

**RENATA KOTYNIA,
KRZYSZTOF LASEK,
MICHAŁ STAŚKIEWICZ**

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechniki Łódzkiej
Katedra Budownictwa Betonowego

O WPLYWIE POZIOMU OBCIĄŻENIA I WZMOCNIENIA NAPRĘŻONYMI TAŚMAMI CFRP NA NOŚNOŚĆ I ODKSZTAŁCALNOŚĆ BELEK ŻELBETOWYCH

Opiniodawca: **prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski**

Praca dotyczy wzmacniania żelbetowych belek na zginanie przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych CFRP. Przedstawiono program i wyniki własnych badań doświadczalnych belek wzmacnianych pod obciążeniem. Przeprowadzono analizę wpływu poziomego obciążenia belek przed wzmocnieniem na ich nośność i odkształcalność.

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat kompozyty z włókien węglowych (CFRP) w postaci sztywnych laminatów i wiotkich mat znalazły szerokie zastosowanie we wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych metodą przyklejania na zewnętrznej powierzchni betonu przy pomocy epoksydowej zaprawy klejowej (angielska nazwa *externally bonded* – EB). O stosowaniu tego materiału decydują jego liczne zalety, takie jak: bardzo wysoka wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien, niewielki ciężar właściwy materiału, łatwość transportu i montażu kompozytów nawet w trudno dostępnych miejscach oraz wysoka odporność materiału na korozję i agresywne oddziaływanie środowiska.

Wiele badań doświadczalnych przeprowadzonych na zginanych żelbetowych elementach wzmocnionych kompozytami wykazało dość niską efektywność tej techniki, spowodowaną zniszczeniem elementu na skutek nagłego odspojenia kompozytu od powierzchni betonu, zainicjowanego przez typowe dla zginania

rysy w środkowej części elementu [1, 2]. Badania wykazały, że efektywność biernego wzmocnienia na zginanie zależy od wielu czynników, takich jak: rodzaj, wymiary przekroju poprzecznego zbrojenia kompozytowego, odległość jego końców od podpory, układ podłużnego i poprzecznego zbrojenia stalowego oraz rozkład momentów zginających i sił poprzecznych w elemencie [2, 3]. Mimo, że wzmocnienie konstrukcji przy użyciu biernych kompozytów zwiększa jej nośność, nie wpływa jednak znacząco na poprawę warunków użytkowalności (tzn. moment rysujący i ugięcia od obciążeń użytkowych). W celu zwiększenia wpływu wzmocnienia na stan graniczny użytkowalności oraz poziom wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, zaproponowano wstępne jego naprężenie. Pozwoliło to zmniejszyć ugięcia wzmacnianych elementów, zmniejszyć rozwarście rys, ograniczyć naprężenia w stalowym zbrojeniu podłużnym, zmniejszyć odkształcenia żelbetowego elementu oraz znacząco zwiększyć jego sztywność i nośność. Zalety wzmocnień czynnych zostały potwierdzone w wielu badaniach doświadczalnych [3, 4, 5, 6, 7, 8], które określiły minimalny poziom wstępnego naprężenia kompozytu jako 25% jego wytrzymałości na rozciąganie [4, 5]. W przypadku wstępnego naprężenia powyżej 70% wytrzymałości włókien na rozciąganie, obserwowano zniszczenie badanych elementów na skutek zerwania włókien. Natomiast przy poziomie naprężenia nieprzekraczającym 70% wytrzymałości na rozciąganie, do zniszczenia dochodziło najczęściej przez odspojenie kompozytu od powierzchni betonu. [5]. Najbardziej efektywny poziom naprężenia kompozytu CFRP określono, jako 50÷60% jego wytrzymałości na rozciąganie, co zapewnia niemal jednoczesne uzyskanie odspojenia i zerwania włókien tego zbrojenia.

