5]

city was 0.87 and 0.68, respectively (Table 4, Figure 11). The difference in bending capacity calculated according to the ACI standard and fib Model Code 2010, based on the conducted analysis, is approximately 19%.

The obtained results indicate a less effective use of basalt reinforcement in transferring tensile stresses in beams bent according to the assumptions of the fib Model Code 2010 compared to the ACI standard. The observed differences are related to the safety factors used to determine the equivalent reinforcement ratio. The calculated equivalent reinforcement ratio according to ACI was 0.37, while according to the fib Model Code 2010, it was 0.46 (Figure 12). The higher safety factor according to the fib Model Code 2010 ensures a larger safety margin, while the lower factor according to ACI suggests greater confidence in the predicted values of strength and more optimistic assumptions regarding the behavior of composite bars.

Conclusions

The aim of the presented study was to identify the differences between the methods for designing concrete beams with FRP reinforcement exposed to bending and to determine which design standard – ACI or fib Model Code 2010 – provides the theoretical load capacity that is closest to the experimentally determined capacity of the beams. The design approaches of both standards differ in the key aspects:

• **bending capacity:**

– ACI uses the classical approach for designing bending, based on the principles of equilibrium and deformation compatibility. The standard recommends the use of simple models for the tensile strain of concrete and composite reinforcement, assuming linear elasticity for composite materials up to the point of reaching the ultimate strength;

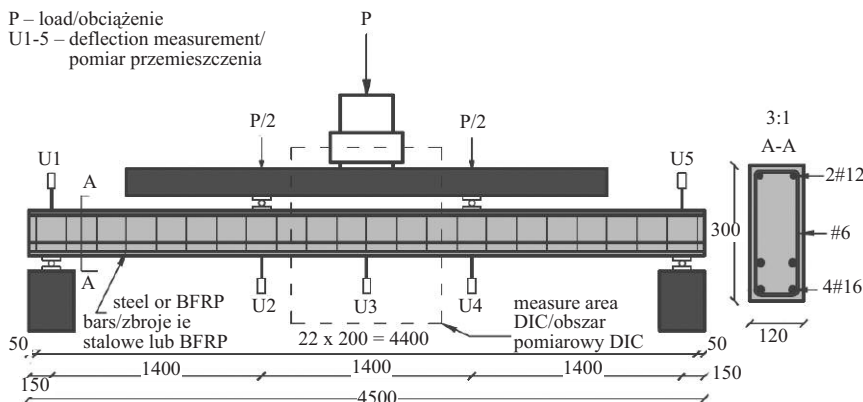
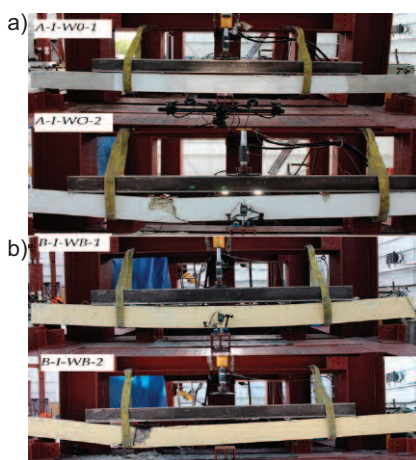


Fig. 10. The scheme of the geometry and loading of the sample
Rys. 10. Schemat obciążania próbki



Failure model of the tested beams: a) steel reinforcement; b) basalt reinforcement (BFRP)
Photo: author's
Model zniszczenia badanych belek: a) zbrojenie z prętów stalowych; b) zbrojenie z prętów bazaltowych (BFRP)
Fot. autorzy

Table 4. Flexural capacity of the tested beams (P_{ULT} – maximum force, $\overline{P_{ULT}}$ – average maximum force, M_{ULT} – maximum bending moment, $\overline{M_{ULT}}$ – average bending moment)
Tabela 4. Nośność na zginanie badanych belek (P_{ULT} – siła maksymalna, $\overline{P_{ULT}}$ – średnia siła maksymalna, M_{ULT} – moment maksymalny, $\overline{M_{ULT}}$ – średni moment zginający)

