

Ugięcia i zarysowanie betonowych belek zbrojonych prętami HFRP

Dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, mgr inż. Rafał Wasilczyk, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Pręty FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) stają się coraz bardziej powszechnym zamiennikiem zbrojenia stalowego w konstrukcjach budowlanych, którym stawia się wysokie wymagania dotyczące nośności i trwałości [5, 6, 14]. Pręty kompozytowe są często stosowane do zbrojenia betonowych elementów konstrukcyjnych narażonych na oddziaływanie agresywnego środowiska, takich jak fundamenty, falochrony i inne obiekty nadbrzeżne oraz budowle w oczyszczalniach ścieków [16]. Pręty kompozytowe wytwarzane są metodą pultruzji z ciągłych włókien spajanych żywicą epoksydową lub poliestrową. Technologia ta opiera się na przeciągnięciu materiału przez zestaw dysz kształtujących pasma włókien, które później zostają zanurzone w żywicy i formowane jako pręty gładkie. Następnie pręty są owijane tzw. *rovingiem* (ciągłymi włóknami ułożonymi jednokierunkowo) pełniącym rolę uźebrowania [1]. Materiały kompozytowe charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości do gęstości oraz wysokim stosunkiem modułu sprężystości podłużnej do poprzecznej. W zależności od materiału włókien wyróżnia się pręty aramidowe (AFRP), węglowe (CFRP), szklane (GFRP) i bazaltowe (BFRP). Właściwości produktów FRP można dowolnie kształtować, dobierając rodzaj i orientację włókien oraz stosunek objętości włókien do żywicy w kompozycie budowlanym.

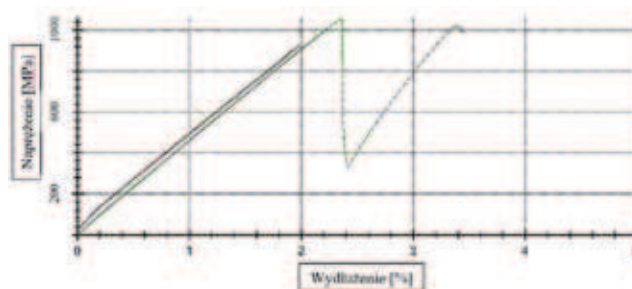
Pomimo upowszechnienia różnych rodzajów prętów niemetalicznych oraz przeprowadzonych licznych badań elementów konstrukcyjnych zbrojonych tymi prętami [4, 11, 14] nadal ten rodzaj zbrojenia traktowany jest jako niekonwencjonalny materiał konstrukcyjny. Jedną z przyczyn jest brak krajowych norm oraz jasnych wytycznych projektowania konstrukcji zbrojonych prętami FRP. Dotychczas nie opracowano również norm dotyczących określania parametrów mechanicznych prętów zbrojeniowych typu FRP, co sprawia, że przy każdym

wykorzystaniu tego rodzaju zbrojenia należy przeprowadzić odrębne badania właściwości mechanicznych. Stosunkowo najmniej badań konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym, prezentowanych w literaturze, dotyczy wykorzystania prętów bazaltowych (BFRP). Pręty BFRP są nowym materiałem, którego właściwości nie zostały jeszcze w pełni zbadane. Wchodzące w ich skład włókna bazaltowe charakteryzują się wysoką stabilnością chemiczną i termiczną [8]. Ponadto włókna te wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż włókna stalowe i stosunkowo wysoki moduł sprężystości podłużnej, jednak mniejszy niż moduł sprężystości stali [15, 16]. Pręty z włóknem bazaltowym wykazują wiele istotnych zalet w porównaniu do zbrojenia stalowego, a także innych kompozytów FRP takich jak mały ciężar właściwy, wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysoka odporność na korozję [3]. Jednak stosunkowo niski moduł sprężystości podłużnej prętów BFRP, w porównaniu do prętów stalowych, powoduje nadmierne ugięcia i zarysowanie zginanych elementów betonowych zbrojonych tymi prętami. Rozwiązaniem tego problemu jest zwiększenie sztywności prętów kompozytowych poprzez modyfikację ich składu materiałowego. W ten sposób powstają pręty hybrydowe (HFRP). W wyniku zastąpienia części włókien bazaltowych włóknami węglowymi można uzyskać wzrost wartości modułu sprężystości prętów [13].

