ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria BUDOWNICTWO z. 101 Nr kol. 1595

Łukasz SOWA*
Politechnika Łódzka

ODKSZTAŁCENIA GŁÓWNE I POSTACIOWE BELEK WZMACNIANYCH NA ŚCINANIE MATERIAŁAMI CFRP

Streszczenie. Praca prezentuje wyniki badań żelbetowych belek wzmacnianych na ścinanie materiałami kompozytowymi CFRP. Porównano odkształcenia główne i postaciowe elementów w zależności od sposobu ukształtowania i zakotwienia końców kompozytowych strzemion. Określono wartości odkształceń, przy których następowało ich odspojenie.

PRINCIPAL AND SHAPE DEFORMATIONS OF SHEAR STRENGTHENED RC BEAMS WITH CFRP COMPOSITES

Summary. The paper presents the tests of four single span RC beams strengthened for shear with CFRP strips and fabrics. Principal and shape deformations are compared in terms of different way of strengthening and anchorage of the composite stirrups. The strain values of debonded strips were determined.

1. Wprowadzenie

W ostatnim czasie w wielu ośrodkach naukowo-badawczych z całego świata prowadzone są badania zewnętrznych wzmocnień belek materiałami kompozytowymi CFRP. Analizie poddawane są zarówno sposoby kształtowania zewnętrznego zbrojenia na powierzchni belki, jak i sposoby kotwienia jego końców [1-4]. Na tej podstawie można określić efektywność wykorzystania materiału kompozytowego.

Zewnętrzne wzmocnienia na tzw. ścinanie mogą być kształtowane w postaci zewnętrznych strzemion naklejanych na boczne powierzchnie belki z jednostronnym lub dwustronnym kotwieniem końców lub jako ciągłe strzemiona oplatające belkę. Ukształtowanie dodatkowego zbrojenia kompozytowego decyduje o sposobie zniszczenia elementu. Jeżeli wzmocnienie wykonane zostanie jedynie poprzez naklejenie kompozytu na bocznej powierzchni belki, bez zakotwienia jego końców, to do zniszczenia dochodzi na skutek odspojenia materiału CFRP, przy bardzo małym, rzędu kilkunastu procent, stopniu

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Maria E. Kamińska.

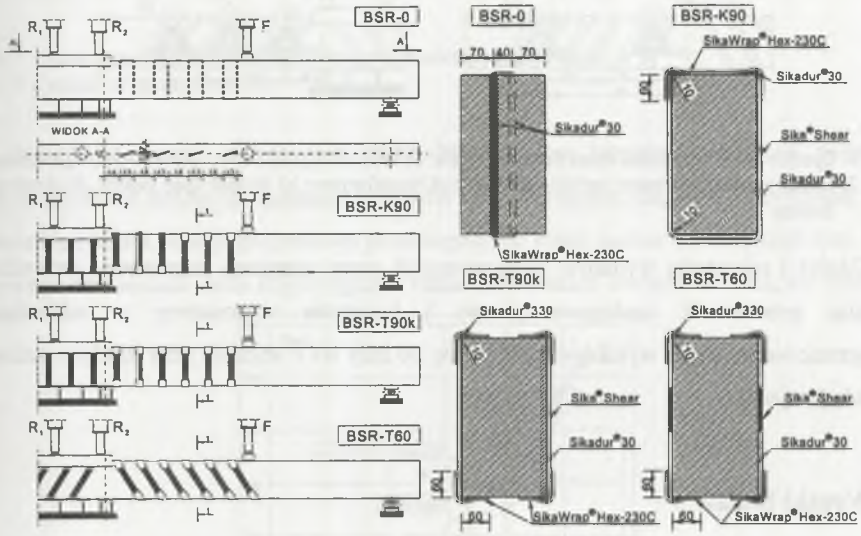
skutek odspojenia materiału CFRP, przy bardzo małym, rzędu kilkunastu procent, stopniu wykorzystania jego wytrzymałości. W przypadku zakotwienia końców strzemion, poprzez wykonanie odpowiednich zakładów kompozytu bądź wprowadzenie materiału w płytę przekroju teowego, stopień wykorzystania wytrzymałości znacznie wzrasta. W Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej przeprowadzono, w ramach projektu badawczego 8 T07E 006 21 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych, badania mające na celu określenie, przy jakich odkształceniach następuje odspojenie strzemion od powierzchni betonu i jaki jest mechanizm tego procesu. W badaniach tych zaobserwowano, że w przypadku braku odpowiedniego zakotwienia końców strzemion odspojenie kompozytu następuje w momencie osiągnięcia granicy plastyczności przez stal wewnętrznych strzemion. Odspojenie przebiega w sposób gwałtowny na skutek szybkiego przyrostu głównych odkształceń rozciągających.

