

Wpływ granicy plastyczności zbrojenia głównego na nośność elementów wzmocnionych kompozytami CFRP

Przemysław Bodzak¹

¹ Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, e-mail: przemyslaw.bodzak@p.lodz.pl

Streszczenie: W artykule opisano badania elementów wzmocnionych taśmami CFRP, w których zastosowano różne gatunki stali do wykonania zbrojenia podstawowego. Stwierdzono, iż zasadniczy wpływ na poziom siły niszczącej powodującej delaminację taśmy ma granica plastyczności zastosowanego zbrojenia.

Słowa kluczowe: bela żelbetowa, wzmocnienie, taśmy CFRP, granica plastyczności zbrojenia.

1. Wprowadzenie

Badania dotyczące elementów wzmocnionych taśmami CFRP prowadzone są od wielu lat. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń ustalono różne typy zniszczenia, m.in. przez odspojenie końca taśmy, odspojenie przy rysie ukośnej, odspojenie przy rysie od zginania, zerwanie taśmy [1]. Analiza obliczeniowa elementów wzmocnionych na zginanie [2, 3, 4] uwzględnia parametry związane z geometrią elementu, typem wzmocnienia, sztywnością materiały przyklejonego, wytrzymałością betonu, stopniem zbrojenia zwykłego. Te propozycje obliczeniowe pomijają parametry wytrzymałościowe zastosowanej stali. Aby sprawdzić, czy założenie takie jest słuszne przygotowano program badań uwzględniających wpływ zastosowania różnych gatunków stali na nośność elementu po wzmocnieniu.

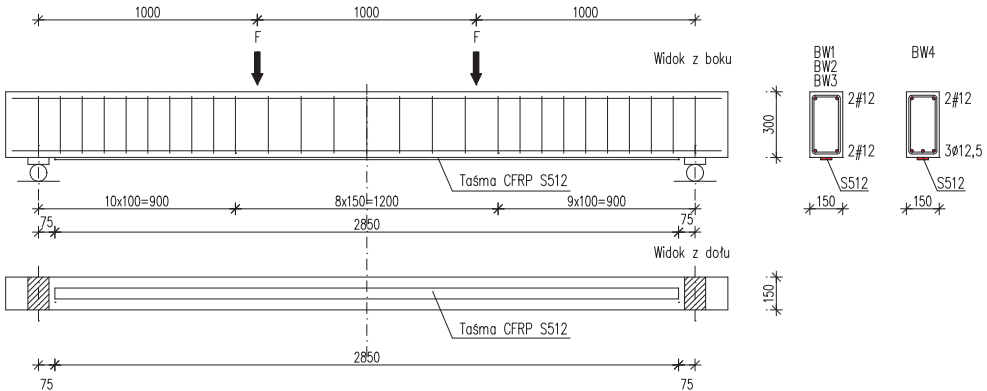
2. Program badań

2.1. Ukształtowanie elementów

Projektując element badawczy założono, że powinien się on zniszczyć „na zginanie” poprzez zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej lub odspojenie taśmy przy jednoczesnym znacznym wyteżeniu strefy przypodporowej. Jako element badawczy wybrano jednoprzęsłową swobodnie podpartą belką o rozpiętości 3,0m obciążoną parą sił skupionych ustawionych w odległości 1,0m od podpór i tworzących strefę czystego zginania o długości 1,0m – rys. 1.

Belki miały prostokątny przekrój poprzeczny o wymiarach 0,15×0,30m i wysokość użyteczną $d = 0,27m$. Takie dobranie wymiarów elementu powodowało, iż smukłość ścinania mieściła się w przedziale $a/d = 3 \div 4$, co umożliwiało obserwację wpływu ścinania na zachowanie się elementu jednocześnie bez dominacji tego parametru na nośność elementu.

Przyjęto, iż elementy badawcze zostaną wykonane z betonu o wytrzymałości kostkowej $f_{ck} = 20MPa$, tak aby rysy ukośne mogły powstać już we wczesnej fazie obciążenia.

