

ANALIZA UGIĘĆ I ZARYSOWANIA BETONOWYCH BELEK ZE ZBROJENIEM NIEMETALICZNYM

Marta KOSIOR-KAZBERUK*, Rafał WASILCZYK

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy analizowano zachowanie się modelowych belek z betonu, zbrojonych prętami bazaltowymi (BFRP), w warunkach trójpunktowego zginania. Badano parametry wytrzymałościowe prętów BFRP. Określono nośność belek na zginanie, odkształcenia betonu i ugięcie. Otrzymane wyniki porównano z wynikami obliczeń ugięcia na podstawie standardu ACI 440:1R-06. Zarysowanie belek pod wpływem obciążenia analizowano przy wykorzystaniu optycznego systemu pomiarowego Aramis 5M. Ze względu na charakterystykę wytrzymałościową prętów kompozytowych, belki zbrojone nimi wykazywały znaczące odkształcenia wywołane rozciąganiem, co skutkowało rozwojem rys o znacznej szerokości. Obserwowano liniową zależność ugięcia belki modelowej od obciążenia. Stwierdzono, że procedura obliczeniowa ACI 440:1R-06 pozwala na dokładne określenie ugięć belek zbrojonych prętami bazaltowymi przy obciążeniach krótkotrwałych.

Słowa kluczowe: pręty BFRP, belka zbrojona, ugięcie, zarysowanie.

1. Wprowadzenie

Pręty zbrojeniowe FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) wytwarzane są metodą pultruzji z ciągłych włókien węglowych, bazaltowych lub szklanych oraz żywicy epoksydowych lub poliestrowych. 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, analogicznie jak w przypadku konwencjonalnych, stalowych prętów zbrojeniowych (ACI 440.1R, 2006).

Pręty kompozytowe stały się użytecznym zamiennikiem konwencjonalnego zbrojenia tam, gdzie decydującą rolę w konstrukcjach inżynierii lądowej odgrywa nośność i odporność na czynniki środowiskowe (Fiore i in., 2011; Inmana i in., 2017; Urbański i in., 2013). Uwzględniając wymagania odpowiedzialnego projektowania obiektów inżynierskich ze szczególnym naciskiem na trwałość, wykorzystanie zbrojenia niemetalicznego w konstrukcyjnych elementach zbrojonych pozwala na redukcję kosztów związanych ze wznoszeniem budowli, a także kosztów utrzymania obiektów i ewentualnych remontów. Pręty niemetaliczne charakteryzują się wysoką odpornością na korozję, co pozwala wydłużyć cykl życia obiektu (Artemenko, 2003; Bank, 2006; Wei i in., 2010). Wykorzystywane są często do realizacji betonowych elementów

konstrukcyjnych narażonych na silną agresję środowiska, takich jak fundamenty, falochrony i inne konstrukcje nadmorskie oraz zbiorniki w oczyszczalniach ścieków (Fiore i in., 2011; Wei i in., 2010).

Zastosowanie prętów FRP pozwala zredukować grubość otuliny wokół zbrojenia, co umożliwia również zmniejszenie wymiarów i ciężaru własnego elementu konstrukcyjnego. Większa wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych, w porównaniu do typowych prętów stalowych, umożliwia zmniejszenie ich średnicy, a mniejszy ciężar objętościowy materiału kompozytowego również wpływa na zmniejszenie całkowitego ciężaru konstrukcji (Branston i in., 2016; Elgabbas i in., 2015; Selejdak i Brózda, 2016).

Pomimo upowszechnienia różnych rodzajów prętów niemetalicznych oraz prowadzonych licznych badań elementów konstrukcyjnych zbrojonych tymi prętami (Banibayat i Patnaik, 2014; Urbański, 2017), 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

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.kosior@pb.edu.pl

są nowym materiałem, którego właściwości nie zostały jeszcze w pełni zbadane. Wchodzące w ich skład włókna bazaltowe charakteryzują się wysoką stabilnością chemiczną i termiczną (Kabay, 2014). Włókno bazaltowe zachowuje strukturę bazaltu i takie cechy, jak odporność korozyjna, idealna izolacyjność cieplna, pochłanianie dźwięku i niska absorpcja wilgoci. Ponadto, włókno wykazuje większą wytrzymałość na rozciąganie niż stal i stosunkowo wysoki moduł sprężystości podłużnej, jednakże mniejszy niż moduł sprężystości stali. Według Sima i in. (2005) włókna bazaltowe wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż włókna szklane typu E, większe odkształcenia graniczne przy zniszczeniu niż włókna węglowe, jak również dobrą odporność w warunkach agresywności chemicznej i temperatur pożarowych (High i in., 2015; Borhan, 2012). Pręty bazaltowe dzięki korzystnym właściwościom użytkowym włókien bazaltowych, mogą stanowić alternatywę dla zbrojenia konwencjonalnego, zatem należy podejmować prace badawcze służące upowszechnieniu ich stosowania.

Celem badań przedstawionych w pracy jest ocena zachowania się poddanych zginaniu modelowych belek z betonu, zbrojonych prętami bazaltowymi (BFRP). Ustalono parametry mechaniczne prętów kompozytowych wykonanych przy zastosowaniu włókien bazaltowych. Określono nośność, wartości ugięć i zarysowanie badanych elementów w warunkach trójpunktowego zginania.

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiały

Do wykonania belkowych elementów modelowych wykorzystano beton o stosunku $w/c = 0,50$ i zawartości cementu CEM I 42,5R równej 320 kg/m^3 . Jako kruszywo zastosowano mieszaninę piasku i żwiru o uziarnieniu do 16 mm. Beton projektowano uwzględniając wymagania dla elementów konstrukcyjnych przeznaczonych do użytkowania w klasie ekspozycji

XC3 (m. in. cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w wilgotnym środowisku) według PN-EN 206-1 (2017). Recepturę betonu przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład mieszanki betonowej