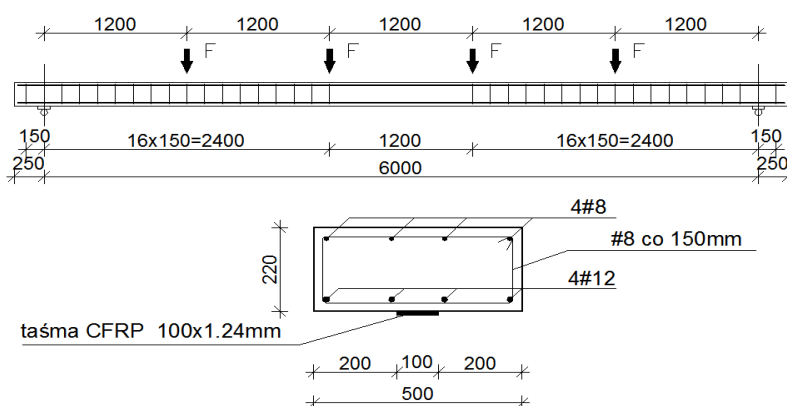
Podstawowym problemem związanym ze wzmacnianiem konstrukcji przy użyciu naprężonych taśm z włókien węglowych jest występowanie bardzo dużych naprężeń stycznych na końcach taśmy. Siła rozciągająca taśmę, a tym samym naprężenia rozciągające, nie mogą być bezpośrednio przekazane na konstrukcję, ponieważ znacząco przekraczają wytrzymałość betonu na rozciąganie. Z tego powodu system wzmocnień naprężonymi laminatami wymaga zastosowania mechanicznego zakotwienia ich końców w betonie, przy użyciu stalowych systemów kotwiących szerzej omówionych w publikacji [9]. Pierwszy polski system naprężania taśm kompozytowych, będący modyfikacją niemieckiego systemu Sika Leoba CarboDur II, został opracowany w IBDiM Warszawa przez prof. Marka Łagodę [10]. Drugie polskie rozwiązanie systemu sprężająco-kotwiącego pod nazwą Neoxe Prestressing System zaproponował prof. Tomasz Siwowski z zespołem [11].

Jedyny jak dotąd bezkrotkowy czynny system wzmacniania na zginanie został opracowany przez prof. Ursę Meiera w laboratorium EMPA w Zurychu. Szczegółowy opis tej techniki wraz z wynikami badań przeprowadzonych we współpracy z laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej (KBB) przedstawiono w publikacjach [9, 12].

Wzmacnianie istniejących konstrukcji żelbetowych wymaga uwzględnienia poziomu obciążenia konstrukcji przed wzmocnieniem. Z analizy dotychczas

opublikowanych wyników badań elementów żelbetowych wzmocnionych czynnie wynika, że nie uwzględniano w nich wpływu poziomego obciążenia elementu na efektywność wzmocnienia. W celu zbadania tego zagadnienia autorzy pracy zaproponowali program badań doświadczalnych obejmujący elementy wzmocnione przy dwóch różnych stopniach wyężenia, wywołanych odpowiednio ciężarem własnym i obciążeniem zewnętrznym odpowiadającym 75% nośności elementu niewzmocnionego.

Przedstawione w opracowaniu badania doświadczalne stanowią część szerszego programu badawczego finansowanego z projektu unijnego „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”.



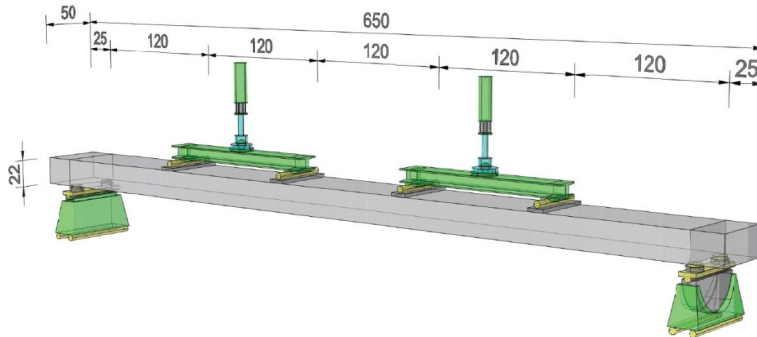
Rys. 1. Schemat statyczny, zbrojenie belki i sposób wzmocnienia
Fig. 1. Static scheme, steel reinforcement and strengthening mode of the beam

2. Opis badań

Program badań realizowanych w laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej obejmował trzy belki (P3, P4 oraz P7) wzmocnione przy użyciu wstępnie naprężonych taśm z włóknami węglowymi CFRP. Badano jednoprzęsłowe, wolnopodparte belki o wymiarach przekroju poprzecznego 500x220 mm i rozpiętości w osiach podpór 6000 mm. Wszystkie elementy zbrojono dołem czterema prętami żebrowanymi o nominalnej średnicy 12 mm, a górą czterema prętami o średnicy 8 mm. Zbrojenie poprzeczne stanowiły strzemiona o nominalnej średnicy 8 mm w rozstawie 150 mm. Do wzmocnienia płyt stosowano pojedyncze odcinki taśm o szerokości 100 mm i grubości 1,24 mm (rys. 1).

Elementy badano w stanowisku zbudowanym ze stalowych kształtowników oraz betonowych bloków, na których umieszczono stalowe, przegubowe podpory z możliwością przesuwu. Do rygla stalowego stanowiska zamocowano siłowniki hydrauliczne przekazujące obciążenie na belkę za pośrednictwem dwóch

trawersów. Taki układ umożliwił obciążenie belki czterema siłami skupionymi w rozstawie 1200 mm (rys. 2).