Celem badań przedstawionych w pracy była ocena zachowania się betonowych belek zbrojonych prętami hybrydowymi (HFRP) poddanych zginaniu. Ustalono parametry mechaniczne prętów kompozytowych wykonanych przy zastosowaniu włókien bazaltowych i węglowych. Określono nośność, wartości ugięć i rozwój zarysowania badanych elementów w warunkach trójpunktowego zginania.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej

Lp.	Składnik	Gęstość	Ilość na 1 m ³ betonu
1	Cement CEM I 42,5R	3,10 kg/m ³	320 kg
2	Woda	1,00 kg/m ³	160 kg
3	Piasek o uziarnieniu 0–2 mm	2,65 kg/m ³	732 kg
4	Żwir o uziarnieniu 2–16 mm	2,65 kg/m ³	1203 kg
5	Plastyfikator Chryso Spolos TR	1,07 kg/m ³	5,49 kg



Rys. 1. Wykres zależności obciążenie – odkształcenie wybranych prętów HFRP

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiały

Do wykonania belkowych elementów modelowych wykorzystano beton wykonany według receptury podanej w tabeli 1, spełniający wymagania dla elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do użytkowania w klasach ekspozycji od X0 do XC3 [12]. Beton charakteryzował się średnią wytrzymałością na ściskanie i modułem sprężystości, odpowiednio 51,1 MPa i 38,6 GPa.

Zbrojenie belek stanowiły pręty wytworzone z mieszanych włókien bazaltowych i węglowych (HFRP) o matrycy z żywicy poliestrowej. W ramach badań materiałowych prętów zbrojeniowych o średnicy 12 mm określono podstawowe, wymagane przez ACI 440:1R-06 [1] i ACI 440:3R [2], parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych, takie jak:

- gwarantowaną wytrzymałość na rozciąganie $f_{tu} = 1117,1$ MPa,
 - gwarantowany moduł sprężystości równy średniej wartości modułu sprężystości uzyskanego z badań $E_f = E_{ave} = 64,3$ GPa,
 - gwarantowane odkształcenie przy zerwaniu $\varepsilon_{fu}^+ = 1,6\%$.
- Przykładowe zależności: siła rozciągająca – wydłużenie pręta uzyskane w trakcie badania pokazano na rysunku 1. Widoczne wahania przebiegu wykresu wydłużenie – obciążenie w końcowej fazie testu obrazują typowy dla kompozytowych prętów zbrojeniowych sposób zniszczenia poprzez zerwanie w pierwszej kolejności włókien w środku przekroju, przy jednoczesnym wzroście wyężenia włókien skrajnych, aż do ich całkowitego wyciągnięcia. Zgodnie z przewidywaniami zniszczenie miało charakter nagły, bez widocznego przewężenia przekroju poprzecznego oraz bez nieproporcjonalnego wzrostu

odkształceń w końcowej fazie testu, co wskazywało na brak występowania tzw. półki plastycznej. Jedyną widoczną oznaką wzrostu wyężenia pręta, prowadzącego do jego stanu krytycznego, były pojedyncze pęknięcia poprzeczne.