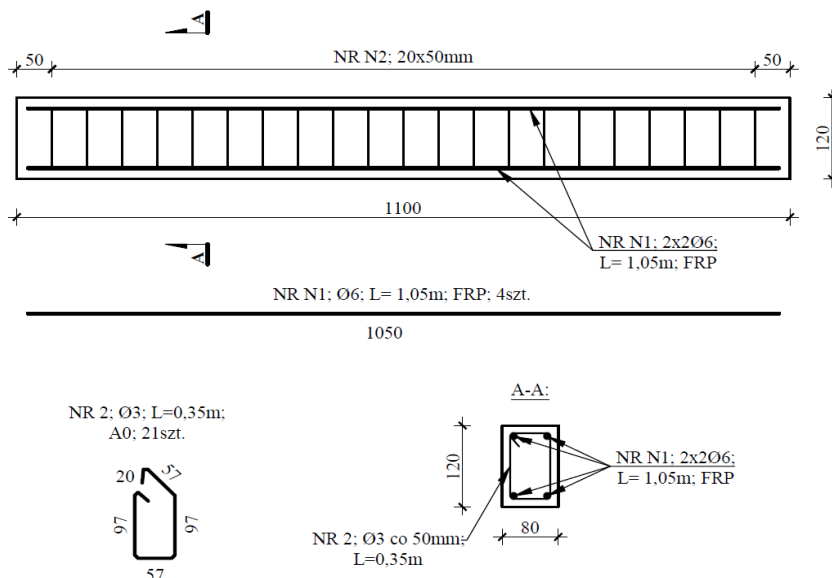
Lp.	Składnik	Gęstość [kg/m ³]	Ilość na 1 m ³ betonu [kg]
1	Cement CEM I 42,5R	3,10	320
2	Woda	1,00	160
3	Piasek o uziarnieniu 0-2 mm	2,65	732
4	Żwir o uziarnieniu 2-16 mm	2,65	1203
5	Plastyfikator Chryso Spolox TR	1,07	5,49

Zastosowany beton charakteryzował się średnią wytrzymałością na ściskanie i modułem sprężystości, odpowiednio 51,1 MPa i 38,6 GPa.

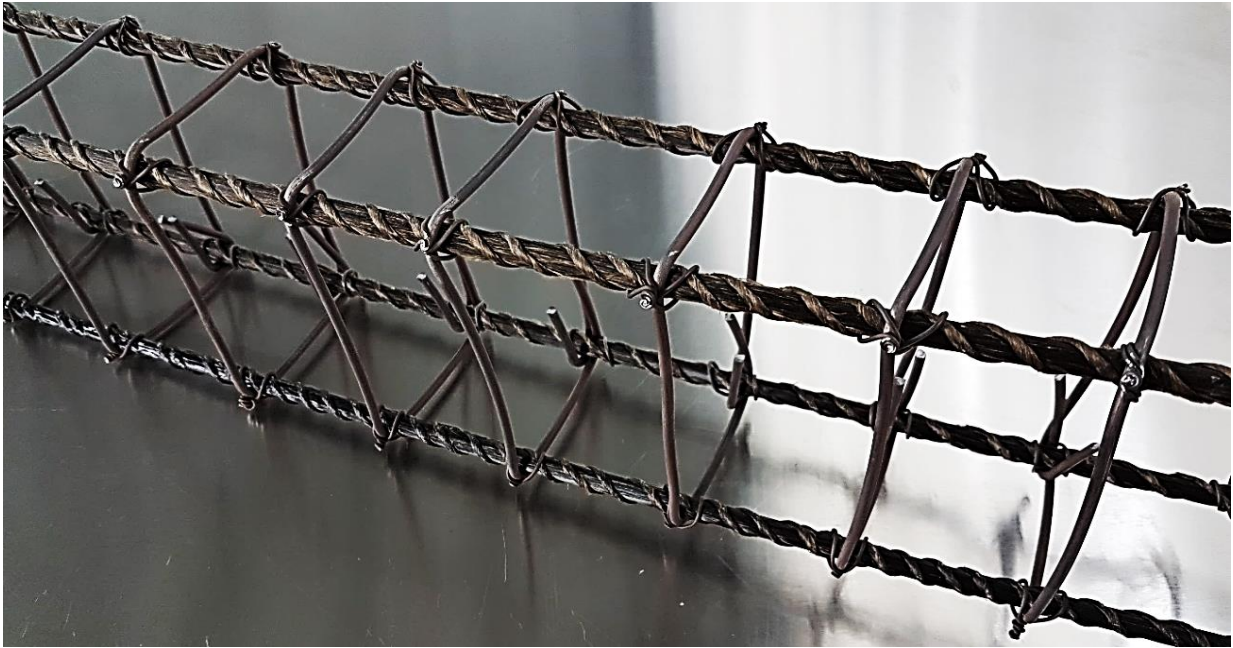
Zbrojenie badanych belek stanowiły niemetaliczne pręty składające się z włókien bazaltowych (BFRP) o matrycy z żywicy poliestrowej.

2.2. Sposób przygotowania elementów próbnych

Przedmiotem badań były belki modelowe o wymiarach $80 \times 120 \times 1100$ mm. Układ zbrojenia elementów badawczych bazował na 4 prętach głównych FRP o średnicy $\phi 6$ mm w każdym z naroży przekroju poprzecznego oraz równomiernie rozmieszczonych strzemionach o średnicy $\phi 3$ mm ze stali A-0. Elementy modelowe zostały zaprojektowane zgodnie z wytycznymi ACI 440:1R-06 (2006), przy założeniu zmiażdżenia strefy ściskanej betonu jako mechanizmu ich zniszczenia. Schemat zbrojenia belek oraz widok wykonanego zbrojenia przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Zbrojenie belek modelowych



Rys. 2. Ramka zbrojeniowa z prętami BFRP

2.3. Badanie parametrów wytrzymałościowych prętów BFRP

W ramach wykonanych badań określono podstawowe, wymagane przez ACI 440:1R-06 (2006) i ACI 440:3R (2004), parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych, to jest:

- f_{fu}^* – gwarantowaną wytrzymałość na rozciąganie, zdefiniowaną jako średnia wytrzymałość na rozciąganie $f_{u,ave}$ pomniejszona o potrójną wartość odchylenia standardowego σ ,
- E_f – gwarantowany moduł sprężystości równy średniej wartości modułu sprężystości uzyskanego z badań E_{ave} ,
- e_{fu}^* – gwarantowane odkształcenie przy zerwaniu, obliczane analogicznie jak f_{fu}^* na podstawie wartości średniej $\varepsilon_{u,ave}$ pomniejszonej o potrójną wartość odchylenia standardowego σ .

Badanie parametrów wytrzymałościowych prętów kompozytowych wymaga specjalnego przygotowania próbek polegającego na wykonaniu systemu mocującego końce bazaltowego pręta rozciąganego w uchwytach maszyny wytrzymałościowej. W tym celu, wzorując się na zaleceniach ACI 440:3R-04 (2004) oraz ASTM D7205M (2016), wykonano mocowania prętów niemetalicznych o średnicy $\phi 6$ mm w stalowych tulejach o grubości ścianek 5 mm, wypełniając wolne przestrzenie szybkowiążącą mieszką ekspansywną o wytrzymałości na ściskanie równej 60 MPa po 24 godzinach i 110 MPa po 28 dniach dojrzewania. Po 4 tygodniach od wykonania mocowań przystąpiono do testów z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick o maksymalnym obciążeniu 250 kN. Pomiaru odkształceń wykonywano za pomocą ekstensometru o dokładności 0,001 mm. Badania prowadzono przy stałej prędkości narastania obciążenia równej 0,1 kN/s.