Prezentowane poniżej badania są kontynuacją badań wymienionych wyżej. Badaniom poddano niezniszczone przęsła belek dwuprzęsłowych, modyfikując sposób kotwienia końców strzemion CFRP i wprowadzając nowy sposób kształtowania takich strzemion jako wewnętrznych. W niniejszym opracowaniu skoncentrowano się na przedstawieniu problemu odkształceń głównych i postaciowych elementu. Efektywności wzmocnień i stopniowi wykorzystania wytrzymałości kompozytu poświęcono odrębne opracowanie prezentowane w niniejszej publikacji.

2. Opis badań

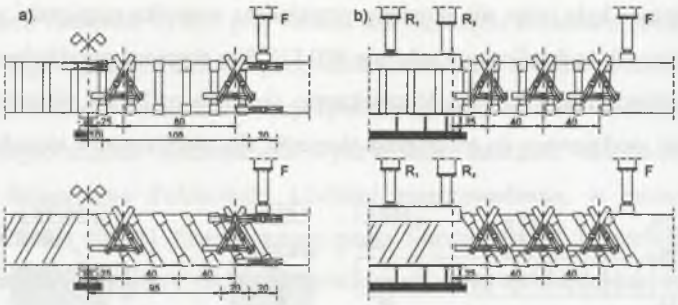
We wcześniejszych badaniach przeprowadzonych w Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, prezentowanych w [6], zbadano 5 dwuprzęsłowych belek żelbetowych. W elementach tych rysa niszcząca pojawiała się zawsze tylko w jednym przęśle, drugie przęsło pozostawało niezniszczone, ulegając jedynie silnemu zarysowaniu. Stwarzało to możliwość wykorzystania niezniszczonych przęseł tych elementów w kolejnym badaniu, którego wyniki prezentowane są poniżej. Wymiary i sposób zbrojenia belek oraz charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ stali i materiału kompozytowego przedstawione są w artykule pt.„Nośność belek żelbetowych wzmacnianych na ścinanie materiałami kompozytowymi CFRP", zamieszczonym w tym tomie. Miejsca naklejania i sposób kotwienia kompozytu pokazane są na rys. 1.

Belki obciążane były jedną siłą skupioną, przykładaną w środku rozpiętości przęsła, którą wywoływał siłownik hydrauliczny o zakresie 400 kN. Siłę skupioną przykładano dopiero po osiągnięciu utwierdzenia, a jej wartość zwiększano skokowo co 10 kN. W pobliżu wartości siły, przy której spodziewano się zniszczenia elementu, siłę zwiększano w sposób ciągły.



