

# Efektywność wzmocnienia zginanych elementów żelbetowych przy użyciu naprężonych kompozytów CFRP – stan wiedzy w dziedzinie badań doświadczalnych

Dr hab. inż. Renata Kotynia, prof. PŁ, dr inż. Krzysztof Lasek,  
mgr inż. Michał Staśkiewicz, Politechnika Łódzka

## 1. Wprowadzenie

Kompozyty polimerowe popularnie zwane *fiber reinforced polymer* (FRP) są obecne na rynku budowlanym od ponad dwudziestu lat. Zasadniczą cechą wspólną tych materiałów jest sprężysto-liniowa charakterystyka wytrzymałościowa, wysoka odporność korozyjna, neutralność elektromagnetyczna, wysoka wytrzymałość na rozciąganie oraz bardzo niski ciężar właściwy prętów FRP w porównaniu z tradycyjną stalą. W zależności od typu włókien zastosowanych do produkcji tych materiałów (węglowe – CFRP, szklane – GFRP, aramidowe – AFRP i bazaltowe BFRP) mają one bardzo różnicowane moduły sprężystości, od najniższych na poziomie 40 GPa (GFRP) do najwyższych dochodzących nawet do 240 GPa (CFRP). W zastosowaniach konstrukcyjnych, zwłaszcza we współpracy z betonem, najbardziej zalecane są włókna węglowe, gdyż ich moduł sprężystości podłużnej jest najwyższy. Kompozyty produkowane w postaci sztywnych laminatów i wiotkich mat, znalazły szerokie zastosowanie we wzmacnianiu istniejących konstrukcji żelbetowych metodą przyklejania na zewnętrznej powierzchni betonu (ang. *Externally Bonded – EB*), przy użyciu epoksydowej zaprawy klejowej.

## 2. Sposoby zniszczenia elementów wzmocnionych na zginanie

Szereg badań dowodzi, że technika biernego wzmacniania płyt i belek na zginanie jest skuteczna jedynie w wypadku słabo obciążonych konstrukcji przed wzmocnieniem, w których udział ciężaru własnego w całkowitych obciążeniach nie jest znaczący [2, 12, 16]. Natomiast w elementach silnie obciążonych przed wzmocnieniem skuteczność takiego zewnętrznego wzmocnienia jest dość niska. Powodem jest sposób zniszczenia wzmocnionego elementu na skutek nagłego odspojenia kompozytu od powierzchni betonu, w bezpośrednim sąsiedztwie rys typowych dla zginania. Belki żelbetowe wzmocnione naprężonymi taśmami CFRP wykazują trzy typy zniszczeń. Pierwszy, to odspojenie kompozytu od powierzchni betonu postępujące od środkowej części elementu w kierunku podpór (ang. *intermediate crack debonding – ICD*). Drugi obejmuje zerwanie kompozytu w środkowej części elementu (ang. *rupture – R*). Trzecią grupę stanowią elementy, które zniszczyły się w sposób nietypowy dla zginania (np. w wyniku

ścianania) oraz elementy, w których zbrojenie kompozytowe było wykorzystane w niedostatecznym stopniu, o czym świadczyło zmiażdżenie betonu w ściskanej strefie przekroju (*concrete crushing – CC*) lub odspojenie nieskutecznie zakotwionych końców kompozytu, jeśli takie zakotwienie występuje (*end debonding – ED*, *concrete cover separation – CCS*, *anchorage failure – AF*). Ze względu na niską efektywność wzmocnienia elementów z trzeciej grupy nie uwzględniono ich w dalszej analizie.

Szczegółowy opis dwóch podstawowych sposobów zniszczenia (ICD i ED) przy udziale ukośnej rysy w strefie ścinania (ang. *Critical Diagonal Crack Debonding – CDCD*) omówiono na podstawie badań własnych prowadzonych w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej w pracach [5, 6, 7, 10, 11]. Mimo że zastosowanie wzmocnienia biernego wpływa na wzrost nośności elementu, to nie poprawia istotnie stanu granicznego użyteczności wzmacnianego elementu na zginanie (chodzi o wzrost momentu rysującego, ograniczenie ugięć i wzrost momentu uplastycznienia zbrojenia stalowego). Biorąc dodatkowo pod uwagę dość niski stopień wykorzystania wytrzymałości kompozytu, potwierdzony 30–35% stopniem wykorzystania jego wytrzymałości na rozciąganie [5, 6, 7], jedynym sposobem podniesienia tej efektywności jest wzmacnianie konstrukcji przy użyciu wstępnie naprężonych taśm/mat FRP przed ich przyklejeniem. W tym zakresie nasze krajowe doświadczenia są dość bogate, o czym świadczą opracowania [1, 3, 4, 9, 10, 11, 14, 15]. Oryginalnym osiągnięciem pracy doktorskiej [9] były badania wpływu historii obciążenia elementów przed wzmocnieniem na efektywność wzmocnienia w stanie granicznym nośności i użyteczności. Problem ten jest niezwykle rzadko podejmowany w badaniach doświadczalnych, choć z praktycznego punktu widzenia wzmacniania istniejących konstrukcji jest bardzo istotny.