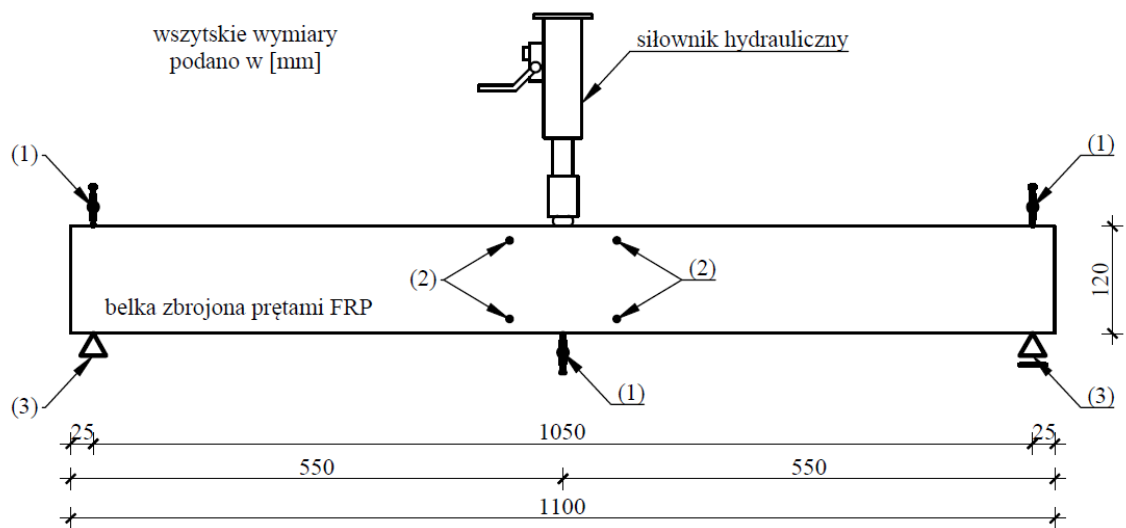
2.4. Metodyka badania belek modelowych

Belki badano w układzie trójpunktowego zginania (rys. 3). Odległość pomiędzy podporami badanych belek wynosiła 1050 mm, a obciążenie przyłożono w środku rozpiętości próbek. Wielkościami mierzonymi były przemieszczenia belek na podporach i w przęśle oraz odkształcenia w różnych punktach wysokości przekroju w środku rozpiętości przęśla. Zamocowano 4 linie reperów pomiarowych, pokazane na rysunku 4. Linie 1 i 4 odpowiadają położeniu zbrojenia ściskanego i rozciąganego, natomiast linie 2 i 3 znajdują się w odległości 30 mm w stosunku do linii skrajnych.

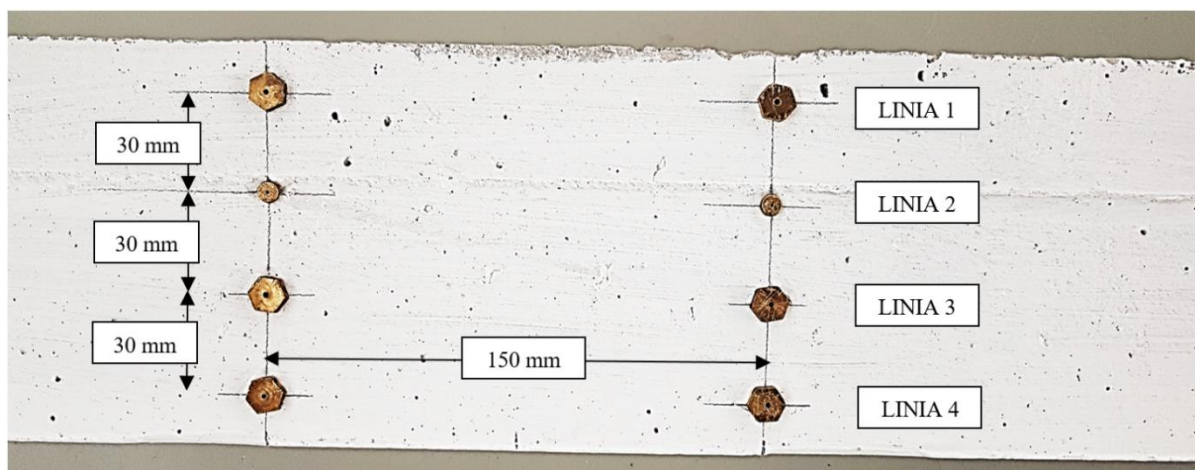
Widok kompletnego stanowiska badawczego pokazano na rysunku 5.

Wartości obciążenia niszczącego, ugięć i odkształceń dla poszczególnych poziomów obciążeń wyznaczono na podstawie badań pod obciążeniem doraźnym. Obciążenie zadawano stopniowo, krokami co 2,0 kN, mierząc na każdym etapie wartości ugięć i odkształceń.

