

Wpływ gatunku stali zbrojenia głównego na nośność na zginanie i graniczne odkształcenia kompozytu przy wzmacnianiu taśmami CFRP

Dr inż. Przemysław Bodzak, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Konieczność naprawy albo wzmocnienia istniejących konstrukcji budowlanych wynika w większości przypadków z diametralnie odmiennych powodów i różne są z reguły oczekiwania co do efektów tych działań.

Naprawy użytkowanych konstrukcji związane są w głównej mierze z potrzebą przywrócenia obiektu do stanu zbliżonego do pierwotnego, zapewniającego właściwy poziom bezpieczeństwa poprzez poprawę parametrów użytkowych i wydłużenie okresu bezpiecznej eksploatacji (zwiększenie trwałości). Wzmocnienia wykonywane w obiektach istniejących mają z reguły na celu podniesienie nośności, która jest na danym etapie użytkowania obiektu niewystarczająca w związku ze zmianą sposobu użytkowania i koniecznością zwiększenia obciążeń, poprzez błędy projektowe jak i wykonawcze, powstałe podczas realizacji obiektu, a także niewłaściwe użytkowanie obiektu.

2. Metody wzmacniania konstrukcji żelbetowych

Wzmocnienie ma na celu dostosowanie lub przywrócenie wymaganego poziomu bezpieczeństwa, a także zapewnienie odpowiedniej trwałości obiektu przez zakładany okres użytkowania (np. poprzez ograniczenie szerokości rys). Z tego względu wzmocnienia wykonujemy w obiektach wykonanych, zarówno wiele lat temu, jak i czasami już na etapie ich wznoszenia, przy czym w przypadku konstrukcji żelbetowych sposoby wykonywania wzmocnień są bez mała jednakowe dla obu tych sytuacji. Zwiększenie nośności fragmentów konstrukcji możemy osiągnąć poprzez zmianę gabarytów (beton) lub zmianę przekroju poprzecznego prętów rozciąganych/ściskanych zastosowanych w elemencie [1]. Ten drugi sposób wzmocnienia jest zdecydowanie częściej stosowany, gdyż ingerencja w geometrię obiektu (np. wysokość kondygnacji, rozmiary elementów) jest minimalna. Także pod względem technologii wykonania jest to metoda łatwiejsza do zrealizowania, zwłaszcza w użytkowanym obiekcie.

Wzmocnienie za pomocą dodatkowego zbrojenia rozciąganego jest stosowane z powodzeniem od wielu lat. W klasycznym rozwiązaniu są to dodatkowe pręty zbrojeniowe [2] lub płaskowniki stalowe [3] w nowoczesnym – materiały kompozytowe [4] również z wstępnym napięciem [5]. Zasada działania zbrojenia zewnętrznego jest taka sama, niezależnie od rodzaju zastosowanego materiału, czyli przejęcie dodatkowych sił rozciągających, które wystąpią w konstrukcji np. w wyniku zwiększenia obciążeń użytkowych. Różnice występują w sposobie aplikacji tych materiałów. Zbrojenie stalowe z reguły mocujemy do konstrukcji wyłącznie za pomocą łączników mechanicznych (kotwienie mechaniczne) lub klejenia i łączników mechanicznych (kotwienie mechaniczno-przyczepnościowe), natomiast materiały kompozytowe przy zastosowaniu jedynie kleju (kotwienie przyczepnościowe).

Właśnie taki sposób mocowania stanowi teoretycznie jedną z zalet wzmocnień z materiałów kompozytowych. Po przygotowaniu powierzchni betonu należy nanieść warstwę kleju na taśmę lub matę i przykleić ją do konstrukcji. Brak konieczności stosowania łączników mechanicznych (wiercenie), duża nośność, odporność na czynniki korozyjne sprawiają, że ten sposób wzmocnienia konstrukcji staje się coraz bardziej popularny.