Series/Seria	P_{ULT} [kN]	$\overline{P_{ULT}}$ [kN]	M_{ULT} [kNm]	$\overline{M_{ULT}}$ [kNm]	M_{ACI} [kNm]	M_{ACI}/M_{ULT} –	M_{fb} [kNm]	M_{fb}/M_{ULT} –	
RC	A-I-W01	110	82,5	82,5	107,98	1,31	76,97	0,93	
	A-I-W02	110	110	82,5	82,5	107,98	1,31	76,97	0,93
BFRP	B-I-WB1	84	97	63,0	72,8	66,82	0,87	52,01	0,68
	B-I-WB2	110	97	82,5	72,8	66,82	0,87	52,01	0,68

wiednio 0,87 i 0,68 (tabela 4, rysunek 11). Stwierdzona na podstawie przeprowadzonej analizy różnica nośności obliczonej wg normy ACI i fib Model Code 2010 wynosi ok. 19%. Otrzymane wyniki wskazują na mniej efektywne wykorzystanie zbrojenia bazaltowego w przenoszeniu na-

prężen rozciągających w belkach zginanych wg założeń fib Model Code 2010 niż w normie ACI.

Przedstawione różnice związane są z zastosowanymi współczynnikami bezpieczeństwa wykorzystywanymi do określenia równoważnego stopnia zbrojenia. Wartość obliczonego równoważnego stopnia zbrojenia wg ACI wynosiła 0,37, a wg fib Model Code 2010 – 0,46 (rysunek 12). Większy współczynnik bezpieczeństwa wg fib Model Code 2010 zapewnia większy margines bezpieczeństwa, natomiast mniejszy wg ACI sugeruje większe zaufanie do przewidywanych wartości nośności i bardziej optymistyczne założenia dotyczące zachowania prętów kompozytowych.

Wnioski

Celem przedstawionych zagadnień było wykazanie różnic pomiędzy metodami projektowania belek betonowych ze zbrojeniem FRP poddanych zginaniu oraz określenie,

w przypadku której normy projektowej ACI czy fib Model Code 2010 nośność teoretyczna jest najbardziej zbliżona do nośności belek określonej empirycznie. Podejście obu norm do analizy i projektowania różni się w kluczowych aspektach:

• **nośność na zginanie:**

– ACI stosuje klasyczne podejście do projektowania na zginanie z użyciem zasad równowagi i kompatybilności odkształceń. Norma zaleca stosowanie prostych modeli naprężenie-odkształcenie betonu i zbrojenia kompozytowego, zakładając liniową sprężystość materiałów kompozytowych do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości;

– **fib Model Code 2010** takes into account the non-linear properties of concrete and composite materials; it provides more detailed guidelines for modeling the behavior of composite materials, including their creep and shrinkage characteristics as well as potential local failures. It uses advanced constitutive models for both concrete and reinforcement, which account for non-linearity in load-bearing calculations;

• **design criteria:**

– **ACI** focuses mainly on simplified methods of analysis and design, which are easy to apply in engineering practice;

– **fib Model Code 2010** is a more complex and detailed standard, taking into account a wide range of cases and project scenarios, which allows for more advanced and precise structural design;

• **experimental studies:**

– **ACI** considers higher strength values compared to [5], which may result from less conservative design assumptions and lower safety factors;

– **fib Model Code 2010** adopts a more conservative approach and uses higher safety factors than [4], resulting in lower strength values that account for more complex material models and non-linear material behavior.

