

dr inż. Agnieszka Wiater

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

prof. dr hab. inż. Tomasz Siwowski

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

mgr inż. Juliusz Żach

Renitens

mgr inż. Paweł Studziński

Renitens

Badania belek betonowych sprężonych prętami CFRP

Research on concrete beams prestressed with CFRP bars

Streszczenie

Korozja stali zbrojeniowej jest powszechnym zagrożeniem dla konstrukcji żelbetowych, szczególnie narażonych na działanie środowiska morskiego, agresywnego i wysoce korozyjnego. Opracowanie nowych technik i materiałów w celu przeciwdziałania problemom związanym z korozją zbrojenia jest konieczne. W ciągu ostatnich 20 lat zastosowanie prętów kompozytowych z włóknami węglowymi (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) jako zbrojenia głównego stało się obiecującą alternatywą. Powszechnie wiadomo, że pręty CFRP zdobyły ogromną popularność ze względu na swoje właściwości materiałowe, takie jak doskonała wytrzymałość na rozciąganie, wysoki stosunek wytrzymałości do masy, odporność na korozję, niemagnetyczność i wysoką wytrzymałość zmęczeniową. Pręty CFRP zdobyły ogromną popularność dzięki swoim właściwościom, takim jak odporność na korozję, niemagnetyczność, doskonała wytrzymałość na rozciąganie, wysoki stosunek wytrzymałości do masy oraz wysoka wytrzymałość zmęczeniowa.

W literaturze technicznej dostępnych jest niewiele badań dotyczących skuteczności sprężonych prętów CFRP jako zbrojenia betonowych elementów zginanych. W związku z tym wiedza na temat zachowania takich elementów pozostaje niewystarczająca. Niniejszy referat przedstawia wyniki badań przeprowadzonych na belkach betonowych zbrojonych sprężonymi prętami CFRP. Badania koncentrowały się na analizie belek poddanych zginaniu, ze szczególnym uwzględnieniem zależności siła-przemieszczenia, mechanizmów zniszczenia, nośności oraz schematów zarysowania. Uzyskane wyniki pozwoliły również zweryfikować przyjętą metodę projektowania belek betonowych ze sprężonymi prętami CFRP w zakresie stanów granicznych nośności i użytkowości.

Abstract

Corrosion of reinforcing steel is a common threat to reinforced concrete structures, particularly those exposed to marine environments, which are aggressive and highly corrosive. The development of new techniques and materials to address issues related to reinforcement corrosion is essential. Over the past 20 years, the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) bars as primary reinforcement has become a promising alternative. It is well known that CFRP bars have gained significant popularity due to their material properties, such as excellent tensile strength, high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, non-magnetic nature, and high fatigue strength.

There is limited research available in the technical literature concerning the effectiveness of prestressed CFRP bars as reinforcement in concrete flexural members. Consequently, knowledge about the behavior of such elements remains insufficient. This paper presents the results of tests conducted on concrete beams reinforced with prestressed CFRP bars. The research focused on the analysis of beams subjected to bending, with particular attention paid to force-displacement relationships, failure mechanisms, load-bearing capacity, and cracking patterns. The obtained results also allowed for the verification of the adopted design approach for concrete beams with prestressed CFRP bars in terms of ultimate and serviceability limit states.

1. Wprowadzenie

Konwencjonalne cięgna stalowe w konstrukcjach sprężonych są podatne na korozję, która prowadzi do obniżenia sztywności, wytrzymałości i trwałości konstrukcji. Najlepszym rozwiązaniem problemu korozji jest zastosowanie niemetalicznych materiałów, takich jak kompozyty włókniste (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*), które cechują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, a ponadto są odporne na korozję, niemagnetyczne i lekkie. Kompozyty FRP mogą stanowić alternatywę dla stalowych cięgien w konstrukcjach sprężonych [1], [2]. W ostatnich latach opracowano cięgna i pręty z kompozytu CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) do stosowania jako zbrojenia w betonie. Pręty CFRP oferują lepszą odporność na korozję i zmęczenie materiału w porównaniu do konwencjonalnej stali. Zbrojenie CFRP umożliwia budowę konstrukcji zbrojonych i sprężonych o znacznie wydłużonej trwałości w środowiskach korozyjnych w porównaniu do tradycyjnych konstrukcji żelbetowych. Jednakże zarówno pręty/cięgna CFRP, jak i beton są materiałami kruchymi. Dlatego elementy betonowe sprężone prętami lub cięgnami CFRP mają tendencję do gwałtownego zniszczenia. Brak ciągliwości stanowi jedno z największych wyzwań w zastosowaniach materiałów CFRP jako zbrojenia sprężającego.