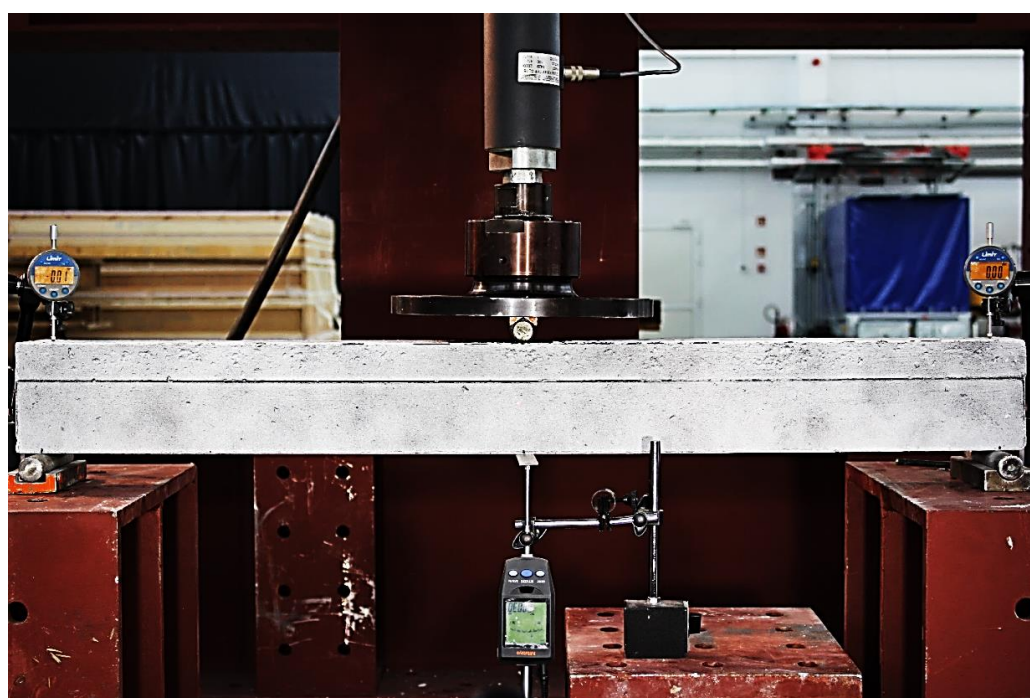
Rozwój zarysowania belek analizowano przy wykorzystaniu optycznego systemu akwizycji danych GOM Aramis. Zestaw pomiarowy składał się z dwóch współpracujących kamer oraz jednostki sterującej, umożliwiającej rejestrację do 5 milionów odczytów z częstotliwością 15 Hz. Procedura pomiarowa polegała na wstępnej kalibracji kamer dla danego obszaru roboczego, naniesieniu deseni w postaci czarnych kropek za pomocą dedykowanego preparatu oraz docelowo rejestracji przemieszczeń punktów pomiarowych w czasie, tak zwanych fasetek.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia czujników przemieszczeń (1), punktów pomiarowych do pomiaru odkształceń (2) oraz podpór (3)



Rys. 4. Położenie punktów pomiarowych w środkowej części belki

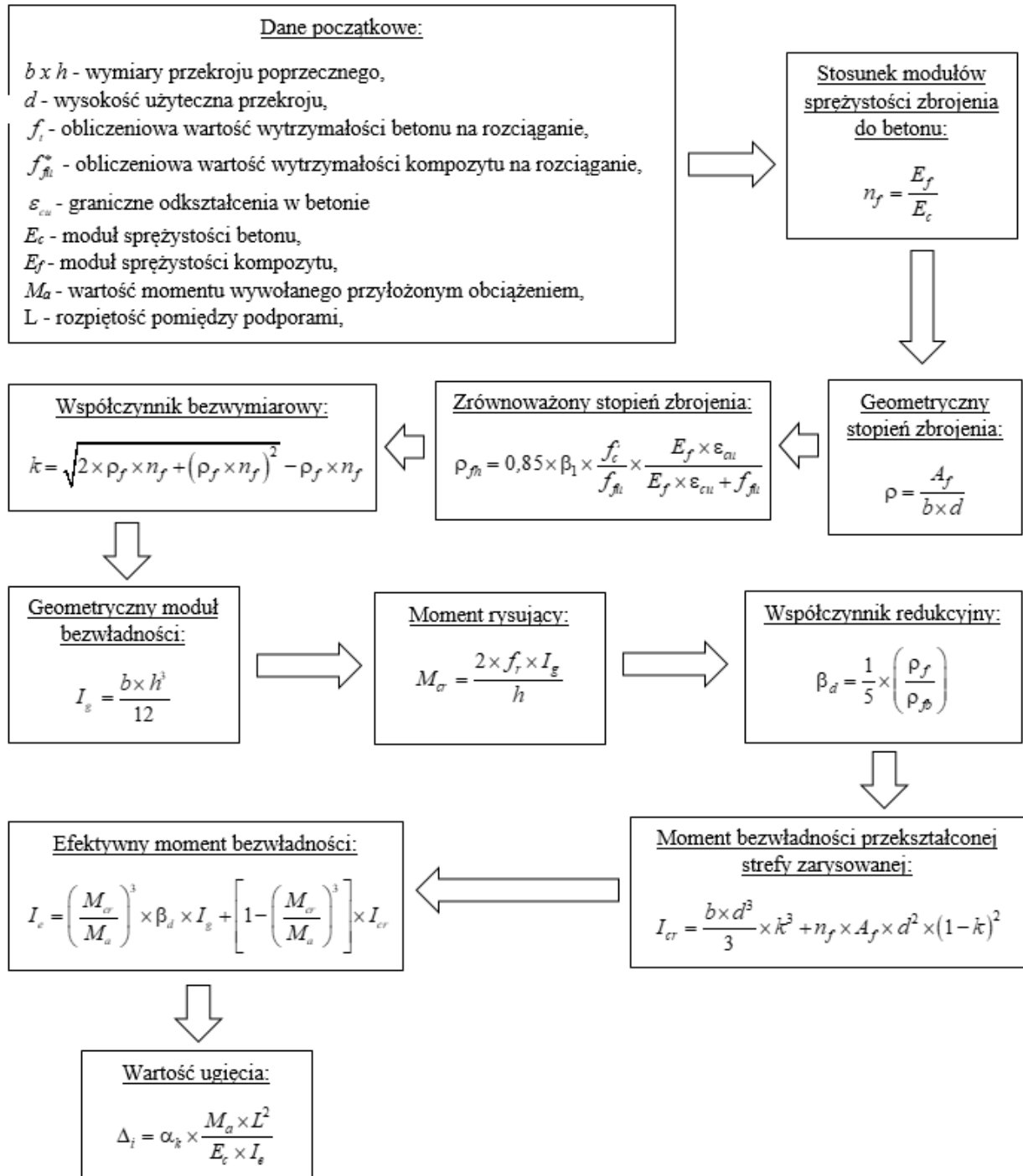


Rys. 5. Widok stanowiska badawczego

2.5. Procedura obliczania ugięcia belki ze zbrojeniem kompozytowym

Obliczenia przeprowadzono na podstawie wytycznych ACI 440:1R-06 (2006) dla belek ze zbrojeniem kompozytowym. Zastosowana norma dotyczy głównie elementów zbrojonych prętami z włókna węglowego, szklanego i aramidowego. Jak dotąd nie opracowano wytycznych dotyczących zbrojenia prętami z włókna bazaltowego. W celu uzyskania najbardziej zbliżonych wyników do wartości zmierzonych podczas testu przyjęto wartość współczynnika bezpieczeństwa równą 1,0. Na podstawie danych z pracy Urbańskiego (2017) zakłada

się, że jest to obecnie najbardziej dokładna metoda obliczeniowa, którą można odwzorować zachowanie się belek zbrojonych prętami BFRP. Założenia amerykańskiej procedury obliczeniowej przyjmują duże wartości materiałowych współczynników bezpieczeństwa wynikające między innymi z braku granicy plastyczności prętów FRP. W celu uzyskania teoretycznego wykresu ugięcia belki zbrojonej prętami BFRP obliczono wartości przewidywanych odkształceń dla każdego z zadanych kroków obciążeń podczas badań pod obciążeniem doraźnym. Procedurę obliczeń przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Algorytm obliczenia teoretycznego ugięcia elementu zbrojonego prętami kompozytowymi

3. Analiza wyników badań

3.1. Właściwości wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych BFRP

Otrzymane wyniki badania prętów zbrojeniowych przedstawiono w tabeli 2, a przykładowe zależności siła rozciągająca – wydłużenie pręta, uzyskane w trakcie badania, pokazano na rysunku 7.