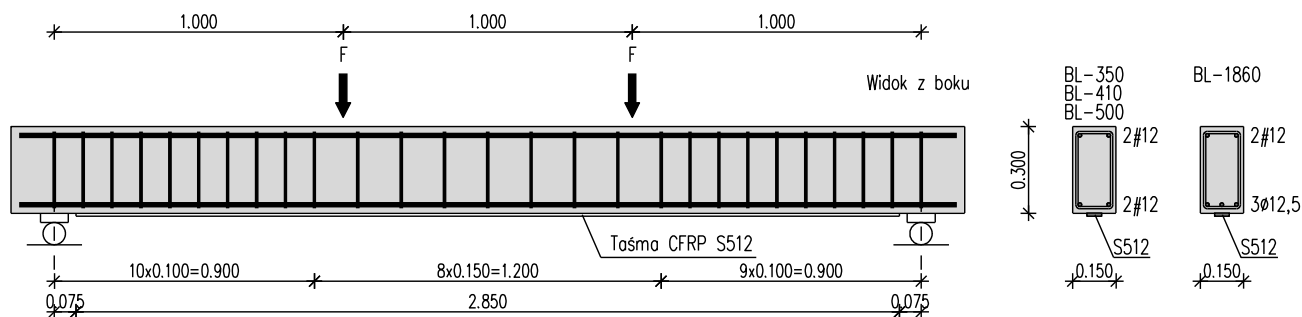
Dotychczasowe badania dotyczące możliwości zwiększenia nośności elementów żelbetowych przy użyciu taśm lub mat kompozytowych umożliwiły przygotowanie procedur obliczeniowych związanych ze stosowaniem takich materiałów przyklejanych do powierzchni elementu. Równocześnie badania te pokazały, że ze względu na brak połączenia mechanicznego z istniejącą konstrukcją najbardziej niebezpieczne jest odspojenie kompozytu od powierzchni elementu [6, 7, 8, 9]. Jest to zniszczenie nagłe, nie sygnalizowane wcześniej poprzez zwiększenie szerokości rys lub ugięcia elementu.

Analiza obliczeniowa elementów wzmocnionych na zginanie uwzględnia parametry związane m.in. z geometrią elementu, typem wzmocnienia, sztywnością materiału przyklejonego, długością jego zakotwienia, wytrzymałością betonu i stopniem zbrojenia zwykłego, czyli wielkość cech charakterystycznych dla typowych elementów żelbetowych. Stal jako materiał jest teoretycznie

jednakowa we wszystkich wzmacnianych elementach. Z tego względu ten atrybut jest pomijany przy obliczeniach związanych z przyczepnością kompozytu do betonu. W rzeczywistości jedynie moduł sprężystości jest jednakowy, natomiast poszczególne gatunki stali różnią się wytrzymałością, a przede wszystkim granicą plastyczności. Stosowanie dwóch gatunków stali w jednym elemencie wzmacnianym nie stanowi problemu ze względu na dużą ciągliwość stali używanych w budownictwie i dobre zespolenie z betonem poprzez kotwienie mechaniczne, co w konsekwencji prowadzi do wykorzystania w pełni cech wytrzymałościowych obu materiałów. W przypadku wzmocnień wykonywanych przy użyciu kompozytów stosujemy dwa zupełnie odmienne materiały pod względem właściwości fizycznych. Jak wspomniano wcześniej, stal charakteryzuje się granicą plastyczności, wzmocnieniem, wytrzymałością na zerwanie, czyli nie jest w pełni materiałem o właściwościach linowo sprężystych. Natomiast typowe materiały kompozytowe w całym zakresie obciążenia, aż do zerwania podlegają prawu Hooke'a. Właśnie właściwości stali mogą mieć istotne znaczenie przy analizie nośności elementów wzmacnianych. Należy również zauważyć, że przez ostatnie sto lat stosowaliśmy różne gatunki stali, dlatego w rzeczywistych konstrukcjach możemy spotkać stale o różnych granicach plastyczności i to zarówno rzeczywistych, jak i umownych. Z tego względu przygotowano program badań umożliwiający weryfikację doświadczalną wpływu zastosowania różnych gatunków stali na nośność elementu po wzmocnieniu taśmami CFRP.

