

# Porównanie ugięcia betonowych belek zbrojonych prętami GFRP, BFRP i ze stali B500

Comparison of deflection of concrete beams reinforced with GFRP, BFRP and B500 steel bars

dr inż. Tomasz Pytlowany (ORCID: 0000-0001-5545-5465), dr inż. Dariusz Leń (ORCID: 0000-0003-0433-027X), dr inż. Kazimierz Piszczek (ORCID: 0000-0002-2821-6132), Politechnika Krakowska, dr inż. Roman Zimka (ORCID: 0009-0008-6861-9586), Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Krośnie

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3610

**Streszczenie:** Głównym celem badań było uzyskanie danych związanych z jakościową oceną sztywności belek betonowych zbrojonych prętami stalowymi EPSTAL B500SP oraz kompozytowymi prętami zbrojeniowymi GFRP i BFRP przy zachowaniu tego samego stopnia zbrojenia belek. Przyjęto schemat statyczny badanych elementów w postaci belki swobodnie podpartej o rozpiętości 1,5 m. Podstawowym opisem zachowania badanych elementów, zarejestrowanym podczas badań, była ścieżka równowagi statycznej opisana w układzie współrzędnych: siła obciążająca  $P$  i ugięcie belki  $u$ , rejestrowane za pomocą czujników, zarejestrowane zależności  $P$ - $u$ . Podane na wykresach wartości ugięcia belek  $u$  są średnią arytmetyczną pomiarów z czujników przemieszczenia. W trakcie badań wykonano również pomiary odkształceń prętów zbrojeniowych w zależności od wartości przyłożonego obciążenia  $P$ . Wyniki tych pomiarów przedstawiono graficznie.

**Słowa kluczowe:** betonowe belki zbrojone, kompozytowe pręty zbrojeniowe (GFRP, BFRP), belki swobodnie podparte.

**Abstract:** The main purpose of the research was to obtain data related to the qualitative assessment of the stiffness of concrete beams reinforced with B500SP EPSTAL steel reinforcement bars and GFRP and BFRP composite reinforcing bars while maintaining the same degree of reinforcement of the beams. A static scheme of the tested elements was adopted in the form of a simply supported beam with a span of 1,5 m. The basic description of the behavior of the tested elements, recorded during the tests, was the static equilibrium path described in the coordinate system: loading force  $P$  and beam deflection  $u$ , recorded using sensors, the recorded  $P$ - $u$  dependencies. The deflection values of the beams  $u$  given in the graphs are the arithmetic mean of the measurements from the displacement sensors. During the tests, measurements of reinforcing bars deformation were also carried out depending on the value of the applied load  $P$ . The results of these measurements are presented graphically.

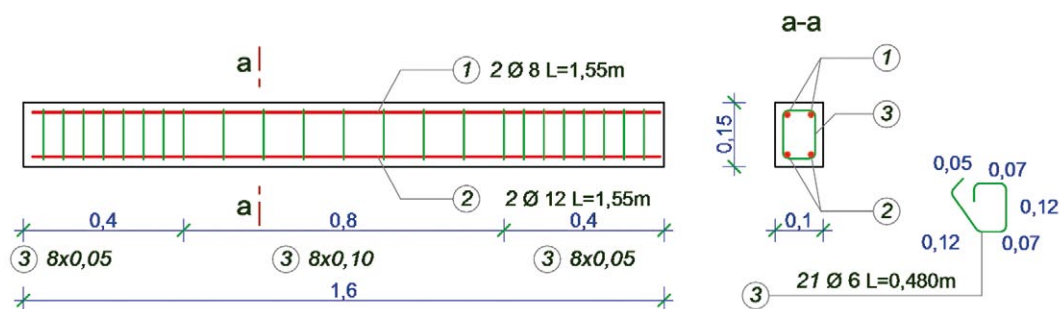
**Keywords:** concrete beams reinforced, composite reinforcing bars (GFRP, BFRP), simply supported beam.