Rys. 2. Schemat statyczny modeli badawczych
Fig. 2. Static scheme of the tested models

Podstawowym parametrem zmiennym był poziom obciążenia belek przed wzmocnieniem, popularnie zwany stopniem wyężenia. Belki wzmocniono pod niezmiennym obciążeniem (o różnej intensywności) utrzymywanym, aż do uzyskania przez klej wymaganej wytrzymałości. W celu zbadania wpływu stopnia wyężenia na efektywność wzmocnienia, belki P3 oraz P7 wzmocniono pod ciężarem własnym, który stanowił około 25% nośności belki niewzmocnionej (co odpowiada zewnętrznemu obciążeniu w postaci sił skupionych $2F_p = 6,1$ kN). Belkę P4 wzmocniono pod obciążeniem w postaci sił skupionych $2F_p = 13,7$ kN, które łącznie z ciężarem własnym ($2F_p = 6,1$ kN) wyniosło $2F_p = 19,8$ kN, co odpowiada około 75% wyężeniu nie wzmocnionej belki.

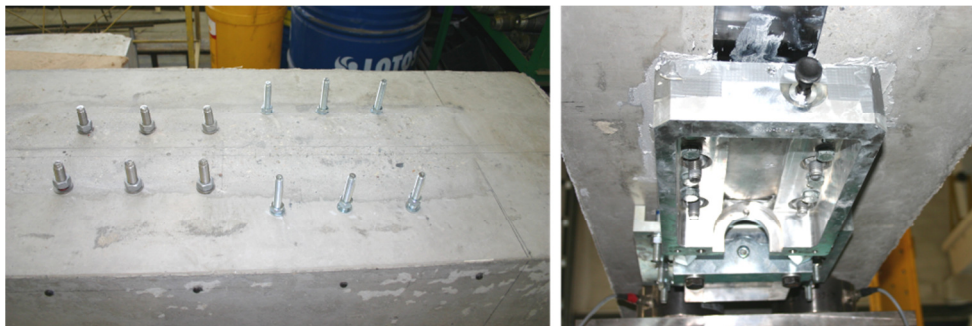
Drugim analizowanym parametrem był sposób zakotwienia taśm. Pierwsze dwie belki zostały wzmocnione przy użyciu systemu sprężająco-kotwiącego S&P, składającego się ze stalowych płyt kotwiących mocowanych śrubami do spodniej powierzchni belki. Belkę P7 naprężono przy użyciu tego samego systemu z jedностopniową redukcją siły sprężającej, polegającej na przyklejeniu skrajnych odcinków taśmy o długości 1000 mm w sposób bierny.



Rys. 3. Szkielety zbrojeniowe (lewe), betonowanie belek (prawe)
Fig. 3. Steel reinforcement (left) and concreting process (right)

Badane elementy w całości przygotowano w laboratorium KBB. Betonowanie odbyło się w dwóch seriach. Do wykonania elementów użyto betonu towarowego klasy C30/37 dostarczonego do laboratorium w dniu betonowania (rys. 3).

Belki wzmocniono w stanowisku badawczym. Przed ich umieszczeniem na podporach, nawiercono otwory na spodniej powierzchni i zamocowano śruby bloków kotwiących systemu sprężająco-kotwiącego S&P (rys. 4).



Rys. 4. Przygotowanie systemu kotwiącego
Fig. 4 Preparation of the anchorage system

Taśmy z włóknami węglowymi przyklejono dwuskładnikowym (żywica + utwardzacz 4:1) klejem dostarczonym przez producenta (rys. 5).



Rys. 5. Przyklejanie taśmy na powierzchni belki
Fig. 5. Laminate bonding to the concrete surface

Po umieszczeniu obu końców laminatu w szczękach płyt kotwiących, do czynnej strony zakotwienia (z możliwością przesuwu) zamontowano siłownik hydrauliczny i wprowadzono siłę rozciągającą w taśmie (rys. 6). Po uzyskaniu wymaganego stopnia naprężenia kompozytu, zablokowano przesuw bloku kotwiącego, a po 12 godzinach zdemontowano system naprężający.



Rys. 6. Naprężanie taśm
Fig. 6. Prestressing CFRP laminates

W płycie P7 zastosowano redukcję siły rozciągającej na długości taśmy. W pierwszym etapie klej naniesiono tylko w środkowej części naprężonej taśmy, na odcinku o długości około 3600 mm (z pominięciem skrajnych odcinków o długości 1000 mm z każdej strony), a następnie przyklejono naprężoną taśmę na powierzchni belki. Po 72 godzinach na końcach przyklejonego odcinka taśmy zamontowano mechaniczne kotwy w postaci obejm z kształtowników stalowych skręcanych śrubami, dociskających taśmę do powierzchni betonu. Następnie zdemontowano system naprężający łącznie z odkręceniem blach kotwiących, a skrajne fragmenty taśmy o długości 1000 mm przyklejono w sposób bierny. Po kolejnych 72 godzinach zdemontowano mechaniczne zaciski.