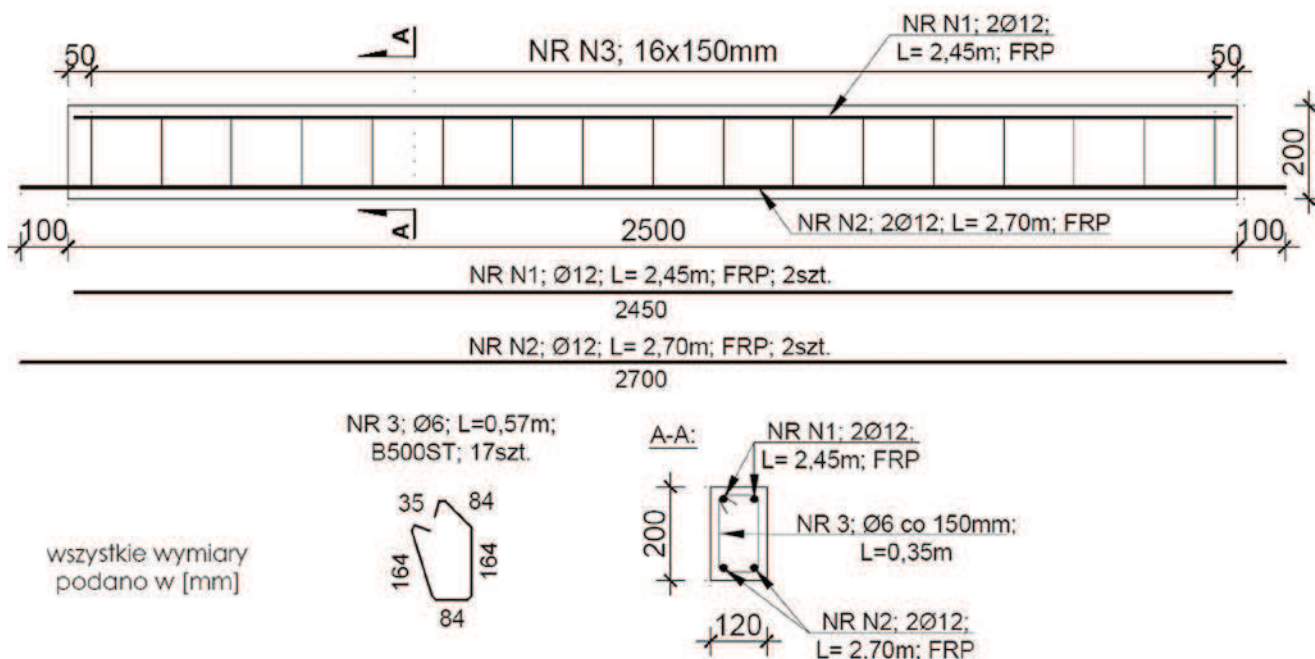
2.2. Sposób przygotowania belek

Przedmiotem badań były belki o wymiarach 120×200×2500 mm. Zbrojenie główne elementów badawczych stanowiły pręty HFRP o średnicy $\varnothing 12$ mm oraz równomiernie rozmieszczone strzemiona o średnicy 6 mm wykonane ze stali B500ST. Belki zaprojektowano, zakładając mechanizm zniszczenia jako zmiążdżenie strefy ściskanej betonu według wytycznych [1]. Seria badawcza składała się z trzech elementów. Układ zbrojenia belek przedstawiono na rysunku 2.

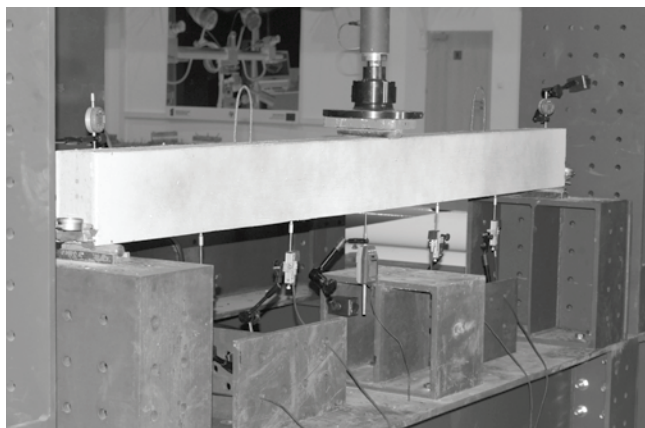
2.3. Metodyka badania belek modelowych

Belki badano w układzie trójpunktowego zginania (rys. 3). Odległość pomiędzy podporami wynosiła 2400 mm. Mierzonymi wartościami były przemieszczenia belek na podporach i w prześle, poślizg dolnych prętów zbrojeniowych oraz odkształcenia w różnych punktach wysokości przekroju przęsłowego. Zamocowano 6 linii reperów pomiarowych, które pokazano na rysunku 4. Linie skrajne 1 i 6 odpowiadają położeniu zbrojenia ściskanego i rozciągającego, natomiast linie 2–5 rozmieszczono co 30 mm. Przyrost obciążenia w trakcie testu był równy 2,0 kN. Na każdym etapie rejestrowano wartości ugięć, odkształceń i poślizg prętów zbrojeniowych na skrajach belek. Jednocześnie, odwzorowywano propagację rys bezpośrednio na powierzchni badanego elementu.