## 1. Wprowadzenie

Grube włókno szklane było znane już w starożytności i służyło głównie jako element zdobniczy. Dopiero od lat trzydziestych ubiegłego wieku rozpoczęto produkcję cienkiego włókna, które w połączeniu z kompozytami polimerowymi znalazło zastosowanie w wielu wyrobach przemysłowych. Materiały te zwane ogólnie FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) początkowo stosowane były w przemyśle lotniczym, stoczniowym, obronnym i chemicznym, a ostatnio coraz częściej znajdują zastosowanie w materiałach do konstrukcji budowlanych. W znaczącym stopniu zwiększyły one możliwości produkowanych materiałów budowlanych, np. papy asfaltowej czy okładzin elewacyjnych. W konstrukcjach inżynierii lądowej z uwagi na odporność na czynniki środowiskowe materiały kompozytowe FRP stały się bardzo użytecznym zamiennikiem konwencjonalnego zbrojenia stalowego. Pręty zbrojeniowe FRP wytwarzane są z ciągłych włókien spajanych żywicą epoksydową lub poliestrową (około 20% powierzchni

przekroju). Do prętów używanych do zbrojenia betonu stosowane jest dodatkowe uzwojenie poprawiające powierzchnię przyczepność. W zależności od rodzaju zastosowanego włókna produkowane są następujące typy kompozytów: GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), węglowy CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), aramidowy (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*) bazaltowy BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*) oraz ostatnio bazaltowy wzmocniony węglowym tzw. HFRP (*Hybrid Fiber Reinforced Polymer*). Większa doraźna wytrzymałość na rozciąganie prętów GFRP i BFRP zapewnia teoretycznie uzyskanie większej nośności przekroju na moment, ale dużo mniejszy moduł sprężystości podłużnej tych prętów od prętów stalowych przyczynia się do większego ugięcia i zarysowania w zginanych elementach betonowych nimi zbrojonych. Dodatkowo charakterystyka wytrzymałościowa prętów kompozytowych powoduje, że nie można liczyć na plastyczne odkształcenia zbrojonych nimi zginanych belek żelbetowych, a utrata nośności nie jest wcześniej sygnalizowana i ma gwałtowny charakter.

Rys. 1. Zbrojenie belek modelowych



## 2. Cel i zakres badań

Głównym celem przeprowadzonych badań było uzyskanie danych związanych z jakościową oceną sztywności belek betonowych zbrojonych prętami wykonanymi ze stali zbrojeniowej B500SP EPSTAL oraz prętami zbrojeniowymi kompozytowymi wykonanymi z włókien GFRP i BFRP przy zachowaniu jednakowego stopnia zbrojenia belek.

Plan badań obejmował zbadanie trzech belek zbrojonych w strefie rozciąganej prętami stalowymi i po trzy belki zbrojone prętami kompozytowymi GFRP i BFRP, wszystkie o średnicy 12 mm. Wymiary badanych elementów wynosiły:  $L = 1600$  mm,  $h = 150$  mm i  $b = 100$  mm. Zbrojenie konstrukcyjne belek wykonano z 2 prętów stalowych o średnicy 8 mm. Jako zbrojenie na ścinanie zastosowano strzemiona z prętów stalowych o średnicy 6 mm. Układ zbrojenia belek przedstawiono na rysunku 1.

We wszystkich belkach na głównych prętach zbrojeniowych umieszczono foliowe tensometry elektrooporowe TFs-5/120 firmy TENMEX. Po montażu tensometrów elektrooporowych wszystkie belki zostały równocześnie zabetonowane zakupionym w wytwórni betonem i zawirowane (rys. 2). Belki dojrzewały w jednakowych warunkach laboratoryjnych.



Rys. 2. Belki w formach po zalaniu betonem

## 3. Zastosowane materiały

Do wszystkich belek zastosowano ten sam beton towarowy zakupiony bezpośrednio w wytwórni o oznaczeniu klasy C25/30 i konsystencji S2, dla którego moduł sprężystości podłużnej  $E_{cm} = 32$  GPa. Do zbrojenia belek z włóknem szklanym o matrycy z żywicy epoksydowej GFRP zastosowano pręty o średnicy 12 mm TROKOTEX o parametrach [6]:

- doraźna wytrzymałość na rozciąganie  $R_{T,i} \geq 1100$  MPa,

- moduł sprężystości podłużnej  $E_{T,i} = 43\text{--}54$  GPa.