W trakcie badań mierzono odkształcenia betonu w strefie rozciąganej i ściskanej, odkształcenia zbrojenia stalowego w środku rozpiętości belki, odkształcenia taśmy CFRP oraz pionowe przemieszczenia elementu. W tym samym czasie obserwowano postęp zarysowania i przyrost szerokości rozwarcia wybranych rys. Dodatkowo rejestrowano reakcje podporowe z 4 czujników siły typu CL 16, umieszczonych na podporach belki, po 2 z każdej strony. Wszystkie czujniki podłączone były do uniwersalnego miernika współpracującego z komputerem typu IBM PC oraz własnym oprogramowaniem PC LAB.

Stopnie naprężenia taśm w chwili wzmacniania zestawiono w tabeli 1. Po obciążeniu belki P3 do poziomu $2F = 25,9$ kN, wykonano sześciokrotny proces odciążenia i obciążenia elementu, po którym stopniowo zwiększano obciążenie, aż do zniszczenia belki.

3. Wyniki badań

W badaniach wzmocnianych belek zaobserwowano jeden mechanizm zniszczenia. Belki niszczyły się na skutek odspojenia kompozytu od powierzchni betonu, które postępowało od strefy czystego zginania, gdzie zapoczątkowane było rysami od zginania w kierunku jednej z podpór, następnie w zależności od zastosowanego zakotwienia dochodziło do wysunięcia taśmy z blach kotwiących lub całkowitego odspojenia taśmy w przypadku biernego zakotwienia belki P3 (rys. 7).



Rys. 7. Widok spodu belki P3 po zniszczeniu
(lewa – zakotwienie czynne, prawa – zakotwienie biernie)
Fig. 7. View of the bottom side of the beam P3 after failure
(left – active, right – non-active anchorage)

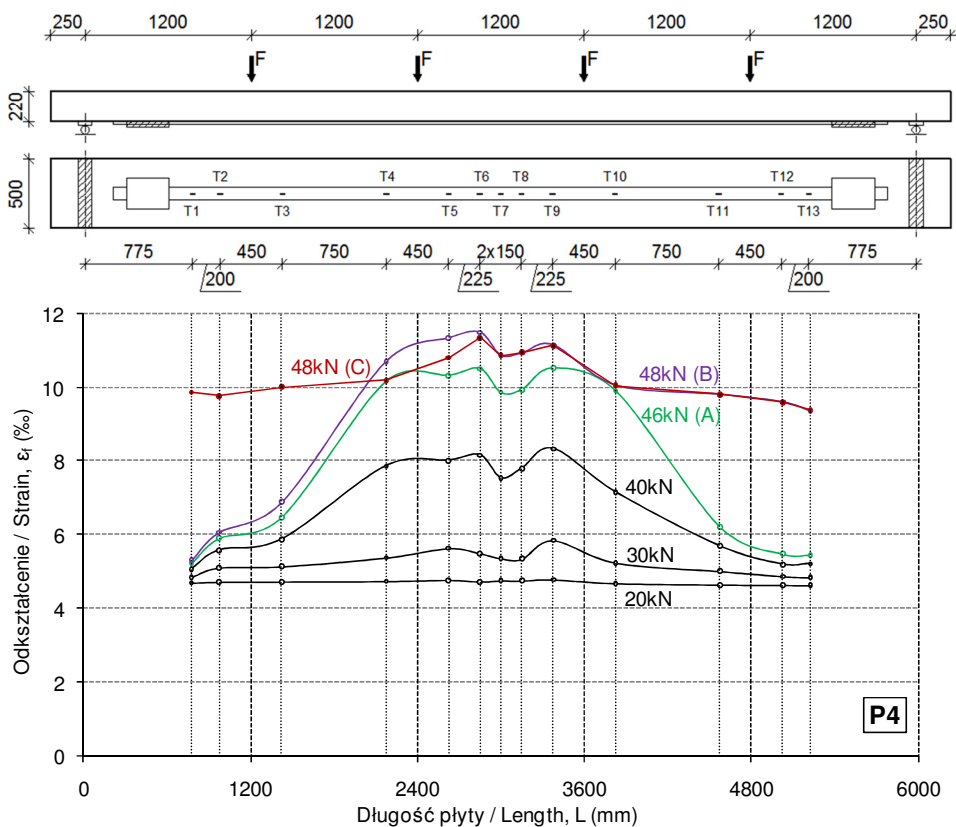
W przypadku belki P7 odspojenie nastąpiło w miejscu zmiany siły rozciągającej w taśmie i postępowało w kierunku środka belki, skutkując całkowitym oderwaniem taśmy od powierzchni betonu. Po zniszczeniu belki widoczny był charakterystyczny układ rys w betonowej otulinie przypominający kształtem „rybie ości” (nazwa angielska „fishbones”) (rys. 8).