3. Program badań

Wytrzymałość betonu jest jednym z istotniejszych parametrów, decydujących o nośności elementu wzmacnianego przy użyciu materiałów kompozytowych. W celu wyeksponowania wpływu tego parametru na nośność elementu poprzez powstanie już we wstępnej fazie obciążenia, zarówno rys od zginania w środku rozpiętości, jak i rys od ścinania w strefie przypodporowej, postanowiono zastosować beton o bardzo małej wytrzymałości $f_{c, cube} = 20$ MPa. Jako element badawczy wykorzystano jednoprzęsłową belkę o rozpiętości 3,0 m, obciążoną dwiema siłami skupionymi, każda w odległości 1,0 m od podpory. W tak ukształtowanym elemencie można zatem wydzielić dwie strefy przypodporowe (ściananie, zakotwienie taśmy) oraz odcinek czystego zginania. Belki miały przekrój prostokątny o wymiarach 0,15 m x 0,30 m i wysokość użyteczną 0,27 m – rysunek 1. Zgodnie z założeniami programu badań postanowiono zastosować 4 gatunki stali do wykonania zbrojenia głównego elementu, a mianowicie AII ($f_{yk} = 350$ MPa), AIII ($f_{yk} = 410$ MPa), AIIIN ($f_{yk} = 500$ MPa) oraz sploty S7 ($f_{yk} = 1860$ MPa). W tym ostatnim przypadku jest to zastosowanie czysto teoretyczne, służące sprawdzeniu, jak zachowa się element po wzmocnieniu, jeżeli stal nie osiągnie granicy plastyczności przed wyczerpaniem nośności strefy ściskanej, przy jednoczesnych dużych odkształceniach zbrojenia rozciąganego. Zbrojenie główne stanowiły zatem odpowiednio dwa pręty # 14 ($A_s = 3,08$ cm²) lub trzy cięgna $\phi 12,5$ mm ($A_s = 2,79$ cm²).



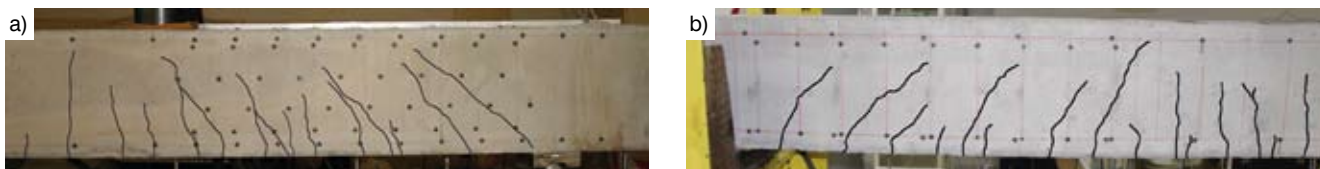
Rys. 1. Układ zbrojenia oraz schemat statyczny elementów badawczych

Tabela 1. Charakterystyka badanych elementów oraz siły i odkształcenia przy zniszczeniu

Element	Wiek dni	Stal	f_{sy} MPa	A_s cm ²	$f_{c, cube}$ MPa	F_u kN	ϵ_{fu} ‰	ϵ_{cu} ‰	Sposób zniszczenia
BL-350	607	A-II	360	1,57	23,0	48	4,77	1,23	0
BL-410	590	A-III	430	1,59	24,0	54	5,66	1,53	0
BL-500	720	A-III N	520	1,54	20,0	63	6,22	2,33	0
BL-1860	1260	S7	1860 ¹	0,93 ¹	17,6	75	7,11	3,77	Z+0

1) przyjęto na podstawie danych producenta

O – odsłojenie taśmy, Z – zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej



Rys. 2. Układ rys w trakcie badania a) element BL-500, b) element BL-1860



Rys. 3. Odspojenie taśmy CFRP po zniszczeniu

Do wzmocnienia belek użyto taśmy CFRP typu S512 o $A_f = 0,60 \text{ cm}^2$, $b_f = 5 \text{ cm}$, $t_f = 1,2 \text{ mm}$, $E_f = 165 \text{ GPa}$ przyklejonej w osi elementu.