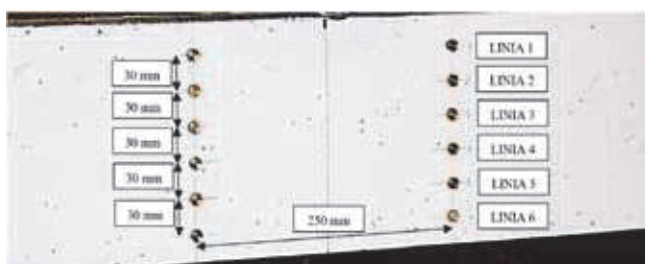
Pomiaru odkształceń dokonano za pomocą ekstensometru stykowego o bazie pomiarowej 250 mm i dokładności



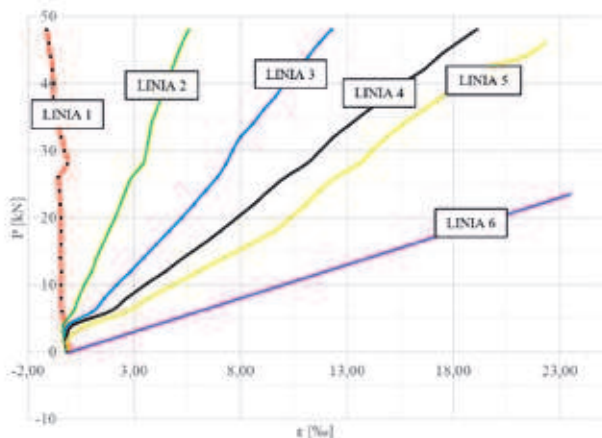
Rys. 2. Zbrojenie belek modelowych



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego



Rys. 4. Płożenie punktów pomiaru odkształceń w środkowej części belki



Rys. 5. Wykres obciążenie P – odkształcenie e w różnych punktach wysokości przekroju belek ze zbrojeniem HFRP



Rys. 6. Widok belki ze zbrojeniem HFRP przy obciążeniu 66,0 kN

0,001 mm. Ugięcia pomierzono za pomocą czujników indukcyjnych o bazie pomiarowej 50 mm i dokładności 0,01 mm współpracujących z systemem Sensor KSR-32. W celu weryfikacji pomiary przemieszczeń na podporach kontrolowano przy użyciu czujników zegarowych o parametrach zgodnych z czujnikami indukcyjnymi, natomiast do ugięć w przęśle zastosowano dodatkowo elektroniczny czujnik zegarowy o dokładności 0,001 mm i zakresie 67,5 mm.