Rys. 8. Widok spodu belki P7 z układem rys po odspojeniu kompozytu
Fig. 8. View of the bottom side of the P7 beam concrete cover cracking

Niezależnie od zastosowanego sposobu zakotwienia kompozytu, stopnia odkształcenia taśmy i wyężenia elementu w chwili wzmacniania, zniszczenie rozpoczynało się w momencie, gdy przyrost odkształceń w betonie na poziomie rozciąganej krawędzi przekroju, osiągał wartość w zakresie od 5 do 7‰. Podobne obserwacje potwierdzają wyniki badań elementów wzmacnianych w bierny sposób, w których do odspojenia kompozytu dochodzi przy tych samych odkształceniach w poziomie dolnej krawędzi przekroju [1, 2].

Postępujące odspojenie kompozytu wyraźnie widać na wykresie odkształceń taśmy na długości belki (rys. 9). Jak łatwo zauważyć, najpierw doszło do odspojenia taśmy w obszarze środkowych sił obciążających (46kN – A), które postępowo w kierunku jednej z podpór (48kN – B), a krótko potem do odspojenia odcinka taśmy przy przeciwległej podporze (48kN – C). W chwili odspojenia taśmy na odcinku między zakotwieniami, działała ona jak ściąg, aż do wysunięcia się kompozytu z jednego z zakotwień.



Rys. 9. Odkształcenia taśmy CFRP przy kolejnych poziomach obciążenia
Fig. 9. Strain of CFRP strips at the following load levels

4. Analiza wyników badań

Zestawienie odkształceń i odpowiadających im naprężeń w taśmach w chwili ich przyklejania do powierzchni betonu zamieszczono w tabeli 1.

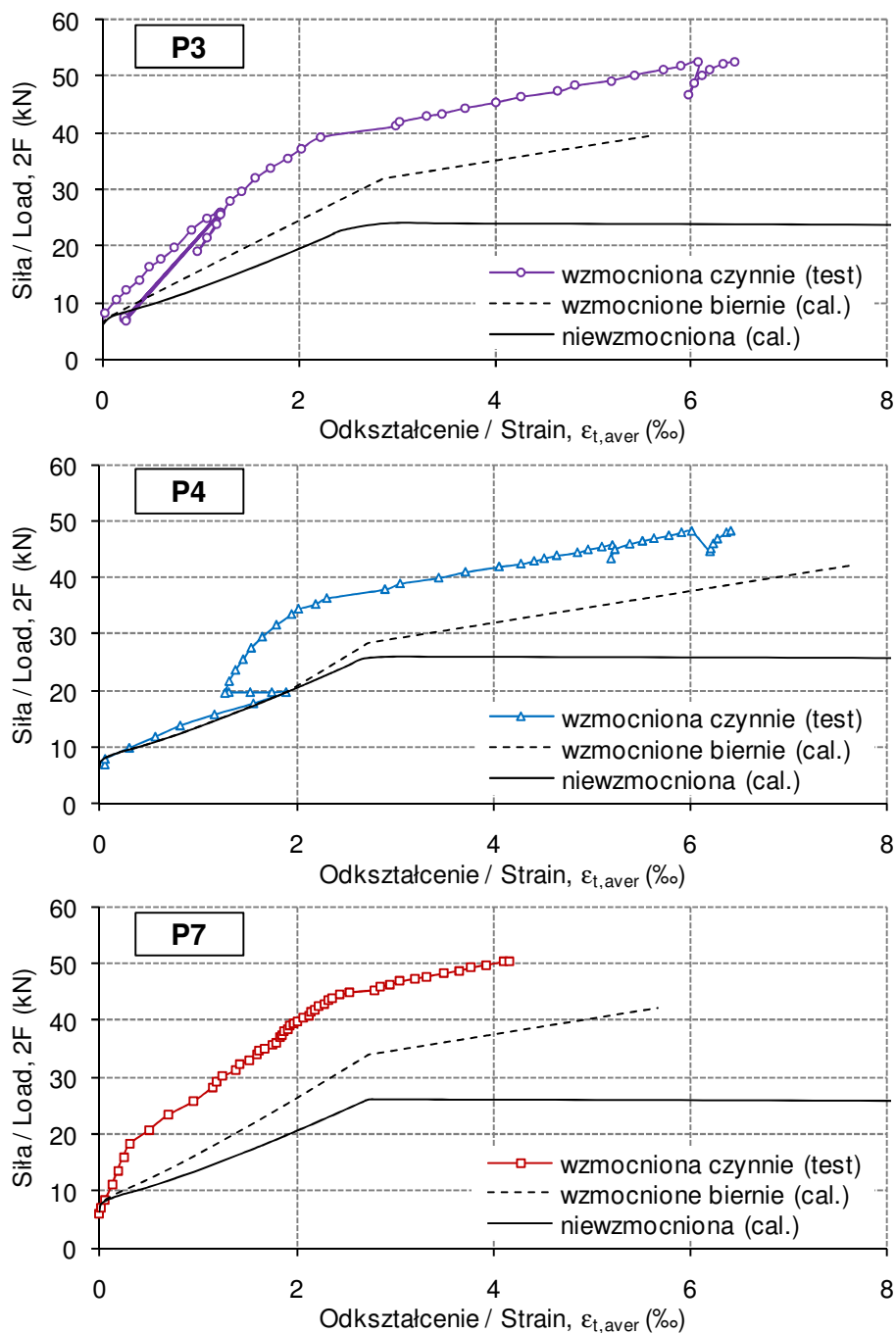
Tabela 1. Zestawienie wyników badań
Table 1. Summary of test results