Rys. 1. Sposób wzmocnienia i przyjęte oznaczenia belek
Fig. 1. Modes of strengthening and beam symbols

Podczas obciążania, w obu badaniach, rejestrowano odkształcenia liniowe ε_a , ε_b , ε_c w trzech kierunkach zorientowanych względem siebie pod kątem 60°. W tym celu zastosowano przetworniki przemieszczeń liniowych rozmieszczone na bokach trójkąta równobocznego, tworząc w ten sposób rozety pomiarowe. W obu badaniach dwie skrajne rozety umieszczano w tych samych miejscach na długości belki, tak aby możliwe było porównanie odczytanych wielkości. Sposób rozmieszczenia rozet przedstawiono na rys. 2. Odkształcenia zewnętrznych strzemion CFRP mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych, naklejanych przy górnym i dolnym końcu oraz w połowie wysokości strzemienia. Dokonywano również pomiaru wielkości reakcji na podporze skrajnej, za pomocą siłomierza elektrooporowego oraz siły obciążającej belkę, za pomocą czujnika ciśnieniowego umieszczonego w układzie hydraulicznym siłowników.



Rys. 2. Sposób rozmieszczenia rozet pomiarowych: a) belki dwuprzęsłowe, b) belki jednoprzęsłowe
Fig. 2. Mode of place of linear variable differential transformers; a) double span beams, b) single span beams

Odczyt i rejestrację wyników, wskazywanych przez aparaturę pomiarową, prowadzono stosując przetwornik analogowo-cyfrowy i komputer wyposażony w odpowiednie oprogramowanie. Zapis wyników odbywał się 10 razy co 1 sekundę przy każdym poziomie siły obciążającej.

3. Wyniki badań

Znajomość odkształceń liniowych ε_a , ε_b , ε_c , odczytywanych z rozet pomiarowych, pozwala na wyznaczenie odkształceń głównych ε_1 i ε_2, ich kierunków oraz kąta odkształcenia postaciowego. Znane wzory niezbędne do wyznaczenia tych wielkości, zgodnie z oznaczeniami przedstawionymi na rys. 3, mają następującą postać:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_a \tag{1}$$

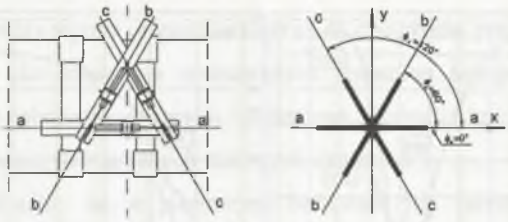
$$\varepsilon_y = \frac{1}{3}\left[-\varepsilon_a + 2(\varepsilon_b + \varepsilon_c)\right] \tag{2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2\sqrt{3}}{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_b) \tag{3}$$

$$tg2\varphi_n = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \tag{4}$$

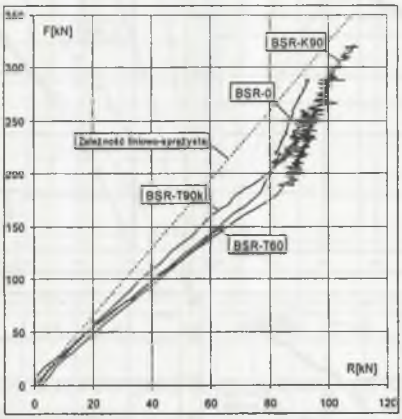
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{3}(\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c) \pm \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2} \tag{5}$$

Badania wykazały, że podczas obciążania belek dochodziło do redystrybucji sił wewnętrznych, spowodowanej zmianami sztywności. Ilustruje to rys. 4, na którym przedstawiono zmiany reakcji na podporze skrajnej belek serii BSR w funkcji obciążenia.