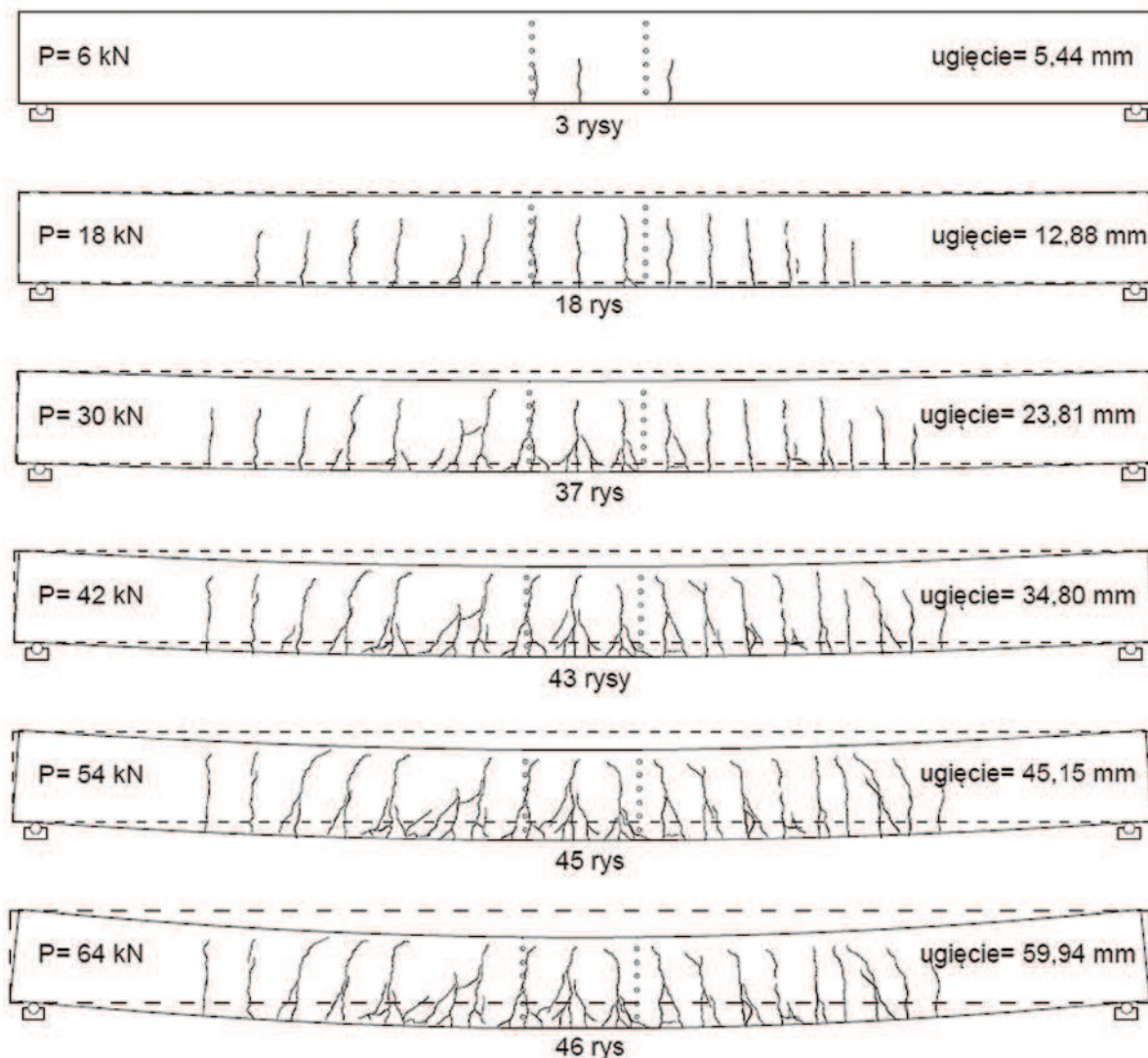
3. Analiza stanów odkształcenia belek ze zbrojeniem HFRP

Określono średnią wartość nośności belek zbrojonych prętami HFRP $P_{ult}=68,0$ kN. Uśrednione wartości odkształceń na powierzchni betonu w przekroju przęsłowym belki w zależności od wartości obciążenia pokazano na rysunku 5.

Zauważalny jest niewielki zakres strefy ściskanej belek, co potwierdza wyniki wcześniejszych badań elementów zbrojonych prętami BFRP [9]. Po osiągnięciu wyężenia na poziomie 6% obciążenia niszcącego P_{ult} przyrost odkształceń mierzonych na powierzchni belki miał przebieg zbliżony do liniowego aż do momentu niszczenia belki, które nastąpiło poprzez zmiażdżenie strefy ściskanej. Po osiągnięciu wyężenia ok. $0,10P_{ult}$ aż do zakończenia badania zakres strefy ściskanej znajdował się pomiędzy liniami 1 i 2.

Widok obszaru krytycznego belki modelowej bezpośrednio przed zniszczeniem zaprezentowano na rysunku 6. Można zaobserwować spękania i początek odsłonięcia otuliny bezpośrednio pod rolką obciążającą, w efekcie osiągnięcia wytrzymałości na ściskanie betonu.

Rozwój zarysowania wraz z odwzorowaniem ugięć belki ze zbrojeniem kompozytowym HFRP w warunkach trójpunktowego zginania przedstawia rysunek 7. Granica występowania zarysowania pokrywała się z niewielkim zasięgiem strefy ściskanej sięgając osi zbrojenia górnego. Maksymalny zasięg zarysowania ustabilizował się na stosunkowo wczesnym etapie badania na poziomie $0,26P_{ult}$. Znaczne dysproporcje pomiędzy obszarami zarysowanymi i niezarysowanymi, odpowiadające wykresom rozciąganie – ściskanie w przekrojach belki, zdecydowanie większe niżeli w typowych elementach żelbetowych, spowodowane są niewielką różnicą pomiędzy wartościami modułów sprężystości zastosowanego zbrojenia i betonu. Jest to typowy problem w przypadku elementów zginanych zbrojonych prętami kompozytowymi na bazie włókien bazaltowych [11, 14]. Utrudnia to spełnienie wymagań odnośnie ograniczenia rozwartości rys. W trakcie badania występowały jedynie rysy prostopadłe do osi podłużnej belek, tj. rysy typowe dla zginania, bez znaczącego wpływu ścinania na końcową nośność elementów badanych. W ostatnich etapach obciążenia zauważalne było istotne zwiększenie liczby drobnych rys na krawędzi rozciąganej, które z kolei łączyły się w pojedyncze większe rysy w połowie wysokości przekroju belek.