| Belka | $2F_p$ (kN) | $2F_p/2F_{u0}$ (-) | $2F_u$ (kN) | $2F_u/2F_{u0}$ (-) | ε_{fp} (‰) | σ_{fp} (MPa) | $\varepsilon_{f, \text{test}}$ (‰) | η_e (-) | Sposób zniszczenia |
|-------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|--|
| P3 | 6,1 | 0,25 | 52,6 | 2,19 | 5,20 | 913 (0,31 f_{fu}) | 9,30 | 0,87 | Odspojenie, a następnie wysunięcie taśmy CFRP z systemu kotwiącego |
| P4 | 19,8 | 0,76 | 48,3 | 1,86 | 4,75 | 834 (0,28 f_{fu}) | 6,85 | 0,69 | Odspojenie, a następnie wysunięcie taśmy CFRP z systemu kotwiącego |
| P7 | 6,1 | 0,23 | 50,4 | 1,92 | 5,10 | 885 (0,33 f_{fu}) | 6,40 | 0,68 | Odspojenie taśmy zapoczątkowanie w miejscu zmiany siły naprężającej |

| | |
|--------------------------------|---|
| F_p | – obciążenie w chwili wykonywania wzmocnienia |
| F_{u0} | – obciążenie graniczne belki niewzmocnionej (cal.), $2F_{u0} = 24,0\text{kN}$ (P3), $26,0\text{kN}$ (P4, P7) |
| F_u | – obciążenie graniczne belki wzmocnionej (test) |
| ε_{fp} | – odkształcenia taśmy CFRP w chwili jej przyklejania |
| σ_{fp} | – naprężenia w taśmie w chwili jej przyklejania |
| f_{fu} | – naprężenia graniczne taśmy (test), $f_{fu} = 2979\text{MPa}$ (P3, P4), 2695MPa (P7) |
| $\varepsilon_{f, \text{test}}$ | – przyrost odkształceń taśmy od chwili jej przyklejania do zniszczenia belki |
| η_e | – stopień wykorzystania wytrzymałości taśmy na rozciąganie, $\eta_e = (\varepsilon_{f, \text{test}} + \varepsilon_{fp}) / \varepsilon_{fu}$ |
| $\varepsilon_{f, u}$ | – graniczne odkształcenia taśmy (test), $\varepsilon_{f, u} = 16,8 \%$ |

Stopień wzmocnienia belek wyrażony stosunkiem nośności elementu wzmoczonego i niewzmoczonego $2F_u / 2F_{u0}$ wahał się od 1,86 w belce P4 (wzmocnionej pod wstępnym obciążeniem wynoszącym $0,76F_{u0}$ przy naprężeniu taśmy $\varepsilon_{fp} = 4,38\%$) do 2,19 w belce P3 (wzmocnionej pod ciężarem własnym odpowiadającym wyężeniu $0,25F_{u0}$ i naprężeniu taśmy $\varepsilon_{fp} = 5,20\%$).

Wpływ wstępnego naprężenia taśmy na sztywność i nośność wzmocnionych elementów można łatwo zauważyć porównując wykresy uśrednionych odkształceń betonu w strefie rozciąganej w funkcji obciążenia (rys. 10).