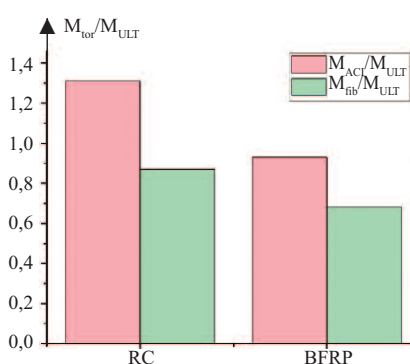


Fig. 11. Comparison of theoretical and experimental flexural capacity according to standards

Rys. 11. Porównanie nośności teoretycznej i doświadczalnej wg norm

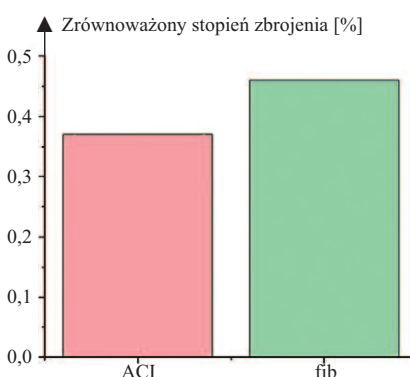


Fig. 12. Comparison on the balanced reinforcement ratio

Rys. 12. Porównanie zrównoważonego stopnia zbrojenia

The work was carried out at the Białystok University of Technology under financing from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland; project number WZ/WB-III/6/2023.

Received: 06.06.2024

Revised: 24.07. 2024

Published: 25.11.2024

– **fib Model Code 2010** uwzględnia nieliniowe właściwości betonu i materiałów kompozytowych; określa bardziej szczegółowe wytyczne dotyczące modelowania zachowania materiałów kompozytowych, w tym ich charakterystyki pełzania i skurczu oraz potencjalne zniszczenia lokalne; stosuje zaawansowane modele konstytutywne w przypadku betonu i zbrojenia, które uwzględniają nieliniowość w obliczeniach nośności;

• **kryteria projektowe:**

– **ACI** koncentruje się głównie na uproszczonych metodach analizy i projektowania, które są łatwe do zastosowania w praktyce inżynierskiej;

– **fib Model Code 2010** to bardziej złożona i szczegółowa norma, uwzględniająca wiele przypadków i scenariuszy projektowych, co pozwala na bardziej zaawansowane i precyzyjne projektowanie konstrukcji;

• **badania doświadczalne:**

– **ACI** uwzględnia większe wartości nośności w porównaniu z [5], co może wynikać z mniej konserwatywnych założeń projektowych i mniejszych współczynników bezpieczeństwa;

– **fib Model Code 2010** określa bardziej konserwatywne podejście i większe współczynniki bezpieczeństwa niż w [4], w wyniku czego uzyskuje się mniejsze wartości nośności, uwzględniające bardziej złożone modele materiałowe i nieliniowe zachowanie materiałów.

Prace wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach projektu WZ/WB III/6/2023 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP.

Artykuł wpłynął do redakcji: 06.06.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.07. 2024 r.

Opublikowano: 25.11.2024 r.

Literature

[1] Rejment M, Trapko T. Pręty kompozytowe do zbrojenia betonu. Materiały Budowlane. 2014; 46 – 47.
 [2] Drzazga M, Kamiński M. Pręty zbrojeniowe FRP jako główne zbrojenie zginanych elementów betonowych: przegląd zaleceń i efektywność projektowania. Czas. Przegląd Budowlany. 2015; 86: 22 – 28.
 [3] Kotynia R. Projektowanie konstrukcji z betonu przy użyciu zbrojenia niemetalicznego, 2022. https://www.archmedia.pl/public/formularz_a.php (accessed November 15, 2022).
 [4] ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee. 2015; 440.

[5] fib Model Code for Concrete Structures, FIB The International Federation for Structural Concrete. 2010.
 [6] Duranovic N, Pilakoutas K, Waldron P. Tests on concrete beams reinforced with glass fibre reinforced plastic bars, in: Proc. Third Int. Symp. Non-Met. FRP Reinf. Concr. Struct. FRPRCS-3, Japan Concrete Institute. 1997; 479 – 86.
 [7] Guide test methods for fiber reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. 2004.
 [8] Górski M, Kotala B, Białozor R. Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2018.
 [9] Krassowska J, Piña Ramirez C. Flexural Capacity of Concrete Beams with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars and Stirrups. Materials. 2022; <https://doi.org/10.3390/ma15228270>.