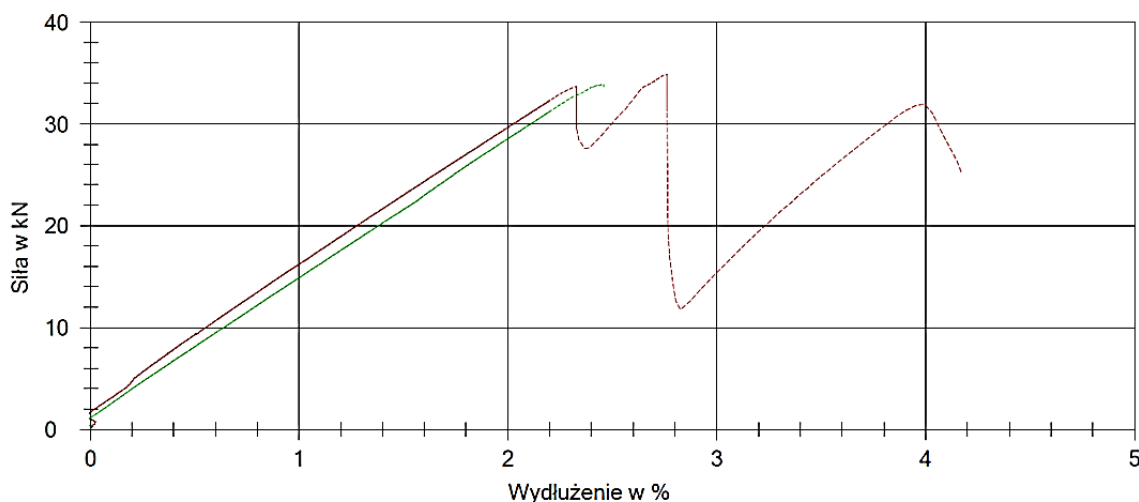
Na wykresie (rys. 7) widać jeden z charakterystycznych dla materiałów kompozytowych mechanizmów zniszczenia, gdy w centralnej części próbki zerwaniu ulegają stopniowo poszczególne partie włókien, włączając do pracy pozostałe mniej wyćężone włókna. Na rysunku 8

przedstawiono widok pręta BFRP po badaniu.

Badane pręty charakteryzowały się ponad dwukrotnie większą wytrzymałością na rozciąganie, a jednocześnie ponad trzykrotnie mniejszą wartością wydłużenia przy zerwaniu w porównaniu do typowych prętów zbrojeniowych ze stali gatunku B500SP o klasie ciągliwości C według danych katalogowych producenta (EPSTAL, 2018). Nie stwierdzono również występowania tak zwanej półki plastycznej. Mechanizm zniszczenia polegał na nagłym zerwaniu włókien bez widocznego przewężenia przekroju poprzecznego oraz bez nieproporcjonalnego wzrostu odkształceń w końcowej fazie testu. Możliwe było jedynie zarejestrowanie pojedynczych pęknięć tuż przed zniszczeniem próbki.

Tab. 2. Wyniki badań materiałowych prętów BFRP

Średnica [mm]	$f_{u,ave}$ [MPa]	σ (dla $f_{u,ave}$)	f^*_u [MPa]	E_f [GPa]	ε_u [%]	σ (dla f^*_u)	ε^*_{fu} [%]
ø6	1180,0	14,3	1147,1	47,6	2,6 %	0,2	2,0



Rys. 7. Wybrane wykresy zależności wydłużenia od wartości obciążenia prętów BFRP



Rys. 8. Widok zerwanego pręta BFRP o średnicy 6 mm

3.2. Analiza stanów odkształcenia belek ze zbrojeniem BFRP

Średnie wyniki pomiarów odkształceń betonu pod obciążeniem doraźnym na różnych wysokościach przekroju belki, w środku rozpiętości przedstawiono na rysunku 9.

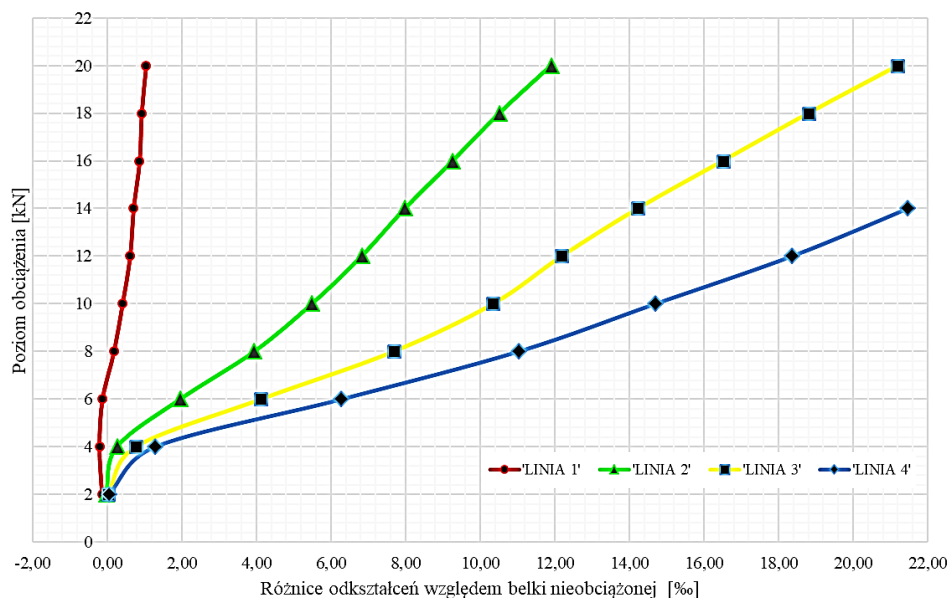
Zauważalny jest niewielki zakres strefy ściskanej w porównaniu do konwencjonalnych belek ze zbrojeniem stalowym, opisany między innymi, w pracach Godyckiego-Ćwirko (1982) i Szarlińskiego i in. (2002). Już przy obciążeniu na poziomie 8,0 kN, co odpowiada 28% wyężenia belki, zakres strefy ściskanej przesuwa się poza środek ciężkości zbrojenia górnego, wywołując tym samym naprężenia rozciągające w prętach zbrojeniowych. Przy zwiększaniu obciążenia, w odległości 0,125 d od górnej krawędzi belek ze zbrojeniem BFRP, pojawiają się wyłącznie odkształcenia wywołane rozciąganiem, osiągając wartości wielokrotnie przekraczające typowe odkształcenia rejestrowane w belkach żelbetowych (Szarliński i in., 2002; Urbański, 2017). Poza fazą początkową (do poziomu 15% wyężenia) przyrost odkształceń ma charakter liniowy w całym zakresie obciążenia. Proces ten postępował aż do zniszczenia elementu poprzez zmiżdżenie strefy ściskanej, zgodnie z założeniami projektowymi, przyjętymi przy wymiarowaniu belek.