W celu podjęcia uogólnionej analizy wpływu wielu parametrów zmiennych na efektywność wzmocnienia zginanych elementów żelbetowych autorzy poszerzyli wcześniejszą bazę danych [7] o najnowsze badania w tej dziedzinie i na jej podstawie opracowali wnioski do zastosowań praktycznych. Bieżąca praca stanowi skrót opracowania [8] obejmującego obszerną analizę wpływu wielu parametrów zmiennych z tabelaryczną i graficzną prezentacją wszystkich wyników badań.

### 3. Analiza parametrów zmiennych

Baza danych obejmuje 123 wyniki badań elementów wzmocnionych opisaną wcześniej techniką z podziałem na grupy parametrów zmiennych, do których należą: wymiary elementu ( $b, h$ ), charakterystyka wytrzymałościowa betonu ( $f_{ck}$ ), stali ( $f_{yk}$ ) i kompozytu ( $f_{fu}$ ,  $E_f$ ), stopień zbrojenia stalowego i kompozytowego ( $\rho_s, \rho_f$ ), sprowadzony stopień zbrojenia kompozytowego ( $\rho_{f,eq} = \rho_f E_f / E_s$ ), odkształcenie wstępnie naprężonego kompozytu ( $\varepsilon_{fp}$ ), odkształcenie kompozytu w chwili zniszczenia elementu ( $\varepsilon_{f, test}$ ), mechanizm zniszczenia wzmocnionego elementu, stopień wzmocnienia w odniesieniu do nośności elementu  $\eta_{u,w} = (M_{u,w} - M_{u0}) / M_{u0}$  (gdzie:  $M_{u,w}$  oraz  $M_{u0}$  oznaczają odpowiednio momenty niszczące element wzmocniony i niewzmocniony). Na uwagę zasługuje fakt, że wszystkie analizowane elementy wzmocniono materiałami kompozytowymi wykonanymi z włókien węglowych CFRP. Różnice między użytymi kompozytami polegają zasadniczo na typie materiału („L” – laminat, „S” – mata) oraz na jego module sprężystości podłużnej ( $E_f$ ). Aby w analizie wzmocnionych elementów wyeliminować wpływ różnic modułów sprężystości, wprowadzono parametr sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq} = \rho_f \times (E_f / E_s)$ , gdzie  $\rho_f$  oznacza stopień zbrojenia kompozytowego  $\rho_f = A_f / (bd_f)$ ;  $d_f$  – wysokość użyteczna przekroju do środka ciężkości zbrojenia kompozytowego). W zebranej bazie znajdują elementy z mechanicznym zakotwieniem taśm przy użyciu stalowych płyt kotwiących oraz elementy bez takiego zakotwienia (w tym elementy z taśmami/matami CFRP kotwionymi przy użyciu obwodowych mat typu „U”, o włóknach ułożonych prostopadle do podłużnej osi elementu, obejmujących końce naprężonego kompozytu oraz elementy wzmocnione bezkotwowo metodą gradientową). Ze względu na małą liczbę badanych elementów oraz niską skuteczność zakotwień typu „U”, nie uwzględniono ich w analizie porównawczej. Przyjęto zasadniczy podział elementów na dwie grupy różniące się sposobem zniszczenia: przez zerwanie kompozytu FRP (w skrócie zerwanie FRP) oraz wysunięcie kompozytu ze szczęk kotwiących po wcześniejszym odspojeniu od powierzchni betonu (wysunięcie FRP). Na podstawie własnych badań doświadczalnych autorzy zwracają uwagę że w wypadku zniszczenia przez wysunięcie kompozytu ze szczęk kotwiących, o nośności decyduje skuteczność zakotwienia. Im zakotwienie jest lepsze, tym później dochodzi do wysunięcia taśm ze szczęk, co dalej wpływa na poziom maksymalnych odkształceń zarejestrowanych w badaniu przy zniszczeniu  $\varepsilon_{f, test}$ , a ostatecznie również na nośność wzmocnionego elementu.