Do zbrojenia belek z włóknem bazaltowym o matrycy z żywicy epoksydowej BFRP zastosowano pręty o średnicy 12 mm ORLIMEX o parametrach [7]:

- charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie  $f_{uk} \geq 1000$  MPa,

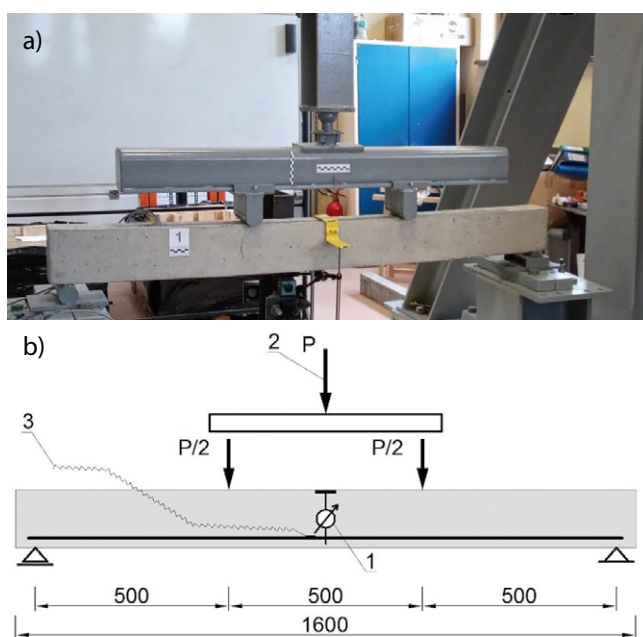
- moduł sprężystości podłużnej  $E_m = 55$  GPa.

Do zbrojenia belek z prętami stalowymi użyto prętów stalowych o średnicy 12 mm EPSTAL o parametrach [5]:

- charakterystyczna granica plastyczności  $f_{yk} \geq 500$  MPa,
- charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie  $f_{tk} \geq 515$  MPa,
- moduł sprężystości podłużnej  $E_s = 200$  GPa.

## 4. Metodyka badań

Badania belek przeprowadzono w Laboratorium badań elementów i konstrukcji inżynierskich Państwowej Akademii Nauk Stosowanych w Krośnie. Przyjęto schemat statyczny badanych elementów w postaci belki wolnopodpartej o rozpiętości 1,5 m, obciążonej dwiema siłami skupionymi w rozstawie co 0,5 m. Widok i schemat ideowy stanowiska badawczego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Stanowisko badawcze: a) widok ogólny, b) schemat ideowy

Badania doświadczalne wykonywano, wykorzystując następujący osprzęt pomiarowy:

- dwa indukcyjne czujniki przemieszczeń firmy HBM (1) mierzące ugięcie belek, zlokalizowane po obydwu stronach belki;
- siłomierz Instron PM250LG2 +/-250 kN, klasy 0,5 z wbudowanym czujnikiem położenia typ WLC w siłowniku hydrauliczny Instron PL250N +/-250 kN, klasa 0,5 (2);
- foliowe tensometry elektrooporowe typu TFs-5/120 o bazie pomiarowej 8,2 mm, firmy TENMEX naklejone na pręty zbrojeniowe (3).