Odmienny charakter odkształceń zarysowanych belek zbrojonych prętami BFRP, w porównaniu do belek żelbetowych wynika, między innymi, ze sposobu odkształcania się obu typów zbrojenia. Pręty stalowe odkształcają się sprężysto do osiągnięcia granicy sprężystości (Szarliński i in., 2002). Natomiast pręty BFRP odkształcają się sprężysto aż do ich zerwania. Analizując zwiększenie odkształceń strefy rozciąganej belek ze zbrojeniem kompozytowym należy również mieć na względzie znacznie mniejszą wartość modułu sprężystości prętów BFRP (dla badanych prętów

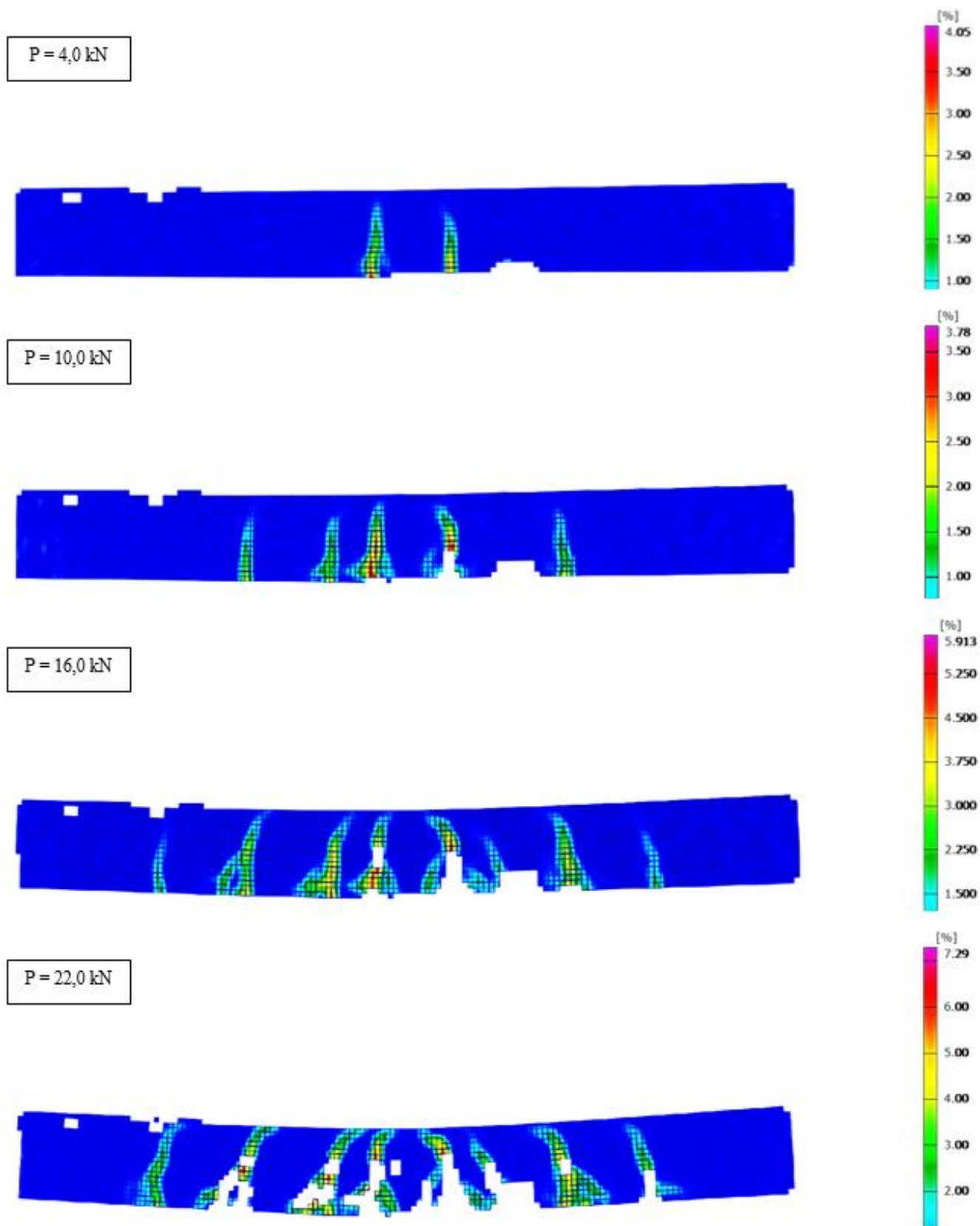
47,6 GPa) w porównaniu do modułu sprężystości typowej stali zbrojeniowej gatunku B500SP (200 GPa).

Na rysunku 10 przedstawiono rozwój zarysowania wraz z mapą odkształceń głównych modelowych belek ze zbrojeniem kompozytowym BFRP w warunkach trójpunktowego zginania. Widok obszaru krytycznego próbki tuż przed zniszczeniem zaprezentowano na rysunku 11. Widoczne na mapach odkształceń jaśniejsze obszary wskazują na głęboki zasięg występowania strefy rozciąganej w betonie, wywołany małą wartością stosunku modułu sprężystości zbrojenia kompozytowego do modułu sprężystości betonu, co w dalszej fazie testu determinowało również znaczny stopień zarysowania elementu. Obserwowany zasięg strefy ściskanej belek nie przekraczał wartości równej odległości osi zbrojenia górnego od krawędzi ściskanej przekroju.