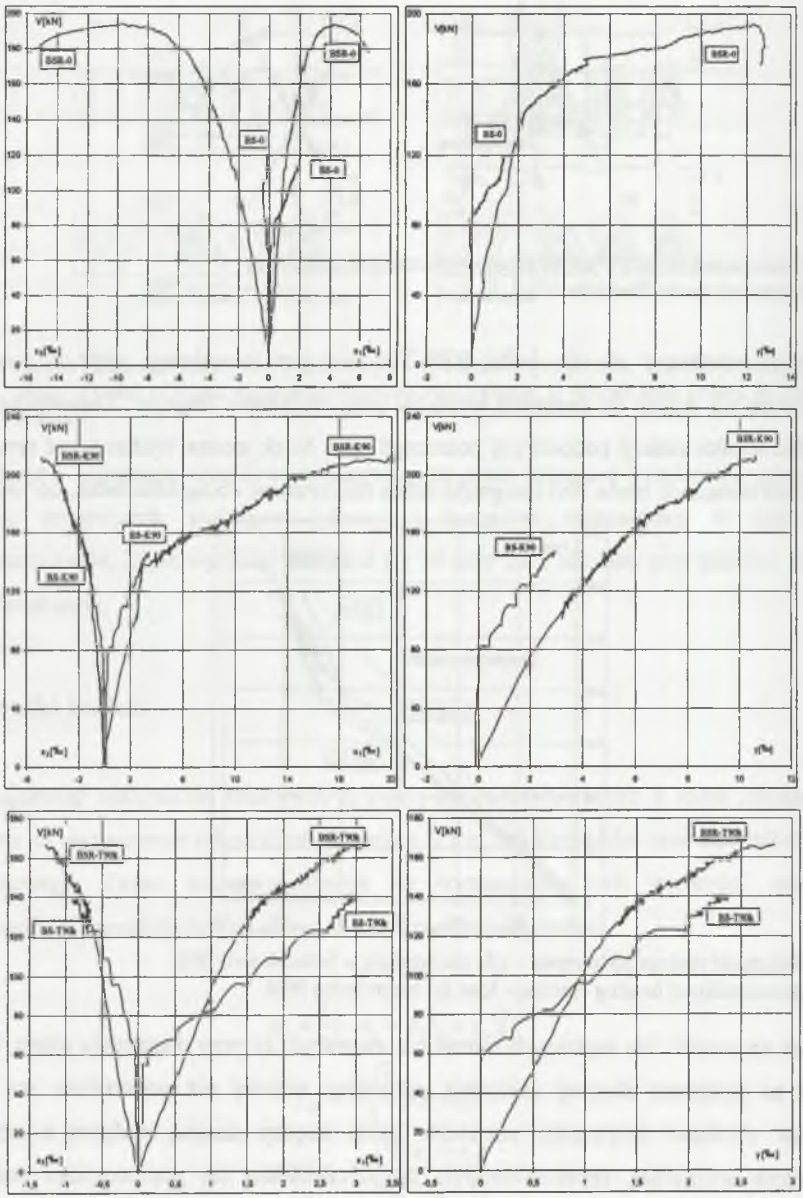
Rys. 3. Oznaczenie kierunków odkształceń wyznaczanych w badaniu
Fig. 3. Symbol of strain directions

Wykres odnoszący się do belki BSR-T60 nie jest kompletny, gdyż z powodów technicznych nie doszło do zapisania wyników przy obciążaniu ciągłym. Zauważalne, choć niewielkie różnice reakcji podporowej poszczególnych belek można wytłumaczyć tym, że w pierwszych badaniach (seria BS) osiągnięto różne maksymalne obciążenia belek, co wpływa-



Rys. 4. Zależność reakcja podporowa – siła obciążająca w belkach serii BSR
Fig. 4. Relationship of bearing reaction– load for beam series BSR

ło na ich sztywność. Na wykresach można też zauważyć, że przy obciążeniu około 180 kN reakcje na podporze skrajnej zaczynają przyrastać wolniej niż poprzednio, co można przypisać ubytkowi sztywności odcinków belek między skrajną podporą a miejscem przyłożenia obciążenia, spowodowanemu uplastycznieniem się poprzecznego stalowego zbrojenia, ułożonego na tych odcinkach. Wobec powyższego rozwój odkształceń głównych i postaciowych na odcinkach przy utwierdzonej podporze przedstawiono w funkcji siły poprzecznej, określając ją jako różnicę między siłą obciążającą a reakcją pomierzoną na podporze skrajnej. Na wykresach (rys. 5) podano też wyniki uzyskane w pierwszej serii badań belek dwuprzęsłowych (BS).