Użyty osprzęt połączony był ze stanowiskiem pomiarowym, w którego skład wchodziły:

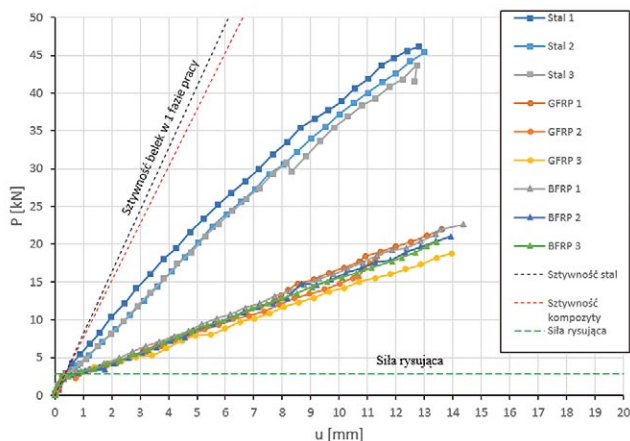
- centrala sterownicza siłownika hydraulicznego Instron PL250N +/-250 kN, klasa 0,5;
- ośmiokanałowy wzmacniacz QuantumX firmy HBM;
- komputer z oprogramowaniem CATMAN-EASY.

Obciążenie belek realizowano poprzez kontrolę przyrostu przemieszczenia tłoka siłownika hydraulicznego. Przed przystąpieniem do właściwych badań belki obciążano wstępnie siłą o wartości ok. 1,5 kN w celu niwelacji ewentualnych luzów stanowiska badawczego. Właściwe badania polegały na stopniowym zwiększaniu obciążenia badanych belek bez ich odciążania. Przyrost obciążenia realizowano przyjmując sekwencyjne zwiększanie wydłużenia tłoka siłownika hydraulicznego. Obciążenie belek przeprowadzano w dwóch etapach. W pierwszym przyjęto zakres przyrostu wydłużenia tłoka o 0,25 mm w każdym kroku obciążeniowym. Etap ten trwał do momentu powstania zarysowania elementu, wyniki planowane są do wykorzystania w innym opracowaniu. Następnie wartość przemieszczenia tłoka w każdym kroku obciążeniowym zwiększono do wartości 0,5 mm. W obu etapach czas przyrostu wydłużenia tłoka wynosił 10 s. Badania belek prowadzono do momentu osiągnięcia przez nich ok. 14 mm ugięcia. Belki będą wykorzystane do prowadzenia dalszej analizy. Podczas badań pomiarom podlegały: siła obciążająca  $P$ , ugięcie belek  $u$ , mierzone w środku ich rozpiętości oraz odkształcenia prętów zbrojeniowych  $\epsilon$ .

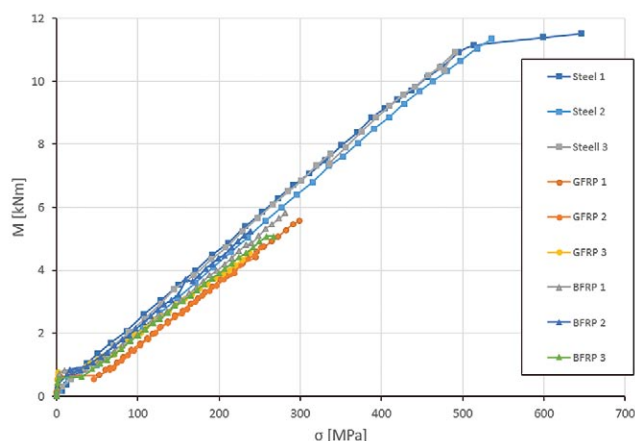
## 5. Wyniki badań doświadczalnych

Podstawowym opisem zachowania się badanych elementów, rejestrowanym podczas badań była statyczna ścieżka równowagi opisana w układzie współrzędnych: siła obciążająca  $P$  i ugięcie belki  $u$ , rejestrowane za pomocą czujników (1). Zarejestrowane zależności  $P$ - $u$  przedstawiono na rysunku 4. Podane na wykresach wartości ugięcia belek  $u$  są średnią arytmetyczną pomiarów z czujników przemieszczeń (1).