Na ogół wszystkie źródła literaturowe nie uwzględniają w analizie badań tego efektu błędnie interpretując odkształcenia  $\varepsilon_{f, test}$  jako odkształcenia przyczepności. W rzeczywistości wartość tych odkształceń jest sumą odkształcenia przy odspojeniu kompozytu od powierzchni betonu  $\varepsilon_{f,b}$  (czyli właśnie odkształcenia przyczepności) oraz przyrostu odkształcenia kompozytu od chwili odspojenia do wysunięcia ze szczęk  $\Delta\varepsilon_{f, test}$ . Wartość odkształcenia przyczepności  $\varepsilon_{f,b}$  zależy od kilku parametrów: rodzaju kompozytu ( $E_f$ ), jego grubości ( $t_f$ ) i szerokości ( $b_f$ ) oraz wytrzymałości betonu ( $f_{ck}$ ). Z powszechnych zależności

normowych można tę wartość dość dobrze oszacować. Natomiast przyrost odkształcenia taśmy po jej odspojeniu  $\Delta\varepsilon_{f, test}$  jest wynikiem przypadku i zależy jedynie od skuteczności zakotwienia końców kompozytu.

Za podstawowy miernik efektywności wzmocnienia określono w niniejszej pracy stopień wzmocnienia elementu, wyrażony stosunkiem względnego przyrostu nośności elementu wzmocnionego w porównaniu do elementu niewzmocnionego wyrażony wzorem:

$$\eta_u = \frac{\Delta M_u}{M_{u0}} = \frac{M_{u,w} - M_{u0}}{M_{u0}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Na podstawie zebranych w bazie wyników wyraźnie widać bardzo duże zróżnicowanie stopnia zbrojenia zwykłego  $\rho_s$  w granicach od 0,19% do 1,72%, natomiast stopień zbrojenia kompozytowego był znacznie niższy i wahał się w granicach od 0,02% do 1,0%. Elementy badawcze wykonano z betonu o wytrzymałości na ściskanie od 16 MPa do 57 MPa. Najczęściej wzmocniono je przy użyciu taśm CFRP (79%), a rzadziej mat CFRP (21%). W żadnym z elementów (z wyjątkiem elementów badawczych [9]) nie obciążono elementu w trakcie wzmocnienia, a jedynie kilka elementów obciążono przed wzmocnieniem i wzmocniono po odciążeniu pod ciężarem własnym. Aby uniknąć silnego wpływu obciążenia elementów przed wzmocnieniem, te elementy badawcze wyłączono z analizy. Wszystkie elementy wzmocniono metodą przyczepnościową (tzn. naprężony kompozyt był przyklejony na całej długości do powierzchni betonu), przy czym stopień wstępnego naprężenia wahał się w zakresie odkształceń  $\varepsilon_{fp}$  od 0,8‰ aż do 10‰. Z analizy mechanizmów zniszczenia wzmocnianych elementów wynika, że w 46 elementach ze 123 wziętych do analizy (37%) doszło do zerwania materiałów kompozytowych. Pozostałe 63% stanowiły elementy, które zniszczyły się na skutek odspojenia zbrojenia kompozytowego od powierzchni betonu, a następnie wysunięcia kompozytu z zakotwienia oraz elementy, w których doszło do zmiążdżenia betonu w ścisłanej strefie przekroju. Ten ostatni sposób zniszczenia można uznać za niewłaściwy z punktu widzenia źle zaprojektowanego zbrojenia i sprężenia elementu. Należy podkreślić, że elementy, które zniszczyły się na skutek przekroczenia nośności na ścinanie, zmiążdżenie betonu lub zniszczenia w trakcie procesu zwalniania siły sprężającej wyłączono z dalszej analizy. Chociaż dla wszystkich elementów badawczych podano odkształcenia wstępnego naciągu taśmy, to brak danych pomiarów odkształcenia kompozytu w chwili zniszczenia odnotowano aż w 34% elementów (10% stanowiły elementy zniszczone przez zerwanie taśmy). Ten fakt ogranicza analizę z punktu widzenia wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie o kolejne elementy.