W ciągu ostatnich trzech dekad przeprowadzono wiele badań mających na celu ocenę przydatności CFRP do sprężania konstrukcji betonowych. Większość prac badawczych koncentrowała się na zachowaniu konstrukcji sprężonych CFRP i wykazała ich zadowalające parametry użytkowe [3], [4]. Jednak dla powszechnej akceptacji i szerokiego zastosowania prętów CFRP w inżynierii lądowej konieczne jest zbadanie długoterminowego zachowania i trwałości konstrukcji sprężonych.

W Polsce kompozyty CFRP są szeroko stosowane od połowy lat 90. XX wieku do wzmacniania konstrukcji budowlanych, w tym mostów [5]. Początkowo CFRP stosowano jedynie w formie pasywnych taśm, jednak od połowy lat 2000 wdrażano również technologie sprężania taśm CFRP [6], [7]. Prowadzono także badania nad zastosowaniem prętów CFRP metodą NSM (*Near Surface Mounted*) do wzmacniania konstrukcji [8]. Z kolei do zbrojenia nowych elementów betonowych wykorzystywano jedynie pręty z kompozytu GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) [9], [10]. Głównym powodem braku zainteresowania prętami/cięgnami CFRP do zbrojenia betonu w Polsce była ich wysoka cena. Obecnie cena prętów CFRP jest znacznie niższa, na rynku pojawili się krajowi producenci tych elementów, a w inwestycjach publicznych coraz częściej uwzględnia się koszty cyklu życia (czyli trwałość). W takiej sytuacji zastosowanie prętów/cięgien CFRP, z uwagi na ich zalety (głównie odporność na korozję), staje się realną alternatywą przy budowie nowych konstrukcji.

Większość nowych mostów w Polsce powstaje z typowych prefabrykowanych belek betonowych sprężonych stalowymi cięgnami. Głównym celem badań autorów było zatem wstępne sprawdzenie możliwości zastosowania prętów CFRP jako zamiennika stali w prefabrykowanych belkach mostowych. Celem uzupełniającym było opracowanie i eksperymentalna weryfikacja procedury projektowania belek betonowych sprężonych prętami CFRP oraz sprawdzenie nowej metody sprężania. W ramach obecnych badań zaprojektowano, wykonano i przebadano trzy belki z betonu wysokiej wytrzymałości, sprężone prętami CFRP, w skali naturalnej. Wyniki badań pozwoliły ocenić zachowanie konstrukcji pod obciążeniem oraz porównać ugięcia i nośność uzyskane eksperymentalnie z wartościami obliczonymi zgodnie z obowiązującymi procedurami projektowymi. W ten sposób dokonano częściowej oceny metody projektowania belek betonowych zbrojonych sprężonymi prętami CFRP w stanach granicznych.

2. Materiały

2.1. Beton

W badanych belkach zastosowano beton wysokiej wytrzymałości o następujących parametrach materiałowych:

- a) klasa betonu: C60/75 zgodnie z normą EN 1992-1-1 [11]:
 - wytrzymałość na ściskanie $f_c = 60$ MPa;
 - moduł sprężystości $E_{cm} = 36.4$ GPa,
 - graniczne odkształcenie przy ściskaniu $\epsilon_{cu} = 0.003$.
- b) klasa ekspozycji: XC4, XF4 zgodnie z EN 1992-1-1 [11];
- c) zawartość chlorków: Cl 0,20;
- d) rodzaj i zawartość cementu: CEM II/A-M (S-LL) 52.5N, 415 kg/m³;
- e) kruszywo: dolomitowe; maksymalna średnica ziarna $D_{max} = 16$ mm,
- f) wskaźnik W_{eff}/C : 0,38;
- g) klasa konsystencji: S4 zgodnie z EN 1992-1-1 [11].