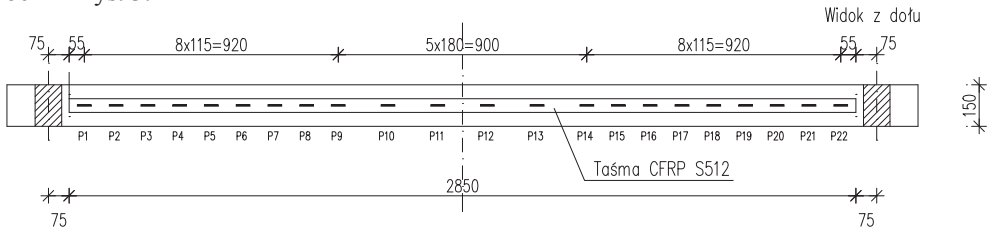


Rys. 1. Element badawczy – geometria, zbrojenie podstawowe i wzmacniające

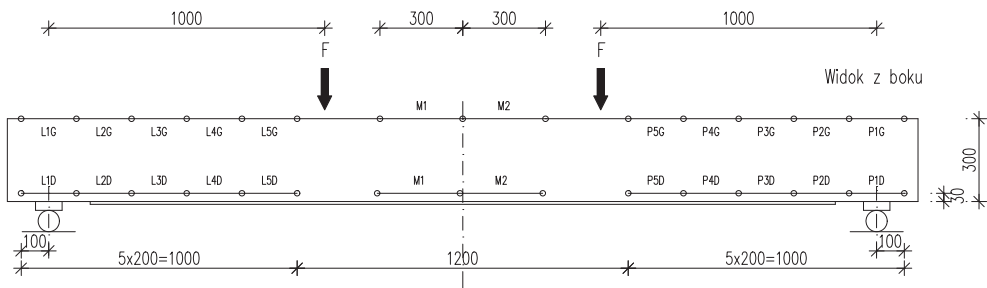
Zbrojenie główne zostało tak dobrane, aby zachować stały stopień zbrojenia równy teoretycznie 0,75%. Jako parametr zmienny przyjęto granicę plastyczności stali, z której wykonano zbrojenie główne. W badaniu zastosowano cztery gatunki stali A-II, A-III, A-III N oraz stal sprężającą o teoretycznych granicach plastyczności $f_{yk} = 350, 410, 500$ oraz 1360MPa. Zbrojenie główne stanowiły odpowiednio dwa pręty #14 ($A_s = 3,08\text{cm}^2$) lub trzy cięgna $\text{Ø}12,5\text{mm}$ ($A_s = 2,79\text{cm}^2$). Wzmocnienie belek wykonano w postaci jednej taśmy CFRP S512 o $A_f = 0,60\text{cm}^2$, $b_f = 5\text{cm}$, $t_f = 1,2\text{mm}$, $E_f = 165\text{GPa}$ [5] przyklejonej w osi elementu.

2.2. Pomiary

Pomiary odkształceń prowadzono przy użyciu tensometrów elektrooporowych naklejonych na taśmie CFRP – rys. 2. Dodatkowo mierzono odkształcenia na powierzchni betonu przy użyciu czujników indukcyjnych mocowanych wzdłuż dolnej i górnej krawędzi belki – rys. 3.



Rys. 2. Układ tensometrów pomiarowych w taśmie CFRP



Rys. 3. Układ baz pomiarowych na powierzchni betonu

3. Analiza wyników badań

Wszystkie elementy wykonano niezależnie w różnych okresach oraz poddano badaniom po innym czasie od chwili wykonania. Podstawowe parametry wytrzymałościowe zastosowanych materiałów oraz siły niszczące przedstawiono w tabeli 1.

Elementy BW1, BW2 oraz BW3 obciążano aż do zniszczenia stosując kilka cykli obciążania – odciążania w zakresie $0,2 \div 0,8$ teoretycznego obciążenia powodującego uplastycznienie zbrojenia głównego. W przypadku elementu BW4 był to przedział $0,05 \div 0,2$ teoretycznego obciążenia powodującego uplastycznienie zbrojenia.

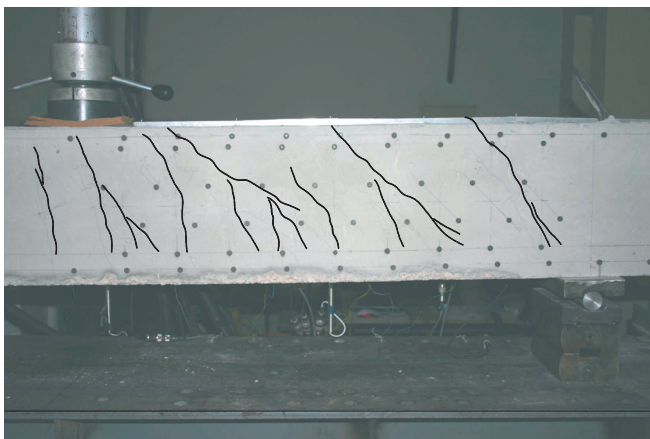
Tabela 1.