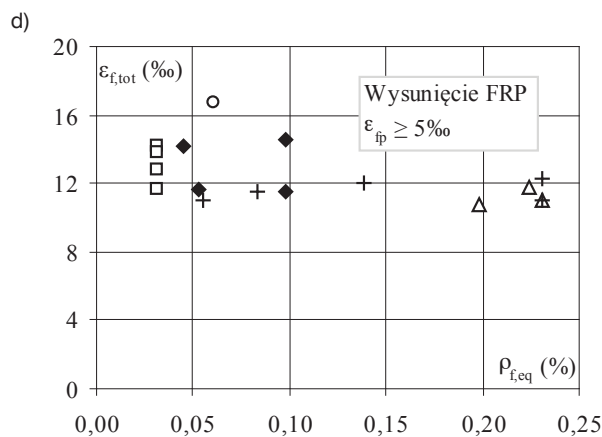
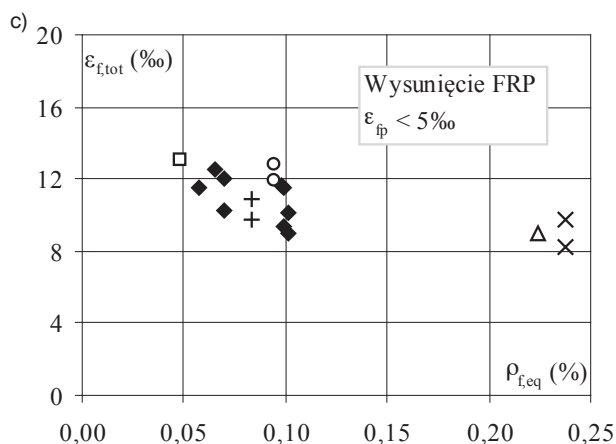
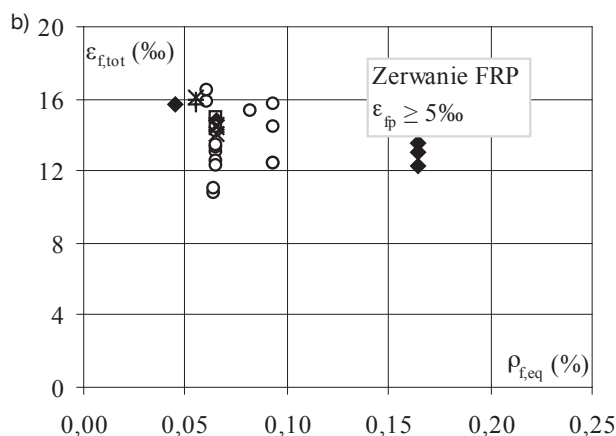
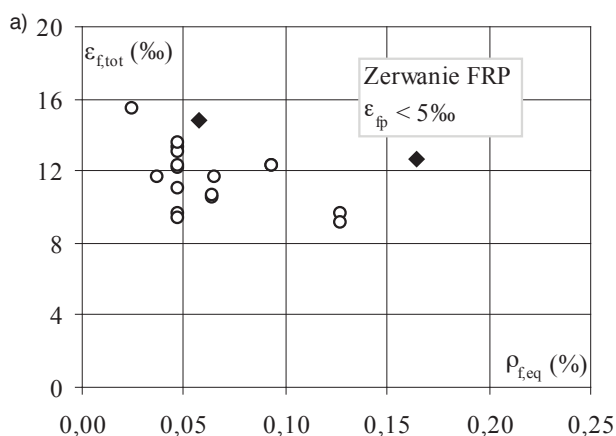
#### 4. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego i stalowego na nośność elementów i poziom wykorzystania wytrzymałości kompozytu FRP

Z porównania wykresów zależności sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego wyrażonego zależnością  $\rho_{f,eq} = \rho_f E_f / E_s$  w funkcji maksymalnego odkształcenia kompozytu dla elementów, które zniszczyły się na skutek zerwania kompozytu na rozciąganie, widać, że wraz ze wzrostem poziomu naprężenia kompozytu zrywały się przy wyższych odkształceniach  $\epsilon_{f,test}$ , co w kilku przypadkach sprawiło, że całkowite jego odkształcenia  $\epsilon_{f,tot} = \epsilon_{f,p} + \epsilon_{f,test}$  były większe niż odkształcenia graniczne kompozytu na zerwanie. Powodem może być raczej trudny do określenia (na ogół nie do końca poprawnie rejestrowany) doraźny spadek siły sprężającej po wzmocnieniu, drugim powodem jest sposób aplikacji taśm w pozycji odwróconej, a nie jak w rzeczywistości ma to miejsce w pozycji sufitowej. Ten fakt sprawia, że aż w 44% elementów stopień obciążenia przy wzmocnieniu był ujemny z uwagi na odwróconą pozycję elementu podczas wzmocnienia, co tym samym komplikuje analizę wyników.