2.2. Pręty CFRP

Pręty kompozytowe CFRP użyte w badaniach zostały dostarczone przez firmę Solidian z Niemiec. Pręty o nominalnej średnicy 6 mm mają okrągły przekrój z żebrowaniem spiralnym i są wykonane z włókien węglowych oraz żywicy epoksydowej (Fot. 1).



Fot. 1. Pręty CFRP zastosowane w badaniach.

Zgodnie z danymi producenta przyjęto następujące minimalne charakterystyki materiałowe:

- zawartość włókien w prętach CFRP: $\geq 60\%$,
- charakterystyczna krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie w odniesieniu do nominalnego pola przekroju: $\geq 2100 \text{ MPa}$,
- średnia krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie w odniesieniu do nominalnego pola przekroju: $\geq 2500 \text{ MPa}$,
- średni moduł sprężystości w odniesieniu do nominalnego pola przekroju: $\geq 155 \text{ GPa}$.

2.3. Modele badawcze

Do badań przewidziano trzy belki z betonu wysokiej wytrzymałości sprężone prętami CFRP. Belki zostały zaprojektowane głównie zgodnie z amerykańską normą ACI 440.4R-04 [12], a także w oparciu o normy uzupełniające: ACI 440.1R-15 [13], ACI 318-19 [14], CAN/CSA S6-19 [15], CAN/CSA S806-12 [16] oraz EN 1992-1-1 [11].

Przyjęto do obliczeń prostokątny przekrój poprzeczny belek został z uwzględnieniem następujących zaleceń:

- zalecana wysokość belki h dla belek swobodnie podpartych wg EN 1992-1-1 [11], Tabela 7.4N, powinna mieścić się w zakresie: $h \leq l/14$, $h \geq l/20$;
- zalecana wysokość belki h wg ACI 318-19 [14] powinna wynosić: $h = l/16$;
- zalecany stosunek wysokości do szerokości (h/w) wg ACI 318-19 [14] powinien mieścić się w przedziale od 1,5 do 2,0.



Rys.1. Geometria badanych belek.

Długość belek została dobrana z uwzględnieniem zgodności z praktyką inżynierską i standardami laboratoryjnymi, reprezentatywności zachowania rzeczywistej konstrukcji w skali możliwej do odwzorowania w warunkach laboratoryjnych oraz osiągnięcia wysokiego momentu zginającego przy stosunkowo niewielkich siłach tnących. Ostatecznie zaprojektowano belki o wysokości 27 cm, szerokości 15 cm i długości 480 cm, spełniające powyższe zalecenia. Rozpiętość teoretyczna belki wynosi 450 cm (z 15-centymetrowym przewieszeniem przy każdym podporze).

Ze względu na ograniczenia techniczne, maksymalną liczbę sprężonych prętów w jednym rzędzie ograniczono do trzech. Przewidziano pięć prętów sprężających w dwóch rzędach jako zbrojenie główne na zginanie. Pionowy odstęp między rzędami wynosił 43 mm i wynikał z ograniczeń technicznych mechanizmu sprężającego. W dolnym rzędzie zastosowano trzy a w górnym rzędzie dwa pręty GFRP o średnicy 12 mm na całej długości belki. Zastosowano również strzemiona GFRP w celu zminimalizowania wpływu sił tnących na zginanie. Strzemiona miały średnicę 4 mm i były rozmieszczone co 5 cm. Otulina betonowa górna i dolna belki sprężonej wynosiła 40 mm, uwzględniając wpływ rozszerzalności cieplnej oraz efektu Hoyera, zgodnie z normą CAN/CSA S806 [16].

2.4. Proces sprężania

Z uwagi na to, że na końcach prętów nie przewidziano stałych zakotwień, jak ma to miejsce w konstrukcjach sprężanych metodą naciągu wtórnego, zakotwienie pręta sprężanego wykonano metodą naciągu wstępnego, który uzyskuje się poprzez przyczepność na styku pręt–beton. Naprężenia przyczepności, aktywowane po zwolnieniu pręta, maleją od wartości maksymalnej na samym końcu belki do zera na pewnej odległości. Ze względu na kruche zachowanie prętów CFRP konieczne było zastosowanie specjalnej procedury sprężania. Użyto specjalnie zaprojektowanych zacisków, które pozwalały zaciskać pręty węglowe bez ich uszkodzenia lub zgniecenia. Opracowano również specjalne deskowanie belek, dostosowane do sił sprężających i ułatwiające cały proces sprężania. Każdy pręt był indywidualnie naciągany, a jego zachowanie monitorowano za pomocą tensometru, wykonując odczyty co minutę.