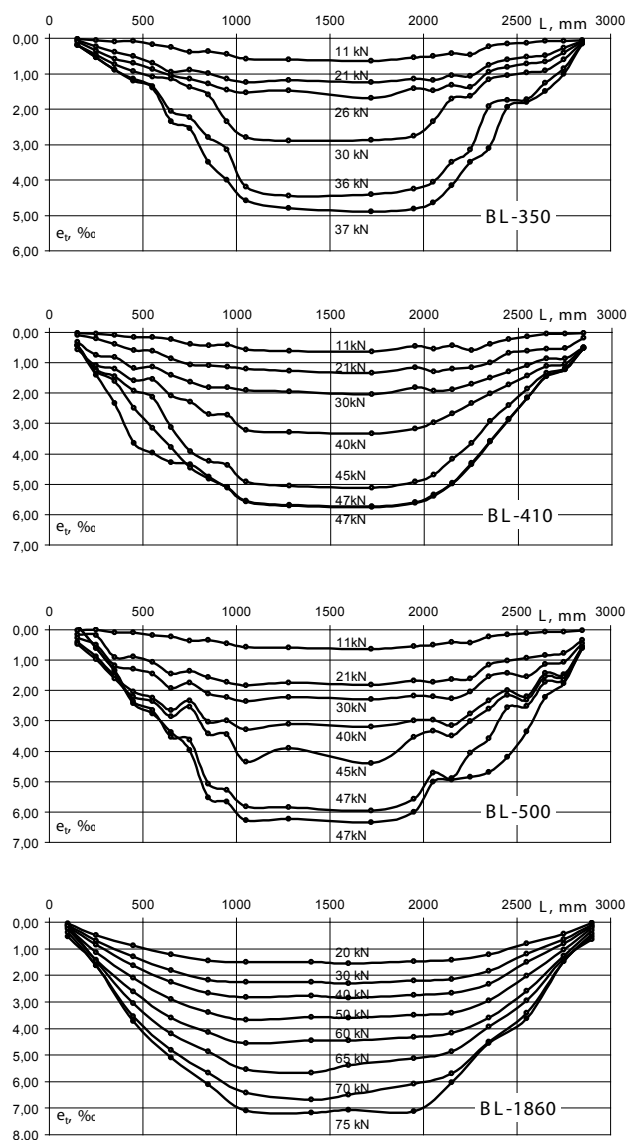
Elementy wykonano niezależnie w różnych okresach i poddano badaniu po innym czasie od chwili wykonania. W trakcie badań mierzono odkształcenia wzdłuż taśmy za pomocą tensometrów elektrooporowych oraz odkształcenia betonu wzdłuż górnej i dolnej krawędzi elementu, w osiach strzemion oraz wzdłuż teoretycznego krzyżulca ściskanego nachylonego pod kątem 45° do osi belki.

4. Analiza wyników badań

Elementy badano do zniszczenia, stosując w trakcie obciążania kilka cykli obciążenie-odciążenie symulujących rzeczywistą pracę konstrukcji. Podstawowe parametry wytrzymałościowe zastosowanych materiałów oraz siły niszczące przedstawiono w tabeli 1.

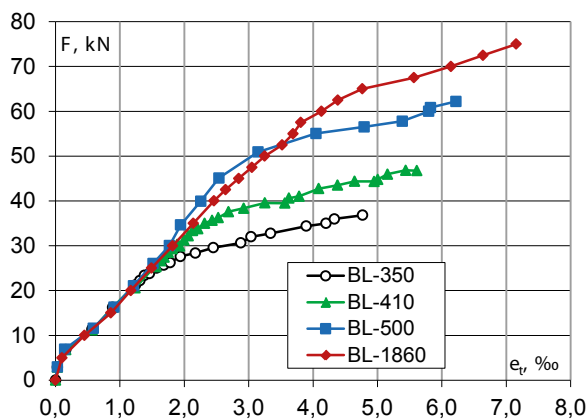
Ze względu na bardzo niską wytrzymałość zastosowanego betonu we wszystkich elementach rysy prostopadłe do osi elementu pojawiły się już przy obciążeniu około 10 kN natomiast rysy ukośne przy obciążeniu 20–30 kN – rysunek 2. Przy kolejnych krokach obciążenia rysy ukośne wystąpiły również w miejscu zakończenia taśmy CFRP, co jednak nie doprowadziło do wyczerpania nośności elementu.

Wszystkie belki zniszczyły się w wyniku odspojenia taśmy od powierzchni betonu (rys. 3), przy czym siła niszcząca różniła się zdecydowanie w przypadku poszczególnych elementów, mimo zbliżonej wytrzymałości betonu zastosowanego do ich wykonania, a także zastosowania prawie jednakowego stopnia zbrojenia