Natomiast wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia kompozytowego widać spadek całkowitych odkształceń kompozytu przy

zerwaniu, co świadczy o tym, że kompozyt o wyższej osiowej sztywności  $\rho_f E_f$  odspaja się szybciej (przy niższych odkształceniach), a tym samym po odspojeniu w całości przenosi rozciągające siły od dodatkowego obciążenia, jak zewnętrzny ścią zakotwiony na końcach kompozytu w miejscu blach kotwiących. Do chwili odspojenia kompozyt przenosi stopniowo naprężenia rozciągające łącznie z istniejącym zbrojeniem stalowym, zgodnie z hipotezą płaskiego przekroju. Jednak po odspojeniu przenosi on wszystkie dodatkowe obciążenia, których nie przejmuje już uplastyczniona stal.

Podczas gdy do zniszczenia dochodzi przez wysunięcie kompozytu z zakotwień, proces ten poprzedzony jest, jak poprzednio, odspojeniem kompozytu od powierzchni betonu, a następnie po przejęciu całej dodatkowej siły rozciągającej przez kompozyt dochodzi do wysunięcia jego końców spod blach kotwiących. Takie zniszczenie elementu świadczy o nieskutecznym zakotwieniu kompozytu na końcach. Biorąc pod uwagę ten powód zniszczenia, nie można jednoznacznie zinterpretować wartości maksymalnych całkowitych odkształceń kompozytu pomierzonych w elementach, w których doszło do takiego zniszczenia. Na różnice w wartościach zarejestrowanych odkształceń kompozytu może mieć większy wpływ brak skutecznego ich zakotwienia, niż sprowadzony



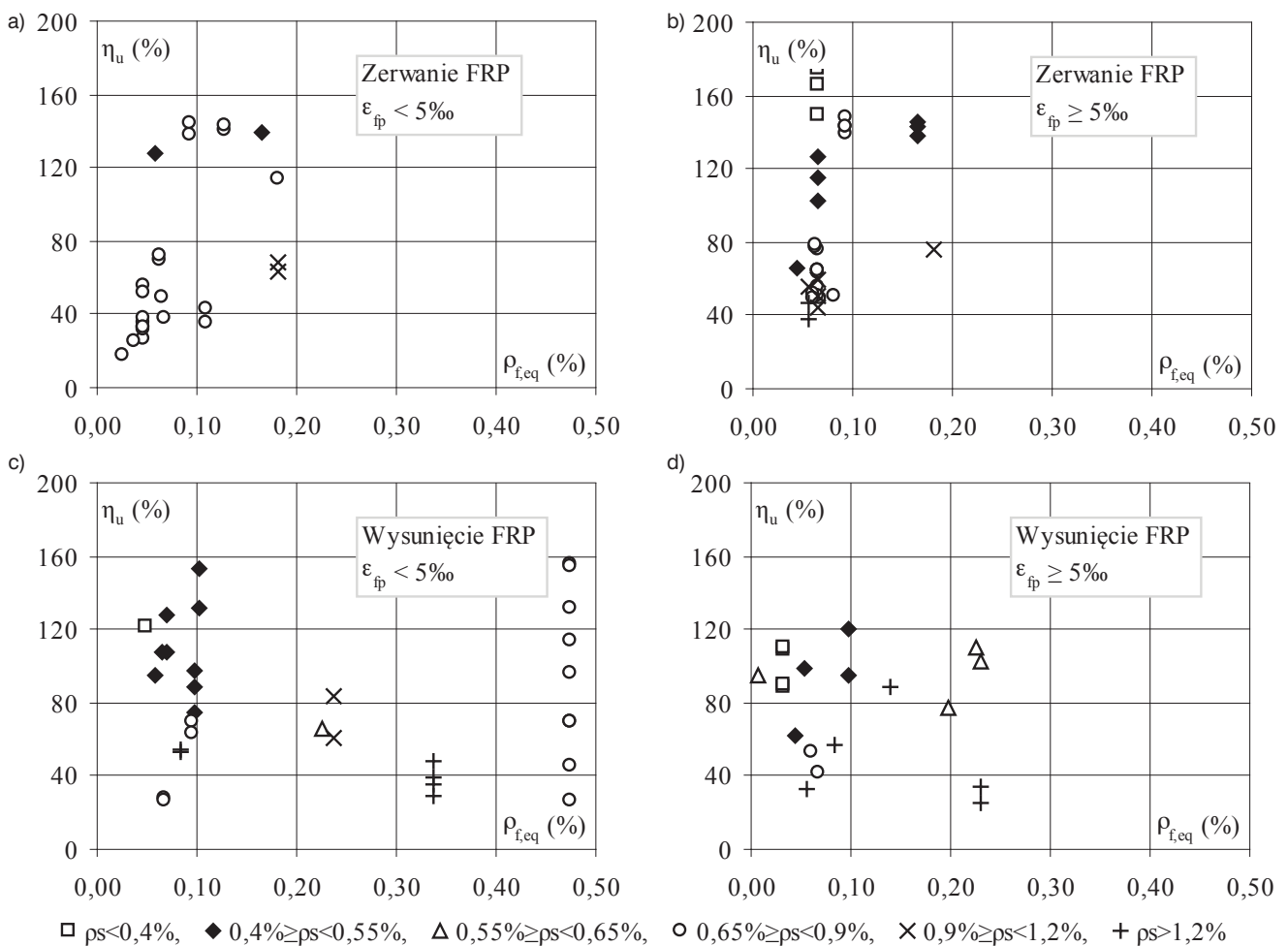
□  $ps < 0,4\%$ , ◆  $0,4\% \geq ps < 0,55\%$ , △  $0,55\% \geq ps < 0,65\%$ , ○  $0,65\% \geq ps < 0,9\%$ , ×  $0,9\% \geq ps < 1,2\%$ , +  $ps > 1,2\%$