Na dzień przed betonowaniem pręty zostały wstępnie sprężone siłą 30 kN w celu sprawdzenia poprawności działania zacisków i wykrycia ewentualnych wadliwych prętów. Po zabetonowaniu, pręty były sprężane do projektowanej siły sprężającej, a mieszanka betonowa została dokładnie zagęszczona.

Zdecydowano się sprężyć pręty CFRP siłą odpowiadającą 60% charakterystycznej krótkotrwałej wytrzymałości na rozciąganie. Wartość ta odpowiada maksymalnemu dopuszczalnemu naprężeniu przy sprężaniu (ang. *jacking stress*) dla CFRP, zgodnie z normą ACI 440.4R-04 [12], Tabela 3.3. Siła sprężająca została ustalona na poziomie 35,6 kN na pręt, co daje łączną siłę początkową równą 178,1 kN. Obliczenia projektowe wskazywały na całkowite straty sprężania rzędu 18,78%, co skutkowało końcową siłą sprężającą równą 144,7 kN. Ostateczne siły sprężające, zmierzone za pomocą tensometrów podczas monitorowania procesu wytwarzania belek, zostały zestawione w Tabeli 1, gdzie pokazano również niewielkie różnice w wartości siły sprężającej dla każdej z belek.

Tabela 1. Siły sprężające w poszczególnych prętach belek

Nr belki	Nr pręta (wg Rys.1)	Siła sprężająca [kN]		
		Odczyty początkowe (po zabetonowaniu)	1 dzień po betonowaniu	14 dni po betonowaniu
1	1	35.76	35.57	35.33
	2	35.42	35.17	34.79
	3	35.36	34.73	34.51
	4	35.64	35.56	35.53
	5	35.85	35.69	35.50
2	1	36.77	36.58	36.55
	2	36.90	36.31	36.48
	3	36.85	36.41	36.62
	4	36.77	36.52	36.75
	5	36.72	36.36	36.85
3	1	36.94	n/a	37.70
	2	37.01	n/a	37.64
	3	37.00	n/a	37.72
	4	37.04	n/a	37.84
	5	36.92	n/a	37.81

3. Procedura badawcza

Belki zostały poddane badaniom w schemacie trójpunktowego zginania, podparte na dwóch stalowych rolkach w rozstawie 4,5 m (Fot. 2). Obciążenie przykładano za pomocą siłownika hydraulicznego o maksymalnym zakresie siły 630 kN. Obciążenie było przyłożone w sposób kontrolowany przez przemieszczenie, ze stałą prędkością przyrostu wynoszącą 1,0 lub 0,5 mm/min. Belki były obciążane statycznie w siedmiu rosnących poziomach obciążenia aż do zniszczenia. Poziomy obciążenia zostały ustalone na podstawie obliczeń projektowych przedstawionych w tabeli 2.



Fot. 2. Belka na stanowisku badawczym

Tabela 2. Program obciążania belek

Lp.	Obciążenie	Prędkość	Przewidywane ugięcie	% momentu rysującego	% projektowanej nośności	Uwagi
	[kN]	[mm/min]	[mm]	[%]	[%]	
1.	11.6	1	2.62	60.0	54.9	60% momentu rysującego
2.	12.0	0.5	2.72	62.2	56.5	
3.	17.9		4.05	92.7	80.6	$0.5 \cdot \sqrt{f'_c}$ wg [11], Tabela 3.2
4.	19.3		5.10	100.0	86.3	Moment rysujący
5.	22.7		9.01	115.6	100	Nośność obliczeniowa
6.	52.4		66.46	222.0	221.6	Nośność nominalna
7.			Zniszczenie			