Wartości naprężeń w prętach zbrojeniowych  $\sigma$  wyznaczono, przyjmując nominalne wartości modułu sprężystości podłużnej Younga zastosowanych materiałów. Dla stali zbrojeniowej wartość modułu Younga przyjęto równą 200 GPa. Dla



Rys. 4. Wykresy  $P$ - $u$  badanych belek



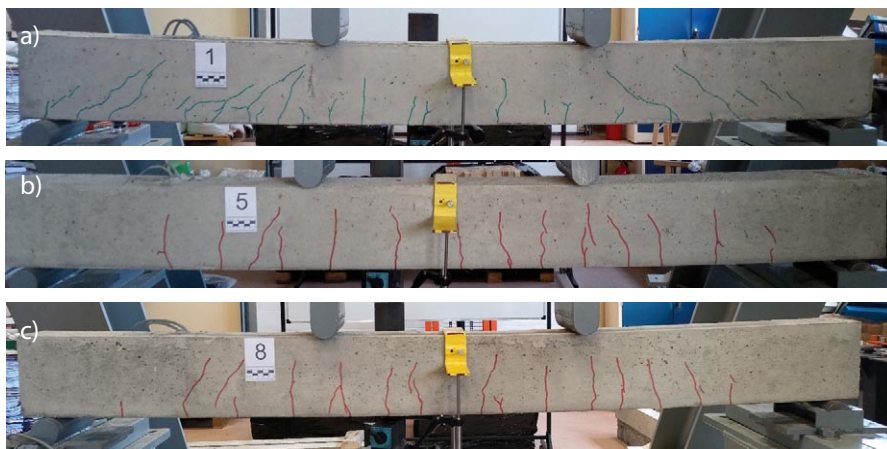
Rys. 5. Wykresy zależności  $M$ - $\sigma$  badanych belek

prętów kompozytowych GFRP i BFRP przyjęto wartości modułu Younga jako wartości średnie z zakresów podawanych przez producentów, tj. 48,5 GPa dla prętów GFRP i 55 GPa dla prętów BFRP (porównaj pkt. 2 artykułu). Naprężenia te odniesiono do wartości momentów zginających  $M$ , obliczonych na podstawie pomierzonych wartości sił  $P$  obciążających belki. Uzyskane wyniki przedstawiono w formie graficznej na rysunku 5.

Stopniowy wzrost obciążenia belek w trakcie prowadzonych badań umożliwił obserwację przyrostu rozwarcia rys i ich propagację. Zróżnicowany zakres maksymalnego obciążenia dla belek zbrojonych prętami stalowymi i belek zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP i BFRP, wynikający z charakterystyki zastosowanych materiałów sprawił, że uzyskane wartości rozwarcia rys, ich wysokość i rozmieszczenie były dość zróżnicowane. W belkach zbrojonych prętami stalowymi wyraźnie widoczne były rysy pionowe, występujące w obszarze działania maksymalnego momentu zginającego oraz rysy ukośne, występujące w okolicach podparć. W przypadku belek zbrojonych prętami kompozytowymi występowały głównie rysy pionowe, zlokalizowane przede wszystkim w obrębie obszaru działania maksymalnego momentu zginającego. Porównanie zarysowania badanych elementów, zbrojonych różnymi wkładkami pokazano na rysunku 6.

**Rys. 6.** Widok belek podczas badania:

a) belka zbrojona prętami stalowymi,  
b) belka zbrojona prętami GFRP, c) belka zbrojona prętami BFRP