**Rys. 1.** Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq}$  na całkowite odkształcenia kompozytu  $\epsilon_{f,tot}$  w elementach, które zniszczyły się przez: a, b) zerwanie; c, d) wysunięcie kompozytu z zakotwienia

stopień zbrojenia kompozytowego czy też stopień istniejącego zbrojenia stalowego. W wypadku zniszczenia przez utratę zakotwienia taśmy interpretacja wyników jest dość kłopotliwa i mało wiarygodna, gdyż kompozyt wysuwa się w sposób nie do końca kontrolowany przy różnych wartościach odkształceń  $\Delta\varepsilon_{f, test}$  po odspojeniu (odpowiadającym odkształceniom  $\varepsilon_{f, b}$ ). Aby analiza wpływu parametrów zmiennych była wiarygodna i pozwoliła na uogólnienie wniosków z badań zebranych w bazie danych, autorzy dokonali podstawowego podziału elementów badawczych na te, które zniszczyły się na skutek zerwania kompozytu oraz te, w których po odspojeniu kompozytu doszło do wysunięcia końców ze szczęk kotwiących. Następnie elementy podzielono ze względu na poziom naprężania kompozytu przed wzmocnieniem, określony wartością odkształcenia taśmy/maty przy sprężeniu  $\varepsilon_{f, p}$ . Za wartość podziału przyjęto  $\varepsilon_{f, p} = 5\text{‰}$ .

Z porównania całkowitych odkształceń kompozytu  $\varepsilon_{f, tot}$  w funkcji sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f, eq}$  wynika, że jeśli do zniszczenia dochodzi przez zerwanie zbrojenia kompozytowego, to w elementach z kompozytami naprężonymi do poziomu  $\varepsilon_{f, p} < 5\text{‰}$  wraz ze wzrostem sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego, wyraźnie ujawnia się spadek całkowitych odkształceń kompozytu zarejestrowanych