Belki zostały zaprojektowane w taki sposób, aby ich nośność była zdeterminowana przez wyczerpanie wytrzymałości prętów na rozciąganie, co klasyfikuje przekrój jako kontrolowany przez rozciąganie (ang. *tension controlled*). W takim przypadku odkształcenie betonu w momencie zniszczenia belki nie osiągnie wartości 0,003. Nośność nominalna przedstawiona w tabeli 2 została obliczona jako moment zginający zgodnie z normą ACI 318-19 [14], bez uwzględnienia współczynnika redukcyjnego nośności (ϕ). Graniczna wytrzymałość na rozciąganie

prętów CFRP (f_{pu}) odpowiada średniej krótkotrwałej wytrzymałości na rozciąganie materiału. Nośność projektowa w tabeli 2 to wartość z uwzględnieniem współczynnika redukcyjnego, obliczona jako nominalna nośność na zginanie pomnożona przez współczynnik redukcyjny (ϕ).

Przemieszczenia belek pod obciążeniem były mierzone za pomocą zestawu czujników (fot. 2). Dwanaście czujników przemieszczeń LVDT zostało umieszczonych na spodniej powierzchni belek w celu pomiaru pionowych przemieszczeń (ugięć): w środku rozpiętości (15 cm od osi obciążenia po każdej stronie) oraz w punktach $\frac{1}{4}$ przęsła. W tych przekrojach zastosowano po dwa czujniki z każdej strony belki. Dwa dodatkowe zestawy czujników LVDT zostały umieszczone na osi podparcia w celu kontroli ewentualnych przemieszczeń podpór.

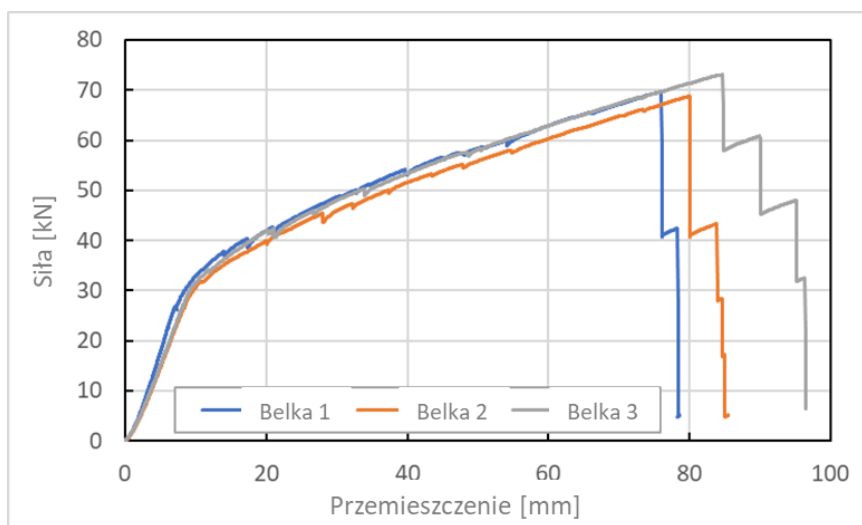
Aby uniknąć uszkodzenia czujników w momencie zniszczenia belki, czujniki te były zazwyczaj demontowane przy poziomie obciążenia wynoszącym 22,7 kN (nośność projektowa) dla wszystkich belek. W celu uzupełnienia odczytów z LVDT uwzględniano również zależność siła–przemieszczenie tłoka siłownika.

4. Wyniki badań

W niniejszym tekście przedstawiono jedynie ograniczone wyniki badań ze względu na jego ograniczony zakres. Poniżej omówiono zależności siła–ugięcie, nośności graniczne oraz mechanizmy zniszczenia dla każdej belki. Rysunek 2 przedstawia krzywe zależności siła–ugięcie dla trzech belek podczas obciążania statycznego i pokazuje, że sztywność belek sprężonych prętami CFRP przed pojawieniem się rys jest niezależna od wartości siły sprężającej podanej w tabeli 1. Krzywe siła–ugięcie dla trzech badanych belek są do siebie bardzo podobne do około 30 kN. Początkowe (przed pojawieniem się rys) nachylenia krzywych siła–ugięcie wynosiły odpowiednio 3,73; 3,20 i 3,30 kN/mm dla belek 1, 2 i 3, w zakresie obciążenia $27,05 \pm 0,04$ kN. Wszystkie trzy belki odbiegły od liniowej odpowiedzi przy około 35 kN.