| Element | Wiek dni | Stal | f_{sy} MPa | A_s cm ² | $f_{c,cube}$ MPa | F_u kN | ϵ_{fu} ‰ | ϵ_{cu} ‰ | Sposób zniszczenia |
|---------|----------|---------|-------------------|--------------------------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| BW1 | 607 | A-II | 360 | 1,57 | 23,0 | 48 | 4,8 | 1,23 | O |
| BW2 | 590 | A-III | 430 | 1,59 | 24,0 | 54 | 5,2 | 1,53 | O |
| BW3 | 720 | A-III N | 520 | 1,54 | 20,0 | 63 | 5,7 | 2,33 | O |
| BW4 | 1260 | Y1860 | 1860 ¹ | 0,93 ¹ | 17,6 | 75 | 6,5 | 3,77 | O/Z |

1) przyjęto na podstawie danych producenta

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

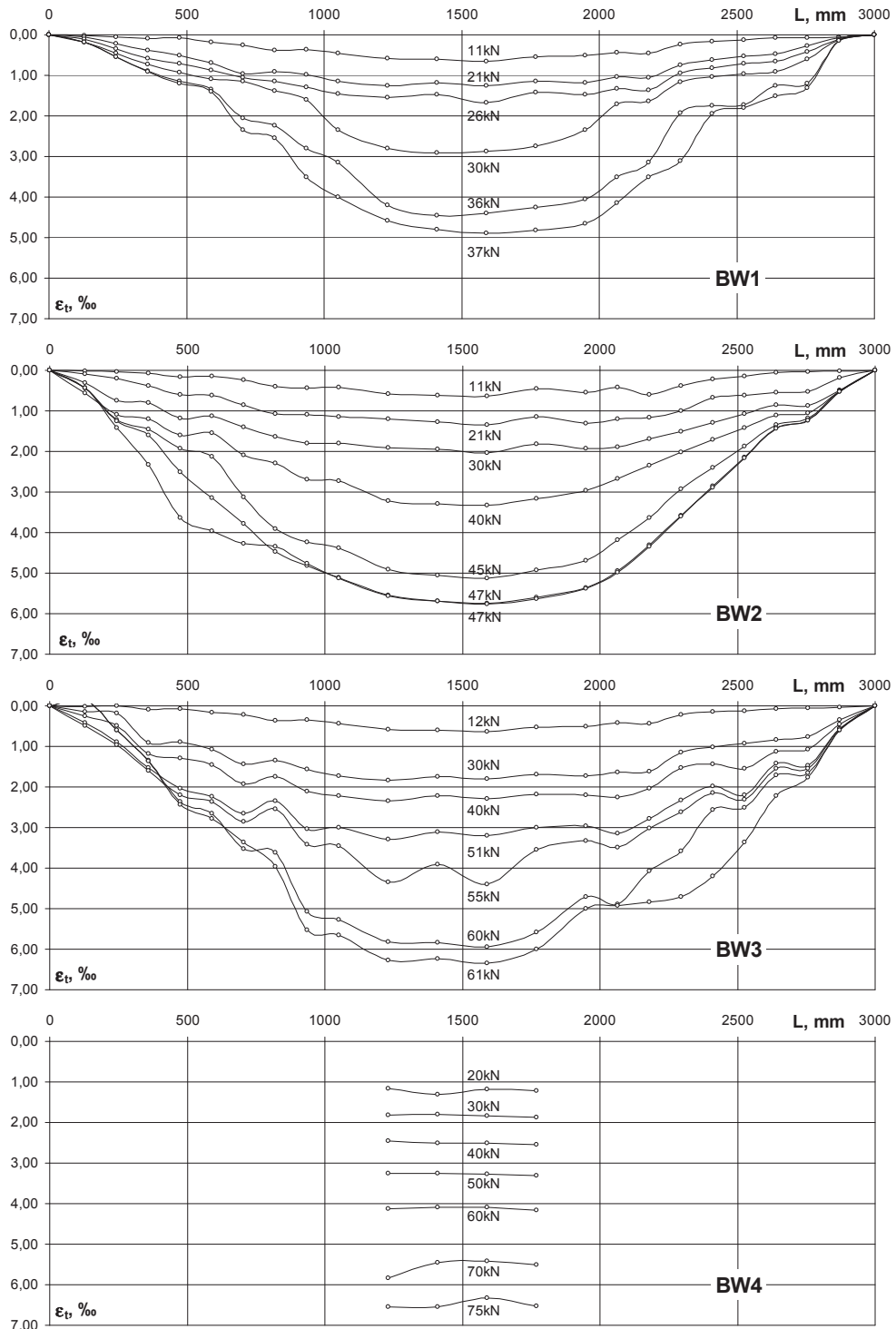
We wszystkich elementach przy obciążeniu od 20 ÷ 30kN pojawiły się rysy ukośne w strefie przypodporowej. Przy wzroście obciążenia następowało zarysowanie również w miejscu zakończenia taśmy CFRP – rys. 4. Te rysy nie prowadziły jednak do wyczerpania nośności wskutek odspojenia końców kompozytu w związku z rysą ukośną.