Rys. 4. Odształcenia taśmy CFRP przy kolejnych poziomach obciążenia

podstawowego. Najmniejsze obciążenie niszczące $F_u = 38 \text{ kN}$ zanotowano w przypadku elementu ze zbrojeniem ze stali AII, natomiast największe – $F = 75 \text{ kN}$ przy zniszczeniu elementu ze zbrojeniem ze splotów S7. Bezpośrednią przyczyną wyczerpania nośności, w tym drugim przypadku było zmiażdżenie betonu w strefie ściskanej, które postępowało począwszy od obciążenia wynoszącego 67,5 kN. W tym też elemencie odnotowano największe odkształcenie betonu w strefie ściskanej wynoszące 3,77 ‰. Podobnie sytuacja przedstawiała



Rys. 5. Średnie odkształcenia taśmy CFRP na odcinku czystego zginania

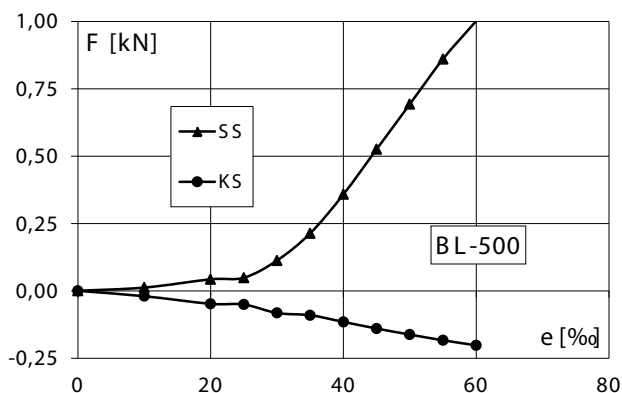
się w przypadku odkształceń wzdłuż taśmy CFRP – największe lokalne odkształcenia wystąpiły w elemencie BL-1860 zbrojonym cięgnami sprężającymi – $\varepsilon_t = 7,16\%$, a najmniejsze w elemencie BL-350 (zbrojenie ze stali AII) $\varepsilon_t = 4,89\%$ – por. rysunek 4.

Na graniczne odkształcenia taśmy w chwili odspojenia nie miała istotnego wpływu wytrzymałość betonu, gdyż właśnie w elemencie BL-1860 z największymi pomierzonymi odkształceniami taśmy CFRP wytrzymałość betonu była najniższa $f_{c, cube} = 17,6$ MPa. Można przypuszczać, że w przypadku zastosowania betonu o wyższej wytrzymałości zniszczenie strefy ściskanej nastąpiłoby przy wyższym obciążeniu, a odkształcenia taśmy byłyby jeszcze większe.

Porównanie średnich odkształceń w strefie stałego momentu zginającego pokazano na rysunku 5. W początkowej fazie obciążenia zależność odkształcenie-obciążenie tworzy wykres liniowy z wyraźnym punktem przełamańia oznaczającym powstanie rys od zginania.

Zróznicowanie wielkości odkształceń rozpoczyna się z chwilą uplastycznienia zbrojenia w poszczególnych elementach. Od tego poziomu obciążenia obserwujemy zdecydowanie większy przyrost odkształceń w taśmie w porównaniu z elementami, w których w zbrojeniu stalowym nie wystąpiły odkształcenia plastyczne. W przypadku elementu BL-1860 widoczny na wykresie nieliniowy przyrost odkształceń w taśmie nie jest związany z odkształceniami zbrojenia głównego, a z odkształceniami betonu w strefie ściskanej przekroju. Jak wspomniano wcześniej, w tym elemencie nastąpiło zmiażdżenie betonu, co było bezpośrednio przyczyną wyczerpania nośności.

Z przeprowadzonego porównania wynika jednoznacznie, że wraz ze wzrostem granicy plastyczności stali zbrojenia głównego elementu wzrasta obciążenie niszczące, a także odkształcenia w taśmie w chwili jej odspojenia od betonu. Proces ten powiązany jest bezpośrednio z uplastycznieniem zbrojenia głównego, jednak na podstawie przeprowadzonych badań nie można jednoznacznie stwierdzić, jakie jest graniczne odkształcenie taśmy, przy którym rozpoczyna się proces odspojenia