Po pojawieniu się rys obserwuje się niewielką różnicę w nachyleniu krzywej siła–ugięcie. Porównując wyniki dla wszystkich badanych belek można zauważyć wartość obciążenia rysującego jest niemal identyczna. Utrata sztywności na zginanie związana z powstaniem rys nastąpiła około 35 kN we wszystkich trzech belkach. Nachylenie krzywej siła–ugięcie po powstaniu rys dla belki 3 jest nieco większe niż dla belek 1 i 2, co sugeruje wyższą sztywność po zarysowaniu tej belki. Ta wyższa sztywność może wynikać z różnic między próbkami (np. nieco inny przebieg rys, wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie). Z krzywych siła–ugięcie przedstawionych na rysunku 2 wynika, że belka 2 sprężona prętami CFRP wykazuje największe ugięcie (5,25 mm), natomiast belka 1 – najmniejsze (4,10 mm). Przyczyny tej rozbieżności są obecnie przedmiotem dalszych badań. Ogólnie ugięcie belek sprężonych CFRP zależy od poziomu siły sprężającej.

Należy zauważyć, że choć materiał prętów CFRP cechuje się kruchym uszkodzeniem na rozciąganie, to belki sprężone tymi prętami wykazywały stopniowe zniszczenie przy dużych ugięciach, co jest pożądaną formą zniszczenia w konstrukcjach betonowych.



Rys.2. Zależności siła-przemieszczenia dla badanych belek.

Przemieszczenia w środku rozpiętości zmierzone za pomocą czujników indukcyjnych dla każdej z belek dla różnych poziomów obciążenia przedstawiono w tabeli 3. Podano również wartość średnią dla serii trzech belek, która została porównana z wynikami obliczeń teoretycznych. Można zaobserwować dobrą zgodność między wynikami teoretycznymi a eksperymentalnymi, szczególnie na początkowych etapach badania. Jednakże różnica na poziomie nośności projektowej ($P = 22,7$ kN) jest dość duża (około 50%), co wskazuje na konieczność weryfikacji i ponownego opracowania procedury obliczeniowej.

Tabela 3. Ugięcia w środku rozpiętości: wartości doświadczalne i teoretyczne

Lp.	Siła [kN]	Ugięcie [mm]					AVG / CAL
		Belka 1	Belka 2	Belka 3	Średnia ("AVG")	Teoretyczne ("CAL")	
1.	11.6	2.11	2.68	2.50	2.43	2.62	93%
2.	12.0	2.19	2.78	2.58	2.52	2.72	93%
3.	17.9	3.22	4.12	3.86	3.73	4.05	92%
4.	19.3	3.50	4.47	4.13	4.03	5.10	79%
5.	22.7	4.10	5.25	4.91	4.75	9.01	53%

Fotografia 3 przedstawia typową postać zniszczenia belek sprężonych prętami CFRP. Wszystkie trzy belki uległy uszkodzeniu na skutek zerwania prętów CFRP w strefie największego momentu zginającego pod punktem obciążenia. Poza pojawieniem się rys w belce, słyszalnymi sygnałami zerwania prętów oraz widocznym trwałym ugięciem, nie zaobserwowano innych widocznych form zniszczenia belki. Ponadto, na poziomie dolnych prętów CFRP zauważono poziome rysy. Jednakowy sposób zniszczenia we wszystkich trzech przypadkach potwierdza powtarzalność procedury sprężania belek oraz poprawność opracowanej metody sprężania.

Belki uległy zniszczeniu przy poziomach obciążenia odpowiednio: 69,67 kN, 68,82 kN i 73,14 kN dla belek 1, 2 i 3. Średnia wartość nośności granicznej wyniosła 70,54 kN i jest o 35% wyższa od teoretycznej nośności nominalnej belek. Przyczyną tej różnicy mogą być: wyższa rzeczywista wytrzymałość na ściskanie betonu w badanych belkach niż założona klasa betonu w obliczeniach oraz/lub wyższa wytrzymałość na rozciąganie prętów CFRP niż nominalna deklarowana przez producenta. Bardziej prawdopodobne jest to drugie wyjaśnienie. Rzeczywista wytrzymałość na rozciąganie prętów Solidian CFRP wydaje się być znacząco wyższa niż zalecana przez producenta wartość 2500 MPa.