Rys. 4. Układ rys na odcinku działania M i V

Elementy zniszczyły się przy różnym poziomie obciążenia w wyniku odspojenia taśmy CFRP w rejonie przyłożenia obciążenia skupionego. W chwili zniszczenia w strefie ściskanej najmniejsze odkształcenia betonu zaobserwowano w elemencie BW1 ($\epsilon_{cu} = 1,23\%$), natomiast największe w elemencie BW4 ($\epsilon_{cu} = 3,77\%$). W tym ostatnim przypadku beton zaczął się kruszyć i odpajać w strefie ściskanej już przy obciążeniu około 67,5kN, a zniszczenie nastąpiło zarówno w wyniku wyczerpania nośności strefy ściskanej, jak i odspojenia taśmy.

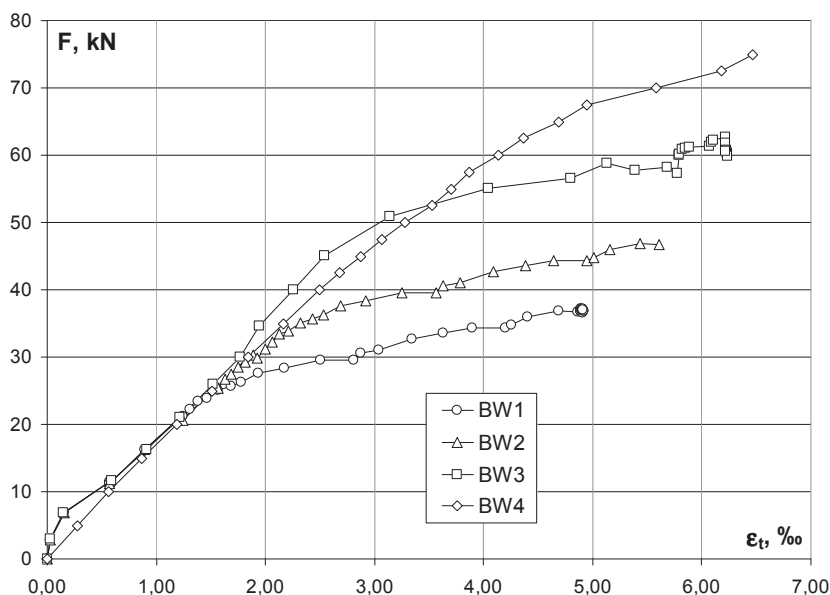
Rozkład odkształceń wzdłuż taśmy przy wybranych obciążeniach pokazano na rys. 5. Odkształcenie taśmy w chwili zniszczenia było różne i wynosiło minimalnie 4,8% w przypadku belki BW1 i 6,5% w przypadku belki BW4.



Rys. 5. Odkształcenia taśmy CFRP na długości elementu przy różnych poziomach obciążenia

Na graniczne odkształcenie taśmy przy zniszczeniu nie miała istotnego wpływu wytrzymałość betonu, gdyż w elemencie BW4 z największymi odkształceniami zastosowano beton o najniższych parametrach wytrzymałościowych, tj. $f_{c,cube} = 17\text{MPa}$.