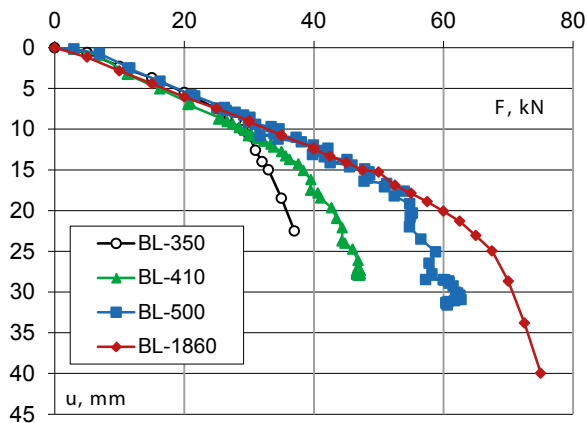
Rys. 6. Średnie odkształcenia wzdłuż krzyżulca ściskanego KS oraz strzemion SS – element BL-500

ze względu na zastosowanie stali z wyraźnymi i umownymi granicami plastyczności. Nie jest to jednak wartość stała, jak podano na przykład w [4]. Uplastycznienie stali powoduje znaczący przyrost szerokości rys i to może być jednym z czynników inicjujących proces odspojenia wzmocnienia kompozytowego od powierzchni betonu.

Należy oczywiście zauważyć, że nie tylko stal, a w szczególności jej granica plastyczności, decyduje o obciążeniu niszczącym w wyniku odspojenia kompozytu. Pozostałe czynniki, wskazane w dotychczasowych badaniach, mają również wpływ na proces odspojenia kompozytu od powierzchni betonu. Można z tego względu przypuszczać, że w elementach wykonanych z betonów wyższych klas, zbrojonych stalą o dużej wytrzymałości, a co z tym związane o wysokiej granicy plastyczności jeszcze przed uplastycznieniem zbrojenia nastąpi odspojenie taśmy w wyniku przekroczenia granicznych naprężeń przyczepności na styku taśma-klej-beton. Taka sytuacja może mieć miejsce jednak jedynie w przypadku stosowania zbrojenia o bardzo wysokiej granicy plastyczności np. na stali sprężającej.

Innym czynnikiem, inicjującym proces odspojenia taśmy od betonu, może być znaczna dyslokacja powierzchni elementu żelbetowego na początku rysy ukośnej [10]. Związane to jest z wzajemnym przemieszczeniem pionowym obu fragmentów elementu wydzielonych rysą przy zbyt małym zbrojeniu na ścinanie. W opisywanych badaniach nie stwierdzono rys ukośnych o znacznych szerokościach, a naprężenia średnie w strzemionach były znacznie niższe od granicy plastyczności stali. Średnie naprężenia w strzemionach w belce na przykładzie elementu BL-500 pokazano na rysunku 6.

Wzmocnienia stosujemy zawsze w sytuacjach, gdy chcemy zwiększyć obciążenia lub poprawić warunki użytkowania na przykład poprzez zmniejszenie szerokości rys czy ugięć. Jednocześnie te ostatnie dwa zjawiska w przypadku przeciążenia konstrukcji wpisują się w system „ostrzegania” o przeciążeniu konstrukcji. Na rysunku 7 przedstawiono wykresy, obrazując zależności między obciążeniem a ugięciem elementu. Z wykresów tych



Rys. 7. Ugięcie elementów w środku rozpiętości

możliwe jest odczytanie poziomów obciążenia, przy których następowała zmiana sztywności elementu, związana z właściwościami fizycznymi zastosowanych materiałów. Pierwszy punkt charakterystyczny to zarysowanie prostopadłe do osi elementu („na zginanie”) widoczny jest przy obciążeniu około 7,5 kN. Kolejny związany jest z uplastycznieniem zbrojenia. Dla elementów BL-350, BL-410 oraz BL-500 ugięcie przy obciążeniu powodującym uplastycznienie zbrojenia stanowiło około 50% całkowitego ugięcia w chwili zniszczenia. Z jednej strony jest to znaczący przyrost ugięć po uplastycznieniu zbrojenia, z drugiej strony ze względu na liniowo sprężyste właściwości kompozytów nie mamy tak dużych odkształceń i znacznego przyrostu ugięć, świadczącego o przeciążeniu konstrukcji, do jakiego jesteśmy przyzwyczajeni w przypadku zbrojenia tradycyjnego. Zniszczenie elementu jest nagłe i następuje w wyniku odspojenia kompozytu. Z tego względu należy uznać, że wzrost ugięcia o 50% nie zawsze jest wystarczająco mocnym sygnałem świadczącym o przeciążeniu grożącym katastrofą budowlaną.