Fot. 3. Postać zniszczenia badanych belek.

5. Podsumowanie

Wykonano trzy pełnowymiarowe belki wykonane z betonu wysokowytrzymałego oraz prętów FRP do sprężania i zbrojenia. Belki poddano próbie trójpunktowego zginania aż do zniszczenia. Kluczowe wnioski i obserwacje można podsumować następująco:

- Zachowanie wszystkich trzech belek pod obciążeniem statycznym było niemal identyczne przed pojawieniem się rys i jedynie nieznacznie różniło się po ich powstaniu; dowodzi to wysokiej powtarzalności belek, a w szczególności procesu ich sprężania;
- Jednolity sposób zniszczenia we wszystkich trzech przypadkach jest również dowodem na powtarzalność procedury sprężania belek oraz poprawność opracowanej metody sprężania;
- Do momentu zarysowania się belek uzyskano wysoką zgodność wyników obliczeń i procedur eksperymentalnych; jednak po zarysowaniu różnice są znacznie większe zarówno pod względem przewidywanego ugięcia (48%), jak i nośności granicznej belek (35%); jedną z przyczyn tych rozbieżności mogą być inne niż rzeczywiste parametry materiałowe CFRP i betonu przyjęte w obliczeniach;
- Opracowana metoda projektowa, mimo że jest bezpieczna (mniejsze ugięcia i wyższa nośność belek w obliczeniach), jest również zbyt konserwatywna i wymaga dalszych prac nad jej wiarygodnością w projektowaniu.

6. Literatura

- [1] Stoll, F., Saliba, J. E., & Casper, L. E. (2000). Experimental study of CFRP-prestressed high-strength concrete bridge beams. *Composite Structures*, 49(2), 191-200.
- [2] Mertol, H. C., Rizkalla, S., Scott, P., Lees, J. M., & El-Hacha, R. (2006). Durability and fatigue behavior of high-strength concrete beams prestressed with CFRP bars. In *Case Histories and Use of FRP for Prestressing Applications*, ACI Special Publication, SP245-1, Detroit, USA, 1-20.
- [3] Wu, T., Sun, Y., Liu, X., & Cao, Y. (2021). Comparative study of the flexural behavior of steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced and prestressed with CFRP tendons. *Engineering Structures*, 233, 111901.
- [4] Wang, H. T., Tang, C., Chen, M. S., Shi, J., & Cao, X. Y. (2024). Experimental study on the flexural performance of prestressed RC beams with post-tensioned CFRP strands. *Engineering Structures*, 309, 118118.
- [5] Siwowski, T., & Radomski, W. (1998). Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo*, 54(7), 382–388.
- [6] Siwowski, T., Piątek, B., Siwowska, P., & Wiater, A. (2020). Development and implementation of CFRP post-tensioning system for bridge strengthening. *Engineering Structures*, 207, 110266.
- [7] Piątek, B., Siwowski, T., Michałowski, J., & Błazewicz, S. (2020). Flexural strengthening of RC beams with prestressed CFRP strips: Development of novel anchor and tensioning system. *Journal of Composites for Construction*, 24(3), 04020015.
- [8] Rezazadeh, M., Cholostiakow, S., Kotynia, R., & Barros, J. (2016). Exploring new NSM reinforcements for the flexural strengthening of RC beams: Experimental and numerical research. *Composite Structures*, 141, 132-145.

- [9] Wiater A., & Siwowski T. (2020). Comparison of Tensile Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Rebars by Testing According to Various Standards. *Materials* 13(18), 4110.
- [10] Wiater, A., & Siwowski, T. (2020). Serviceability and ultimate behaviour of GFRP-reinforced lightweight concrete slabs: Experimental test versus code prediction. *Composite Structures*, 239, 112020
- [11] PN-EN 1992-1-1:2008. (2008). Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Polski Komitet Normalizacyjny.
- [12] ACI 440.4R-04: Prestressing concrete structures with FRP tendons. American Concrete Institute.
- [13] ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars. American Concrete Institute.
- [14] ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute.
- [15] CAN/CSA S6-19: Canadian highway bridge design code. Canadian Standards Association.
- [16] CAN/CSA S806-12: Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers. Canadian Standards Association.