w chwili zniszczenia. Jest to oczywiste, ponieważ słabiej naprężony kompozyt odspaja się wcześniej niż osiągnie wytrzymałość na rozciąganie, a tym samym po jego odspojeniu od powierzchni betonu zachowuje się jak zewnętrzny ściąg połączony z elementem w miejscu zakotwień. Po odspojeniu taśmy spada sztywność elementu, przez co doznaje on większego ugięcia, co skutkuje powstaniem dodatkowych naprężeń prostopadłych do podłużnej osi kompozytu, a tym samym do wcześniejszego zerwania, niż w wypadku pełnej przyczepności kompozytu na długości elementu (rys. 1a). Jeśli zaś poziom wstępny naciągu taśmy wynosi  $\varepsilon_{f, p} \geq 5\text{‰}$ , wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego przestaje być istotny na całkowite odkształcenie kompozytu, ponieważ wtedy na ogół dochodzi do jednoczesnego zerwania i odspojenia kompozytu (rys. 1b). Jeśli zaś wzmocniony element niszczy się przez wysunięcie końców kompozytu z zakotwień, to przy jego wstępnym naciągu  $\varepsilon_{f, p} < 5\text{‰}$ , wraz ze wzrostem sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego maleją odkształcenia przyczepności  $\varepsilon_{f, b}$ , a odspojony kompozyt przy nieskutecznym zakotwieniu wysuwa się szybciej (czyli przy mniejszych odkształceniach  $\Delta\varepsilon_{f, test}$ , (rys. 1c)). Jeśli zaś naprężenie wstępne odpowiada  $\varepsilon_{f, p} \geq 5\text{‰}$ , do odspojenia dochodzi później, a więc  $\Delta\varepsilon_{f, test}$  przy wysunięciu kompozytu osiąga większe wartości, co sprawia, że



**Rys. 2.** Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f, eq}$  na stopień wzmocnienia  $\eta_u$  elementów, które zniszczyły się przez: a, b) zerwanie, c, d) wysunięcie kompozytu z zakotwienia



całkowite odkształcenia kompozytu przestają być wrażliwe na zmiany stopnia zbrojenia kompozytowego (rys. 1d). Korzystny wpływ poziomu naprężenia taśm CFRP do wartości 60% wytrzymałości na rozciąganie został wcześniej potwierdzony w publikacji [12] i określony, jako najbardziej optymalny stopień naprężenia taśm kompozytowych CFRP. Dochodzi wówczas do jednoczesnego odspojenia i zerwania kompozytu. Należy ponadto zwrócić uwagę, że całkowite odkształcenia kompozytu w przypadku jego naprężenia  $\varepsilon_{f,p} < 5\%$ , bardzo zależą od stopnia zbrojenia stalowego wzmacnianego elementu i są tym wyższe, im niższy jest stopień zbrojenia zwykłego. Jest to wynik niższej sztywności na zginanie takich elementów i ich większej odkształcalności. Całkowite odkształcenia  $\varepsilon_{f,tot}$  w elementach, w których nastąpiło zerwanie kompozytu osiągały wyższe wartości, niż odkształcenia taśm, które wysunęły się z zakotwień (rys. 1a–d). Szczególnie wyraźnie widać tę różnicę w elementach, które wzmacniono taśmą naprężoną do  $\varepsilon_{f,p} < 5\%$ . Przy zniszczeniu przez zerwanie taśmy wartości  $\varepsilon_{f,tot}$  wahały się w granicach od 9 do 16%, podczas gdy elementy w których taśma wysunęła się z zakotwień nie przekroczyły wartości 13% (rys. 1a, c). Przy silniej naprężonych kompozytach  $\varepsilon_{f,p} \geq 5\%$  całkowite odkształcenia taśmy  $\varepsilon_{f,tot}$  były nieznacznie wyższe przy zerwaniu taśmy (wahały się w granicach od 11% do 16,4%). Podobne wartości  $\varepsilon_{f,tot}$  odnotowano przy wysunięciu taśmy z zakotwień, choć w porównaniu ze wstępnym naciągnięciem taśm  $\varepsilon_{f,p} < 5\%$  były to wartości wyższe dla tego typu zniszczenia.

Analizując wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego na efektywność wzmocnienia  $\eta_u$ , można zaobserwować wzrost stopnia wzmocnienia wraz ze wzrostem zbrojenia kompozytowego, w elementach o niskim stopniu naprężania taśm CFRP  $\varepsilon_{f,p} < 5\%$ , tym wyższy, im niższy jest stopień wewnętrznego zbrojenia stalowego. Potwierdza to powszechną opinię o wyższej efektywności wzmocnienia elementów słabiej zbrojonych. Najwyższy stopień wzmocnienia uzyskano w elementach wzmacnionych kompozytami CFRP naprężonymi do poziomu  $\varepsilon_{f,p} \geq 5\%$ , szczególnie jeśli zniszczyły się przez zerwanie kompozytu ( $\eta_u$  w granicach od 47% do 248% (rys. 2b)). Najniższy zaś stopień wzmocnienia odnotowano w elementach silnie sprężonych, w których doszło do wysunięcia końców kompozytu z zakotwień, a taśmy naprężone były do  $\varepsilon_{f,p} \geq 5\%$  (rys. 2d). Poziom wzmocnienia nie przekroczył wówczas 120%.