Dążenie do maksymalnego wykorzystania właściwości fizycznych materiałów kompozytowych, tj. ich wytrzymałości na rozciąganie zwłaszcza w przypadku braku kotwienia mechanicznego może prowadzić do zmniejszenia poziomu bezpieczeństwa konstrukcji. W każdym przypadku globalny współczynnik bezpieczeństwa powinien być większy od 1, oczywiście przy uwzględnieniu rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych materiałów uzyskanych na podstawie badań in situ. Po uszkodzeniu wzmocnienia, czyli odspojeniu kompozytu niewzmocniona konstrukcja nie powinna ulec zniszczeniu przy uwzględnieniu projektowanych obciążeń w sytuacji wyjątkowej.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały, że również przy bardzo niskiej wytrzymałości betonu, nawet mniejszej od 20 MPa wzmocnienia wykonane z taśm CFRP mają bardzo dobrą przyczepność do betonu. Przy takich

niskich wytrzymałościach betonu zniszczenie następuje w wyniku odspojenia taśmy lub zmiężdżenia betonu w strefie ściskanej, przy czym bezpośrednią przyczyną odspojenia taśmy może być powiązana z parametrami wytrzymałościowymi zbrojenia podstawowego belki. Uplastycznienie zbrojenia głównego inicjuje w pewnym stopniu proces odspojenia. Odkształcenia taśmy przy zniszczeniu elementu są różne, zależą od granicy plastyczności zastosowanej stali zbrojeniowej i wahają się w przedziale 4,8–6,2‰ dla stali o $f_{yk} = 360\text{--}520\text{ MPa}$ i rosną do 7,16‰ dla stali o $f_{yk} = 1860\text{ MPa}$. Na graniczne odkształcenia taśmy przy odspojeniu mniejszy wpływ ma wytrzymałość betonu przy niskiej jego wytrzymałości ($f_{c, cube} \approx 20\text{ MPa}$) niż parametry wytrzymałościowe stali.

Ze względu na właściwości fizyczne, tj. brak ciągliwości, a także na sposób zniszczenia elementów wzmocnianych materiałami CFRP wskutek nagłego odspojenia kompozytu oraz w związku z brakiem wyraźnej sygnalizacji przeciążenia poprzez znaczący przyrost ugięć i zwiększenie szerokości rys, globalny współczynnik bezpieczeństwa dla takich konstrukcji, dla nowego układu obciążeń, powinien być zawsze większy od 1 przy pominięciu w analizie obliczeniowej wpływu wzmocnienia na nośność. W wielu przypadkach dążenie do maksymalnego wykorzystania właściwości fizycznych kompozytów wydaje się być niewłaściwe, gdyż o racjonalności takich działań decydować powinno globalne bezpieczeństwo konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Urban T., Wzmocnianie konstrukcji żelbetowych metodami tradycyjnymi, PWN, Warszawa, 2015
- [2] Urban T., Badania belek żelbetowych wzmocnionych dwoma sposobami, Inżynieria i Budownictwo nr 2/2002, str. 106–109
- [3] Urban T., Badania belek żelbetowych wzmocnionych zbrojeniem zewnętrznym zespolonym śrubami wklejanymi, Inżynieria i Budownictwo nr 11/2003, str. 624–628
- [4] Kamińska M. E., Kotynia R., Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP. Badania Doświadczalne elementów i Konstrukcji Betonowych, zeszyt nr 9, Łódź, 2000
- [5] Kotynia R., Przyczepnościowe metody wzmocniania konstrukcji żelbetowych przy użyciu naprzężonych kompozytów polimerowych, Przegląd Budowlany 7–8/2015, str. 49–56
- [6] Teng J. G., Smith S. T., Yao J., Chen J. F., Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs, Construction and Building Materials 17, str. 447–462, 2003
- [7] Buyukozturk O., Gunes O., Karaca E., Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites. Construction and Building Materials 18, str. 9–19, 2004
- [8] Chen J.F., Yuan H., Teng J.G., Debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks in concrete members Engineering Structures 29, str. 259–270, 2007
- [9] Rosenboom O., Rizkalla S., Experimental study of IC debonding in FRP strengthened beams. ACI Structural Journal January-February 2008, str. 41–50
- [10] Urban T., Tarka J., Strengthening of slab-column connections with CFRP strips. Archives of Civil Engineering, LVI, 2, str. 193–212, 2010