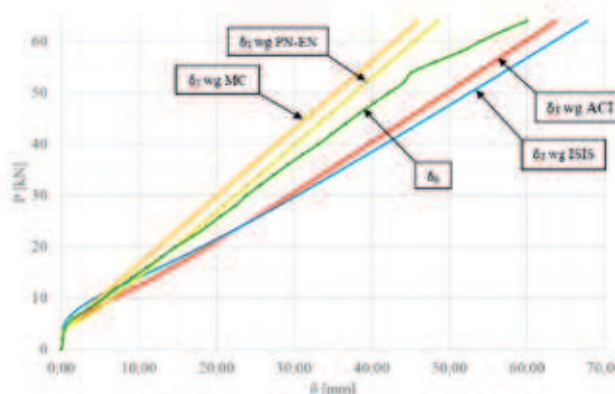
Rys. 7. Rozwój ugięcia i propagacja zarysowania belki ze zbrojeniem HFRP przy różnych wartościach obciążenia P

W trakcie badań nie stwierdzono poślizgu zbrojenia. Maksymalny odczyt z czujników zamontowanych na wystających dolnych prętach zbrojeniowych wahał się w granicach błęd pomiarowego (0,001 mm).

4. Porównanie ugięć określonych doświadczalnie z wartościami obliczonymi

Wartości δ_T zmierzonych ugięć belek odniesiono do wartości δ_E ugięć obliczonych na podstawie algorytmów przedstawionych w następujących dokumentach: ACI 440:1R-06 [1], ISIS Design Manual No. 3 [7], Model Code 2010 [10] oraz PN-EN 1992-1-1:2008/Ap1 [12]. Wyniki porównania pokazano na rysunku 8.

Wyniki badań doświadczalnych wskazują na przekroczenie stanu granicznego ugięcia (założonego jako L/250) już na poziomie około 20% wyczerpania. Największą zgodność algorytmów obliczeniowych z rzeczywistym zachowaniem się badanych elementów uzyskano w zakresie od 0,2 do $0,8P_{ult}$. Pokrywa się to z zakresem



Rys. 8. Porównanie wartości pomierzonych ugięć belek ze zbrojeniem HFRP δ_T i obliczonych δ_E na podstawie algorytmów ACI [1], ISIS [7], MC [10], PN-EN [12] w zależności od wartości obciążenia P

obciążeń, w którym przyrost ugięć belek ma charakter liniowy. Należy pamiętać, że zastosowane normy i procedury obliczeniowe bazują na ograniczonej liczbie badań z wykorzystaniem prętów FRP (ACI, ISIS), o ile w ogóle przewidują tego typu zbrojenie w elementach betonowych (MC 2010, PN-EN 1992). Widoczna jest wyraźna granica pomiędzy wynikami obliczeń według różnych wytycznych, która wynika z odmiennego podejścia do sztywności elementów po przekroczeniu granicy momentu rysującego M_{cr} . Normy MC 2010 i PN-EN 1992 zakładają interpolację wynikowej sztywności elementu przed zarysowaniem i po nim. Natomiast w wytycznych obliczeń według ACI i ISIS, dedykowanych zbrojeniu FRP, zastępuje się powyższe poprzez zastosowanie efektywnego momentu bezwładności przekroju I_e .

Przyjmując jako kryterium oceny zbieżności stosunek δ_T/δ_E w całym zakresie obciążeń, można stwierdzić, że najbardziej dokładną procedurą obliczeniową jest PN-EN 1992-1-1:2008/Ap1 [12], przy średniej wartości stosunku δ_T/δ_E równej 0,95. Natomiast algorytm zawarty w Model Code 2010 [10] daje wyniki ze zgodnością na poziomie 0,84. Jednakże w przypadku obu procedur obliczeniowych uzyskano zaniżone wartości ugięć w stosunku do zmierzonych. Zatem właściwymi procedurami do rozważań teoretycznych pozostają ACI 440:1R-06 [1] oraz ISIS Design Manual No. 3 [7], w przypadku których stosunek δ_T/δ_E wynosił odpowiednio 1,23 oraz 1,24.