## 5. Podsumowanie

Wyniki badań potwierdzają opinię o spadku stopnia wzmocnienia elementu wraz ze wzrostem stopnia wewnętrznego zbrojenia stalowego. Najslabiej zbrojone elementy żelbetowe wykazują najwyższy stopień wzmocnienia dochodzący do  $\eta_u = 250\%$ . Natomiast te najsilniej zbrojone stały wykazują ograniczony przyrost nośności w zakresie od  $\eta_u = 25\%$  do 110%, przy takim samym stopniu zbrojenia kompozytowego. Analiza wyników badań potwierdza opinię o korzystnym wpływie stopnia naprężenia taśm lub mat CFRP na stopień wzmocnienia elementu. Autorzy rekomendują więc jako efektywny poziom naprężenia kompozytów  $\varepsilon_{f,p} \geq 5\%$ . Wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{t,eq}$  widać wyraźny wzrost

stopnia wzmocnienia elementu  $\eta_u$ . Z doświadczeń własnych i analizy obszernej bazy badań obcych wynika, że najwyższą skuteczność wzmocnienia na zginanie przy użyciu naprężonych kompozytów CFRP można uzyskać jedynie przy skutecznym ich zakotwień. Przyszłe prace badawcze powinny więc skoncentrować się na opracowaniu takich zakotwień.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bartosik T., Kałuża M., Wzmacnianie konstrukcji z betonu materiałami na bazie włókien węglowych, szklanych i aramidowych, rodzaje produktów, zasady projektowania, technologia wykonywania i kontrola jakości robót, XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektowania Konstrukcji, Szczyrk, str. 1–38, 2006
  - [2] Górski M., Krzywoń R., Hulimka J., Ajdukiewicz A., Majewski S., Opracowanie zasad obliczania wzmocnień konstrukcji betonowych za pomocą mat z włókien węglowych. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego nr 7 T07E 011 18, Gliwice, 2002
  - [3] Kałuża M., Wybrane problemy wzmacniania konstrukcji żelbetowych sprężonymi taśmami z włókien węglowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, zeszyt 102, Gliwice, 2004, str. 93–20
  - [4] Kałuża M., Ajdukiewicz A., Comparison of behaviour of concrete beams with passive and active strengthening by means of CFRP strips., Architecture Civil Engineering Environment – ACEE 2/2008, str. 51–64
  - [5] Kotynia R., Odkształcalność i nośność zginanych elementów żelbetowych wzmacnionych taśmami z włókien węglowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 1999
  - [6] Kotynia R., Kamińska M.E., Odkształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmacnionych na zginanie materiałami CFRP, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji betonowych, Z. 13, Wyd. Kat. Bud. Bet. PŁ, Łódź, 2003
  - [7] Kotynia R., Staśkiewicz M., Analiza efektywności wzmocnień elementów zginanych przy użyciu naprężonych kompozytów CFRP, Budownictwo i Architektura, tom 12, 1/2013, str. 131–138
  - [8] Kotynia R., Staśkiewicz M., Lasek K., Strengthening efficiency of reinforced concrete members post-tensioned in flexure with CFRP materials. State of the art in experimental research (w trakcie recenzji), 2018
  - [9] Lasek K., Efektywność wzmacniania żelbetowych elementów na zginanie wstępnie naprężonymi taśmami z włóknami węglowymi, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2015
  - [10] Łagoda M., Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami wstępnie sprężonymi, cz. 1, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 3/2012, str. 52–54
  - [11] Łagoda M., Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami wstępnie sprężonymi, cz. 2, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 4/2012, str. 48–51
  - [12] Meier U., Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, Construction Building Materials 9(6)/1995, str. 341–351
  - [13] Meier U., Kotynia R., Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych naprężonymi materiałami kompozytowymi FRP, Inżynieria i Budownictwo 11/2006, str. 596–599
  - [14] Piątek B., Nowa technologia wzmacniania konstrukcji betonowych naprężanymi taśmami CFRP, Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, 2017
  - [15] Piątek B., Siwowski T., Investigation of strengthening effectiveness of reinforced concrete bridge with prestressed CFRP strips, Drogi i Mosty 15/2016, str. 301–314
  - [16] Siwowski T., Radomski W., Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. Inżynieria i Budownictwo 7/1998, str. 382–388
- W piśmiennictwie nie wykazano 28 zagranicznych artykułów, które stanowią podstawę przeprowadzonej analizy. Zestawienie tych publikacji zamieszczono w pracy [8].