## 6. Podsumowanie

- Badania wykonanych belek wykazały, że poza zakresem sprężystym, przy powierzchniowo identycznym zbrojeniu, ugięcie belki zbrojonej prętami stalowymi jest dużo mniejsze niż belek zbrojonych prętami z włókna szklanego i bazaltowego. Dopuszczalne przez normę [4] ugięcie belki równe  $l/250$  (wynoszące 6 mm), zostało osiągnięte dla obciążenia belki zbrojonej stalą siłą około 25 kN, dla belek zbrojonych prętami szklanymi lub bazaltowymi zostało osiągnięte przy sile około 10 kN. Stąd można oszacować, że belki zbrojone włóknem szklanym lub bazaltowym przy identycznym zbrojeniu, z uwagi na stan graniczny użyteczności mogą być obciążone jedynie na poziomie  $10/25=40\%$  obciążenia belki zbrojonej stalą. Krotność zwiększenia powierzchni wkładek, aby uzyskać ugięcie porównywalne z prętami stalowymi wymaga dalszych badań.
- Dla belki zbrojonej prętami stalowymi występuje klasyczny spadek sztywności przekroju w chwili pojawienia się rysy; ścieżka przebiegu wykresu ugięcie-obciążenie doznaje obrotu w punkcie, a następnie występuje lekko paraboliczny przebieg wzrostu ugięć. Dla belki zbrojonej szkłem/bazaltem w momencie zarysowania przekroju wyraźnie odznacza się krótka półka plastyczna (wzrost ugięć przy niezmiennym poziomie obciążeni); następnie przebieg prawie liniowo proporcjonalny wzrostu ugięć. Analizując powstałe rysy, należy stwierdzić początkowe zarysowanie prawie do połowy belki, a następnie rysa szybko doszła do 80% wysokości przekroju (nie jest to obserwowane przy belkach zbrojonych stalą).

## BIBLIOGRAFIA

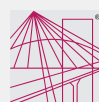
- [1] ACI 440.1R-06, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440. American Concrete Institute, USA, 2006
- [2] ACI 440.3R-04, Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures ACI Committee 440 American Concrete Institute, USA, 2004
- [3] ASTM D7205M/D7205M-06 Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. Subcommittee: D30.10. ASTM International, USA, 2016
- [4] PN-EN 1992-1-1:2008/Ap1: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Warszawa, PKN, 2010
- [5] EPSTAL – stal zbrojeniowa o wysokiej ciągliwości. Pobrano z lokalizacji <http://epstal.pl>, (25.02.2023)
- [6] ITB-KOT-2018/0575 Krajowa Ocena Techniczna, Pręty kompozytowe TROKOTEX
- [7] Certyfikat nr 060-046342 dla ORLIMEX CZ, Budowlany Instytut Techniczno-Badawczy Praha, 14 lutego 2018
- [8] Kosior-Kazberuk M., Wasilczyk R., Analiza ugięć i zarysowania betonowych belek ze zbrojeniem niemetalicznym, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 4/2018, str. 173–183
- [9] Kotynia R., Kaszubska M., Badania wpływu zbrojenia głównego na nośność ścinania betonowych belek, Badania Doświadczalne Elementów i Konstrukcji Betonowych, Katedra Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, zeszyt nr 23, 2020
- [10] Kotynia R., Szczepański K., Analiza obliczeniowa dwuprzęsłowych belek betonowych zbrojonych prętami FRP według wybranych norm, Builder 5/2021
- [11] Kotala B., Badanie właściwości i efektywności elementów betonowych zbrojonych tekstyliami wysokiej wytrzymałości, praca doktorska, Gliwice, 2010
- [12] Urbański M., Ocena stanów naprężenia i odkształcenia w belkach z betonu zbrojonego prętami z włókien bazaltowych, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Warszawa, 283, 2017



Polski Związek Inżynierów  
i Techników Budownictwa (PZITB),  
Oddział Opole



Wydział Budownictwa  
i Architektury  
Politechnika Opolska



Opolska Okręgowa  
Izba Inżynierów  
Budownictwa

Komisja Inżynierii  
Budowlanej  
Oddziału PAN  
w Katowicach

6<sup>TH</sup> INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC CONFERENCE  
22-24 kwietnia 2024 r.

ECCE 2024  
ENVIRONMENTAL CHALLENGES  
IN CIVIL ENGINEERING

| HOTEL MERCURE OPOLE, ul. Krakowska 57/59, 45-018 Opole, Polska | <https://all.accor.com/hotel/3405/index.en.shtml> |  
| Politechnika Opolska WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I ARCHITEKTURY |  
| ul. Katowicka 48, 45-061 Opole, Polska | <https://wbia.po.edu.pl/> | [www: https://ecce2024.po.edu.pl/](http://www.ecce2024.po.edu.pl/)