5. Podsumowanie

Badania właściwości prętów kompozytowych HFRP wykazały, że zależność siła – wydłużenie w próbie rozciągania ma liniowy charakter w całym zakresie obciążenia. Wytrzymałość na rozciąganie prętów hybrydowych jest dwukrotnie większa od wytrzymałości prętów stalowych, a moduł sprężystości podłużnej jest trzykrotnie mniejszy.

Charakterystyki wytrzymałościowe prętów kompozytowych miały istotny wpływ na zachowanie się belki zginanej. Obecność kompozytowych prętów zbrojeniowych powoduje zwiększenie wartości odkształceń w wyniku naprężeń rozciągających. Po przekroczeniu momentu rysującego, w środkowej części belki powstają rysy prostopadłe na wysokości zbrojenia rozciąganego. Ze względu na odporność na korozję prętów HFRP, szerokość rys nie ma takiego znaczenia jak w konstrukcjach żelbetowych. W końcowej fazie obciążenia, w belkach ze zbrojeniem HFRP, nie dochodziło do lokalnej utraty przyczepności pomiędzy prętami a betonem.

Przyrost ugięcia po zarysowaniu był liniowy aż do zniszczenia belki. Rozpatrując zastosowanie wytycznych ACI 440:1R-06 oraz ISIS Design Manual w praktyce inżynierskiej, ze względu na znaczne ugięcia badanych belek wskazujące na przekroczenie warunków stanu granicznego użyteczności już przy 20% ich

wyłączenia, różnice pomiędzy wynikami teoretycznymi i eksperymentalnymi można uznać za nieistotne. Obciążenia, przy których występują niezgodności wynikowych wartości ugięć, są wielokrotnie większe od granicznych sił skutkujących niespełnieniem normowych warunków SGU.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków NCBiR pt. „Innowacyjne hybrydowe zbrojenie kompozytowe FRP do konstrukcji infrastrukturalnych o podwyższonej trwałości”, numer projektu PBS3/A2/20/2015 (ID 245084).

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI 440.1R-06, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440. American Concrete Institute, USA, 2006
- [2] ACI 440.3R-04, Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures ACI Committee 440. American Concrete Institute, USA, 2004
- [3] Czigány T., Basalt fiber reinforced hybrid polymer composites, Materials Science Forum 473–474/2005, str. 59–66
- [4] Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B., Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures, Construction and Building Materials 95/2015, str. 623–635
- [5] Fiore V., Di Bella G., Valenza A., Glass-basalt epoxy hybrid composites for marine applications, Material Design 32/2011, str. 2091–2099
- [6] Inmana M., Thorhallsson M. R., Azraguea K., A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams, Energy Procedia 111/2017, str. 31–40
- [7] ISIS. Design Manual No. 3 – Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers (FRPs). Winnipeg: ISIS Canada, 2007
- [8] Kabay N., Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber, Construction and Building Materials 50/2014, str. 95–101
- [9] Kosior-Kazberuk M., Wasilczyk R., Analiza ugięć i zarysowania betonowych belek ze zbrojeniem niemetalicznym, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 4/2018, str. 173–183
- [10] Model Code 2010, Comité Euro-International du Béton fib (CEB-FIP), 2012
- [11] Pawłowski D., Szumigala M., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, Przegląd Budowlany 3/2014, str. 47–50
- [12] PN-EN 1992-1-1:2008/Ap1, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Warszawa, PKN, 2010
- [13] Urbański M., Łapko A., Garbacz A., Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. Procedia Engineering 57/2013, str. 1183–1191
- [14] Urbański M., Ocena stanów naprężenia i odkształcenia w belkach z betonu zbrojonego prętami z włókien bazaltowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa, 2017
- [15] Van de Velde K., Kiekens P., Van Langenhove L., Cater S., Basalt fibers as reinforcement for composites, Editorial, International Composites News 3/2002
- [16] Wei B., Cao H., Song S., Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers, Materials Science and Engineering A 527/2010, str. 4708–4715