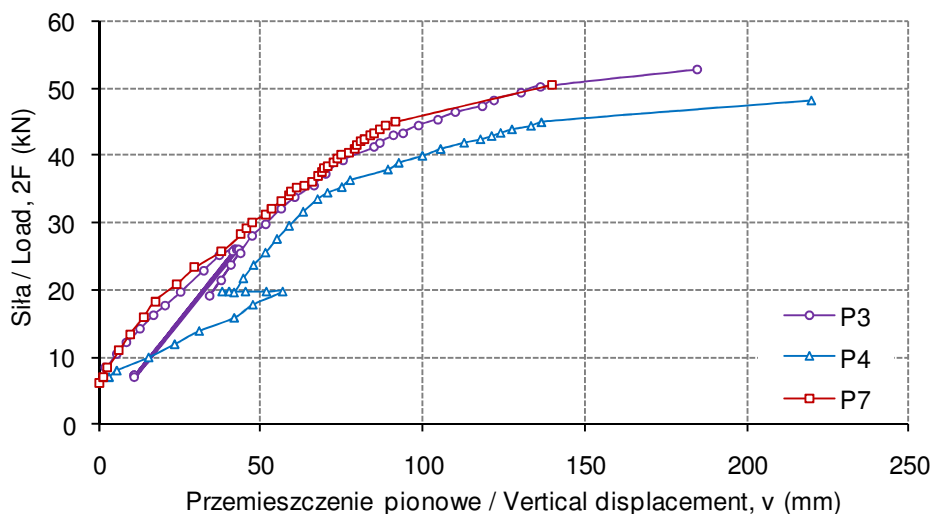


Rys. 10. Wykresy odkształceń w poziomie dolnego zbrojenia w betonie
 Fig. 10. Concrete tensile strain along the longitudinal reinforcement

Sztywność wszystkich belek po uplastycznieniu zbrojenia podłużnego kształtuje się w zbliżony sposób. Przemieszczenia pionowe belki P4, wzmocnionej pod obciążeniem odpowiadającym aż 76% nośności elementu niewzmocnionego, taśmą naprężoną do poziomu 4,75‰, były przed uplastycznieniem zbrojenia zaledwie 15% większe niż przemieszczenia pozostałych belek, wzmocnionych pod ciężarem własnym. Dopiero po uplastycznieniu zbrojenia zwykłego te różnice są znacznie większe.

Sztywność belki P4 jest porównywalna ze sztywnością płyt P3 i P7 wzmocnionych jedynie pod ciężarem własnym.

Wstępne naprężenie taśm miało na celu poprawę warunków użytkowalności ugięć i rozwarcia rys. Z porównania wykresów ugięcie-obciążenie (rys. 11) wynika, że wzmocnienie czynne w belce P4 spowodowało wyraźne zmniejszenie ugięć elementu uzyskanych podczas jej wstępnego obciążenia. Wykresy ugięć potwierdzają opinię o znaczącym wpływie stopnia naprężenia taśmy CFRP na sztywność wzmacnianego elementu, (a tym samym wolniejszy przyrost przemieszczeń pionowych), co wyraźnie widać z porównania wykresów belki P3 i P4, wzmocnionych czynnie przy odkształceniach taśmy odpowiednio 5,2‰ i 4,75‰ (tabela 1).



Rys. 11. Wykres przemieszczeń pionowych środka belki

Fig. 11. Vertical displacement of the beam's midspan

Badania wykazały, że nawet bardzo wysoki poziom obciążenia belki odpowiadający $0,76F_{u0}$ (tabela 1) nie wpłynął negatywnie na ich sztywność przed i po uplastycznieniu zbrojenia głównego (rys. 11). Tak duże wstępne wyłączenie elementu przed wzmocnieniem skutkuje jedynie nieznacznie niższą nośnością belek. Nachylenie wykresów ugięcie-obciążenie analizowanych belek jest

zbliżone zarówno w zakresie od wzmocnienia (po wstępnym obciążeniu) do uplastycznienia zbrojenia zwykłego, jak i po jego uplastycznieniu aż do zniszczenia. Obserwacje te potwierdzają opinię o dużej efektywności wzmocnienia czynnego. Mimo bardzo wysokiego stopnia wyężenia belki, który przekracza stan graniczny użytkowości tego elementu, a przy uwzględnieniu współczynników bezpieczeństwa jest bliski stanowi granicznemu nośności, aplikacja wzmocnienia pozwoliła znacząco zmniejszyć powstałe odkształcenia i przemieszczenia oraz znacząco zwiększyć sztywność elementu, do poziomu porównywalnego ze sztywnością belki wzmocnionej pod ciężarem własnym.

W belce P3, którą charakteryzował najwyższy stopień wzmocnienia ($2F_u / 2F_{u0} = 2,19$), w chwili zniszczenia elementu odkształcenia taśmy osiągnęły wartość odpowiadającą $0,82\varepsilon_{f,u}$. W celu zabezpieczenia taśmy przed wysunięciem z zakotwienia, należałoby zastosować inny system kotwiący. Ponadto wstępne naprężenie taśmy do poziomu odpowiadającego $0,42f_{tu}$ pozwoliłoby w pełni wykorzystać jej wytrzymałość na rozciąganie.

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań belek wzmocnionych na zginanie przy użyciu wstępnie naprężonych kompozytów można wysunąć poniższe wnioski.