Należy przypuszczać, iż w przypadku wykonania elementu z betonu o wyższej wytrzymałości odkształcenia taśmy w chwili odspojenia byłyby jeszcze większe. Porównanie średnich odkształceń w strefie czystego zginania w zależności od poziomu obciążenia dla wszystkich elementów pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Średnie odkształcenia taśmy CFRP na odcinku czystego zginania

W początkowej fazie obciążenia zależność obciążenie – odkształcenie taśmy jest zbliżona dla wszystkich elementów – jest to zależność liniowa. Zróżnicowanie zaczyna się w chwili osiągnięcia przez zbrojenie granicy plastyczności. Od tego poziomu obciążenia obserwujemy zdecydowanie większy przyrost odkształceń w taśmie. Jedynie w przypadku elementu BW4 nieliniowy charakter przyrostu odkształceń w taśmie związany jest z wyteżeniem strefy ściskanej i odkształceniami betonu. W tym przypadku bezpośrednią przyczyną zniszczenia elementu było zmiażdżenie betonu w strefie ściskanej.

Nie można jednoznacznie określić odkształceń taśmy, przy których nastąpi jej delaminacja. Zależać one będą od parametrów zastosowanej stali zbrojeniowej. Należy jednak oczekiwać, iż wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu przekroczone zostaną graniczne naprężenia przyczepności taśma – klej – beton i nastąpi odspojenie taśmy w belkach zbrojonych stalą sprężającą przed uplastycznieniem zbrojenia i ewentualnym zmiażdżeniem strefy ściskanej. Ze względu na zastosowanie w badaniach stali o wyraźnej, jak i umownej granicy plastyczności niemożliwe jest jednak jednoznaczne podanie zależności między poziomem odkształceń zbrojenia a siłą niszczącą, powodującą odspojenie taśmy od belki żelbetowej.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania pokazały, iż bezpośrednią przyczyną odspojenia taśmy może być powiązana z parametrami wytrzymałościowymi zbrojenia podstawowego belki. Uplastycznienie zbrojenia głównego inicjuje proces odspojenia. Odkształcenia taśmy przy zniszczeniu elementu są różne, zależą od granicy plastyczności zastosowanej stali zbrojeniowej i wahają się w przedziale 4,8 – 5,7‰ dla stali o $f_y = 360 - 520\text{MPa}$ i rosną do 6,5‰ dla stali o $f_{yk} = 1860\text{MPa}$.

Na graniczne odkształcenia taśmy mniejszy wpływ ma wytrzymałość betonu w przypadku niskiej jego wytrzymałości $f_{c,cube} \approx 20\text{MPa}$ niż parametry wytrzymałościowe stali.

Literatura

- 1 Hashemi S.H., Rahgozar R., Maghsoudi A.A. Flexural testing of high strength reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets. IJE Transactions B: Applications, Vol. 22, No. 2, August 2009.
- 2 Sayed-Ahmed E.Y., Bakay R., Shrive N.G. Bond strength of FRP laminates to Concrete: State of the art review. Electronic Journal of Structural Engineering, 9 (2009).
- 3 Wu Z., Niu H. Prediction of crack-induced debonding failure in R/C structures flexurally strengthened with externally bonded FRP composites. Doboku Gakkai Ronbunshuu E, Vol. 63, No.4, 2007.12, p. 620-639
- 4 Foster S.J., Khomwan N. Determination of bond stress versus slip for externally bonded FRP from standardized bond strength tests. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)
- 5 Karta techniczna Taśmy Sika CarboDur. Taśmy z włókien węglowych do wzmocnień konstrukcji

The influence of steel yielding of main reinforcement on bending capacity of beams strengthened with CFRP strips

Przemysław Bodzak¹

¹ *Department of Concrete Structures, Faculty Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology, e-mail: przemyslaw.bodzak@p.lodz.pl*

Abstract: This paper describe tests on RC beams strengthened with externally bounded CFRP plates. A total of four PCC beams with rectangular 15×30cm cross section and 300cm clear span were manufactured and tested in four-point flexure with 100cm constant moment region. Low compressive strength of concrete f_{ck} about 20MPa and middle reinforcement ratio – 0,0075 were used. Different yield strengths of steel, from 360MPa to 1860MPa, were chosen as experimental variables. All the beams were strengthened with one CFRP strip measuring 5×1,2cm. The specimen failed at various load and at various ultimate strains of CFRP strips. It was generally observed that both the moment capacity and the ultimate strains grew with the increase of steel yielding strength. It could be deducted that in many cases reaching the yielding steel strength activates the deboning of FRP strips.

Keywords: RC beam, strengthening, CFRP strips, steel yielding.