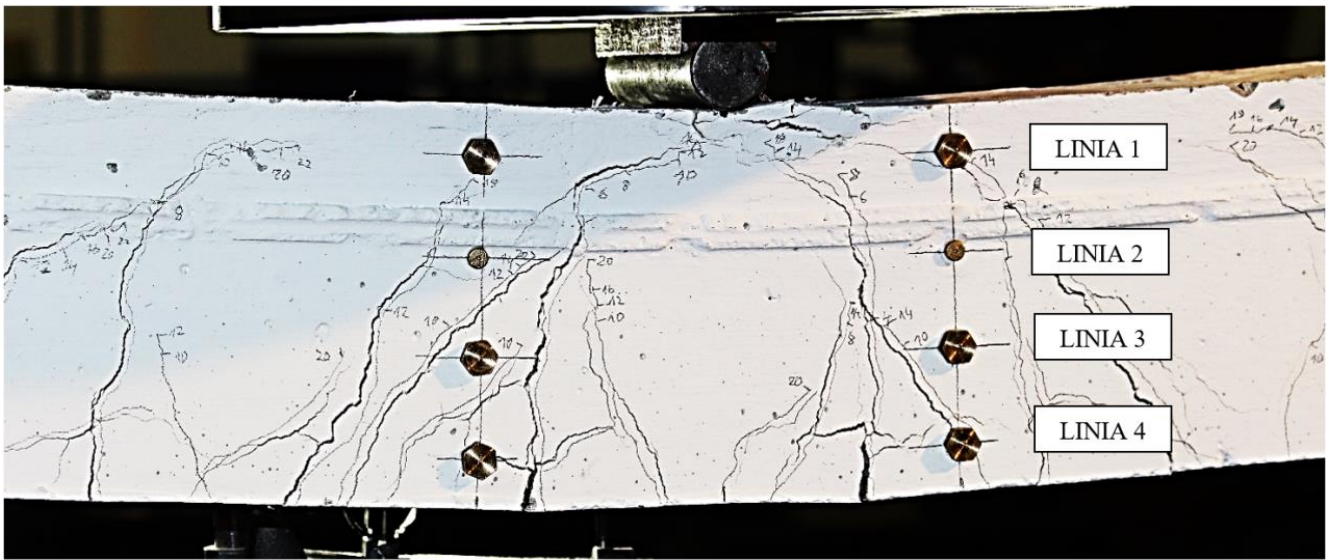
Po przekroczeniu naprężenia rysującego w środkowej części belki powstają rysy prostopadłe do osi podłużnej. Przy dalszym wzroście obciążenia rysy prostopadłe znacząco powiększają się, a w strefie podporowej belki zaczynają pojawiać się rysy ukośne o kącie nachylenia większym od 45°. Zwiększając obciążenie w końcowej fazie badania, można zauważyć znaczny wzrost odkształceń na początku rysy (dolna krawędź belki), przy jednoczesnym równomiernym odkształceniu betonu w poziomie zbrojenia. W końcu następuje zniszczenie belki w wyniku propagacji dominującej rysy prostopadłej w środkowej części belki. W końcowej fazie obciążenia nie dochodzi do lokalnej utraty przyczepności pomiędzy zbrojeniem kompozytowym i otaczającym je betonem. Według Godyckiego-Ćwirko (1982) liczba rys, ich usytuowanie i nachylenie zależą od przyczepności zbrojenia głównego do betonu i naprężeń w prętach. Zatem, do wyjaśnienia rozwoju rys w belkach ze zbrojeniem BFRP niezbędna jest analiza przyczepności prętów do betonu.



Rys. 9. Wykres zmian odkształceń belek BFRP w przekroju przęsłowym (położenie linii pomiarowych pokazano na rys. 4)



Rys. 10. Mapa odkształceń głównych w belce przy różnych wartościach obciążenia P

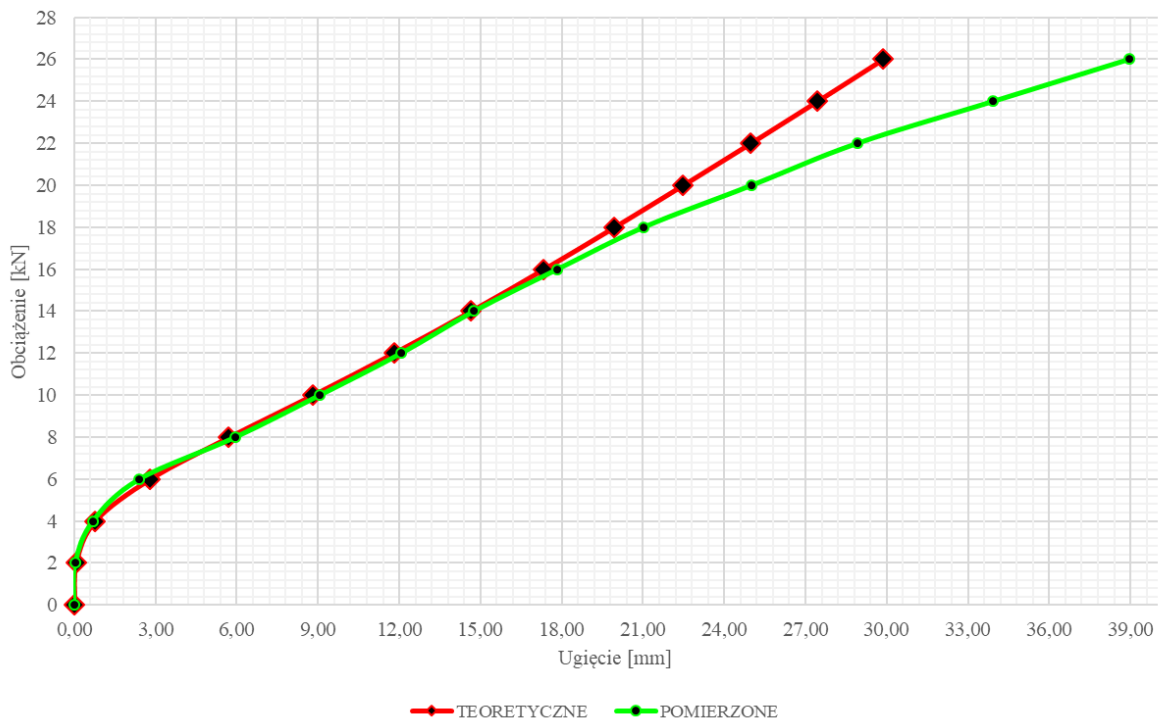


Rys. 11. Widok belki ze zbrojeniem BFRP przed zniszczeniem przy obciążeniu 26,0 kN

4. Porównanie ugięć otrzymanych doświadczalnie z wartościami obliczonymi

Jako podstawę do analizy teoretycznej otrzymanych wyników badań przyjęto wytyczne ACI 440:1R-06 (2006). Na rysunku 12 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń ugięć oraz uśrednionych rezultatów pomiarów, umożliwiające ocenę ich zbieżności. Wyniki badań belek wskazują na przekroczenie stanu granicznego ugięcia (założonego jako $L/250$) już na poziomie 20% wyciężenia.