1) Badania wykazały wysoką efektywność wzmocnienia żelbetowych belek wzmocnionych czynnie wahającą się od 1,9 do 2,2 nośności elementu niewzmocnionego, podczas gdy przy wzmocnieniu biernym stopień wzmocnienia wynosi od 1,4 do 1,6 nośności belki żelbetowej (przy odkształceniach kompozytu w chwili odspojenia od 5‰ do 7‰).

Ten istotny wniosek często może decydować o konieczności zastosowania technologii wzmocnienia przy użyciu naprężonych taśm, w wypadku elementów znacznie wyężonych przed wzmocnieniem, w których wzmocnienie bierne nie przyniosłoby oczekiwanego rezultatu.

2) Na ogół powodem zniszczenia wzmocnionych belek była utrata przyczepności między kompozytem i betonem, postępująca od środkowej części elementu w kierunku podpór.

3) Wzmacnianie zginanych elementów żelbetowych przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych typu CFRP jest bardzo skuteczne zarówno w stanie granicznym nośności, jak i użytkowości, zwłaszcza gdy elementy wzmacniane są silnie obciążone przed wzmocnieniem. Możliwe jest znaczące ograniczenie odkształceń i ugięć wzmacnianego elementu oraz znaczne zwiększenie jego sztywności.

Zagadnienie wzmacniania elementów zginanych przy użyciu naprężonych materiałów kompozytowych wymaga dalszych badań doświadczalnych, których kierunki określają następujące cele:

- analiza wpływu przyczepności naprężonego kompozytu zakotwionego na końcach, na nośność i odkształcalność wzmocnionego elementu,
- badanie efektywności wzmocnienia elementów wzmocnionych naprężonymi kompozytami wklejonymi w betonową otulinę (*near surface mounted reinforcement* NSMR),
- zastosowanie bezkrowowego systemu wzmocnienia elementu przy jednoczesnym obciążeniu tego elementu przed wzmocnieniem.

Powyższe zagadnienia są przedmiotem badań doświadczalnych kontynuowanych w KBB w ramach pracy doktorskiej Krzysztofa Laska.

Literatura

- [1] **Kamińska M.E., Kotynia R.:** Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP, „Badania doświadczalne elementów i konstrukcji betonowych”, Z. 9, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
- [2] **Kotynia R., Kamińska M.E.:** Odkształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie materiałami CFRP, „Badania doświadczalne elementów i konstrukcji betonowych”, Z. 13, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003.
- [3] **Deuring M.:** Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen, „Bericht”, nr 224, EMPA, Dübendorf, Szwajcaria 1993.
- [4] **Trintafyllou T.C., Deskovic N., Deuring M.:** Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced sheets, “ACI Structures Journal” 1992, nr 89(3), s. 235-244.
- [5] **Meier U.:** Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, “Construction Building Materials” 1995, nr 9(6), s. 341-351.
- [6] **Teng, J.G., Chen J.F., Smith S.T., Lam L.:** FRP strengthened RC structures, Wiley, Chichester, United Kingdom 2002.
- [7] **El-Hacha R., Wight R.G., Green M.F.:** Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures, “Progress in Structural Engineering and Materials” 2001, nr 3(2), s. 111-121.
- [8] **Wight R.G., Green M.F., Erki M.-A.:** Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete slabs, “Journal of Composites for Construction” 2001, nr 5(4), s. 214-220.
- [9] **Meier U., Kotynia R.:** Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych naprężonymi materiałami kompozytowymi FRP, „Inżynieria i Budownictwo” 2006, nr 11, s. 596-599.
- [10] **Łagoda M.:** Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów, Monografia 322 Seria: Inżynieria Lądowa, Politechnika Krakowska, 2005.
- [11] **Siwowski T., Michałowski J., Błażewicz S.:** Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmacniania mostów, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Awarie Budowlane XXIV, Szczecin-Międzyzdroje, maj 2009, s. 947-960.

- [12] **Kotynia R., Walendziak R., Stoecklin I., Meier U.**: RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cycling Loading, "Journal of composites for constructions" 2011, No. 4-5.

ABOUT THE PRELOADING AND STRENGTHENING LEVEL WITH PRETENSION CFRP STRIPS ON LOAD CAPACITY AND DUCTILITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Summary

Paper describes experimental research of reinforced concrete beams strengthened for flexure with pretension CFRP laminates. Before strengthening beams were exhausted to 25% or 75% of load capacity of non-strengthened beam. Research showed high efficiency of strengthening with pretension strips. Strengthening ratio varied in the range from 1,9 to 2,2 of the non-strengthened beam. Flexural strengthening of RC beams with pretension CFRP strips is very effective both for ultimate limit state and serviceability limit state, especially in case of highly exhausted elements before strengthening. Using of the active strengthening system causes significant reduction of strains in concrete and mid-span deflections and increase in stiffness of tested elements.