Na podstawie wyników badań stwierdzono zbieżność wartości obliczonych i pomierzonych do wartości obciążenia równej 22,0 kN, czyli około 78% wyciężenia belek. Średnie odchylenie w tym obszarze wynosiło 0,21 mm (2,22%). Ze względu na stosunkowo małą wartość modułu sprężystości zbrojenia BFRP, sztywność belki zmniejsza się znacznie po zarysowaniu. W związku z tym, efektywny moment bezwładności ma wartość nieznacznie większą od momentu bezwładności bezpośrednio po zarysowaniu, co przekłada się na znaczące wartości ugięć belki ze zbrojeniem kompozytowym.



Rys. 12. Wykres porównawczy wartości pomierzonych ugięć belek BRFP oraz obliczonych na podstawie algorytmu ACI (2006)

5. Podsumowanie

W pracy analizowano parametry wytrzymałościowe prętów zbrojeniowych z włóknem bazaltowym (BFRP) oraz ich wpływ na ugięcie i zarysowanie modelowych belek zbrojonych.

Badania właściwości prętów kompozytowych wykazały, że zależność siła-wydłużenie w próbie rozciągania ma liniowy charakter w całym zakresie obciążenia. W próbie rozciągania prętów nie obserwuje się powstania półki plastycznej, a wartość maksymalnych odkształceń przed zerwaniem jest wielokrotnie większa niż w przypadku granicznych odkształceń typowej stali zbrojeniowej. Wytrzymałość prętów bazaltowych jest dwukrotnie większa od wytrzymałości stali, a moduł sprężystości podłużnej jest czterokrotnie mniejszy.

Charakterystyki wytrzymałościowe prętów kompozytowych mają 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 o znacznej szerokości w poziomie zbrojenia rozciąganego. Ze względu na odporność na korozję prętów BFRP, szerokość rys nie ma takiego znaczenia, jak w konstrukcjach żelbetowych. W końcowej fazie obciążenia, w belkach ze zbrojeniem BFRP, nie dochodzi do lokalnej utraty przyczepności pomiędzy prętami a betonem. Do wyjaśnienia rozwoju rys w belkach ze zbrojeniem BFRP niezbędna jest analiza przyczepności prętów do betonu. Przyrost ugięcia po zarysowaniu jest liniowy w stosunku do przyrostu obciążenia aż do zniszczenia belki.

Rozpatrując zastosowanie wytycznych ACI 440.1R-06 w kontekście praktyki inżynierskiej, z uwagi na znaczne ugięcia belek powodujące przekroczenie warunków stanu granicznego użyteczności już przy 20% ich wyężenia, różnice pomiędzy wynikami teoretycznymi i eksperymentalnymi można uznać za nieistotne. Obciążenia, przy których występują niezgodności wynikowych wartości odkształceń, są wielokrotnie większe od granicznych sił skutkujących niespełnieniem normowych warunków SGU.

Literatura

- ACI 440.1R-06 (2006). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- ACI 440.3R-04 (2004). A. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- ASTM D7205M/D7205M-06 (2016). Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. Subcommittee: D30.10. *ASTM International*, USA.
- Artemenko S.E. (2003). Polymer composite materials made from carbon, basalt and glass fibers. Structure and properties. *Fiber Chemistry*, Vol. 35, 226-229.
- Banibayat P., Patnaik A. (2014). Variability of mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer bars manufactured by wet-layup method. *Materials and Design*, Vol. 56, 898-906.
- Bank L.C. (2006) Composites for Construction: Structural design with FRP materials. Wyd. 1. *John Willey and Sons LTD.*, 560.
- Borhan T.M. (2012). Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials and Design*, Vol. 42, 265-271.
- Branston J, Das S., Kenno S., Taylor C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 124, 878-886.
- Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B. (2015). Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 623-635.
- EPSTAL - stal zbrojeniowa o wysokiej ciągliwości (2018). Pobrano z lokalizacji <http://epstal.pl>, (25.02.2018).
- Fiore V., Di Bella G., Valenza A. (2011). Glass-basalt epoxy hybrid composites for marine applications. *Material Design*, Vol. 32, 2091-2099.
- Godycki-Ćwirko T. (1982). *Mechanika betonu*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 344.
- Immana M., Thorhallsson M. R., Azraguea K. (2017). A mechanical and environmental assessment and comparison of basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rebar and steel rebar in concrete beams. *Energy Procedia*, Vol. 111, 31-40.
- High C., Seliem H. M., El-Safty A., Rizkalla S. H. (2015). Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building materials*, Vol. 96, 37-46.
- Kabay N. (2014). Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, Vol. 50, 95-101.
- Sim J., Park C., Moon D. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures Composites, Part B. *Engineering*, Vol. 36, 504-512.
- Selejdak J., Brózda K. (2016). Zastosowanie kompozytów w budownictwie zrównoważonym, w: Wybrane zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie. *Wydawnictwo PZITB Oddział Opole*, Opole.
- Szarliński J., Winnicki A., Podleś K. (2002). Konstrukcje z betonu w płaskich stanach. Komputerowe wspomaganie analizy i projektowania. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków, 208.
- Urbański M., Łapko A., Garbacz A. (2013). Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*, Vol. 57, 1183-1191.
- Urbański M. (2017). Ocena stanów naprężenia i odkształcenia w belkach z betonu zbrojonego prętami z włókien bazaltowych. Rozprawa doktorska. *Politechnika Warszawska*. Wydział Inżynierii Lądowej. Warszawa, 283.
- Wei B., Cao H., Song S. (2010) Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering A*, 527, 4708-4715.

ANALYSIS OF DEFLECTION AND CRACKING OF CONCRETE BEAMS WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT

Abstract: The behaviour of model beams made of concrete with basalt reinforcing bars (BFRP) in three-point bending test was analysed. The strength parameters of BFRP bars were tested. The bending capacity, deformation of concrete and beam deflection were determined. The obtained results were compared

with the results of the deflection calculation based on the ACI 440: 1R-06 standard. Crack propagation in the model beams under load was analysed using the Aramis 5M optical measuring system. Due to the strength characteristics of the composite reinforcing bars, the beams exhibited significant tensile strains, which resulted in the development of cracks of considerable width. A linear dependence of the model beam deflection versus load was observed. It has been found that the ACI 440: 1R-06 calculation procedure allows to determine deflections of beams reinforced with BFRP bars under short-term load.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach 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).