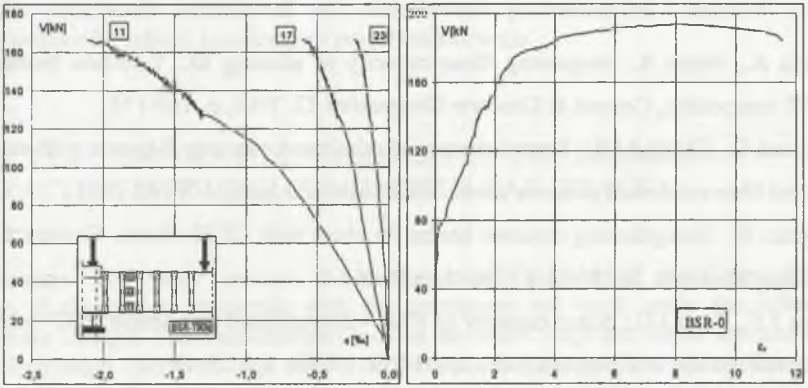
Rys. 5. Odkształcenia główne i postaciowe w funkcji siły poprzecznej
Fig. 5. Principal and shape deformation versus lateral force

Na wykresach odkształceń belek obciążanych po raz pierwszy można wyodrębnić obciążenie, przy którym dochodziło do zarysowania krzyżulców rozciąganych. Odpowiada to nośności betonu uwzględnionej w [5] jako V_c. W belkach obciążanych ponownie

odkształcenia przyrastały wprost proporcjonalnie aż do obciążenia, przy którym w pierwszym badaniu dochodziło do odspojenia zewnętrznych strzemion kompozytowych. Przy tym obciążeniu następuje załamanie wykresów odkształceń, zaczynają one przyrastać szybciej, co wynika z uplastycznienia wewnętrznych stalowych strzemion.

Trzeba też podkreślić, że w pierwszych badaniach nie zarejestrowano odkształceń trwałych, pozostających po odciążeniu belki, gdyż wtedy nie zakładano ponownego wykorzystania elementów. Dlatego też na rys. 5 odkształcenia belek BSR rozpoczynają się w początku układu współrzędnych.

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe wykresy odkształceń pomierzonych na powierzchni kompozytu oraz odkształceń ε_y w belce BSR-0 określonych na podstawie pomiarów z rozet.



Rys. 6. Odkształcenia zewnętrznego zbrojenia kompozytowego CFRP oraz odkształcenia ε_y belki BSR-0 w funkcji siły poprzecznej

Fig. 6. Strains of external CFRP-reinforcement and deformations ε_y versus lateral force

Z wykresów odkształceń (ε_1, ε_2, ε_y, γ) wynika, że lokalne kotwienie jest skuteczne w ograniczonym stopniu – odkształcenia kompozytowego zbrojenia przy odspojeniu były rzędu 3‰. Przy ciągłym kompozytowym zbrojeniu poprzecznym odkształcenia ε_y są bliskie granicznym, odpowiadającym nośności kompozytu – miarodajne są tu wyniki zarejestrowane w belce BSR – 0.

4. Wnioski

Badania wykazały, że punktowe kotwienie strzemion CFRP przyklejanych na bocznych powierzchniach belki jest skuteczne, choć w ograniczonym stopniu. Odkształcenia pionowe,

przy których następowało odspojenie strzemion CFRP, dzięki takiemu zakotwieniu wzrastały do około 3,4‰ w porównaniu do około 2,6‰ przy braku zakotwień [6].

Przy wykonaniu ciągłych strzemion kompozytowych może nastąpić nawet zerwanie kompozytu – ograniczeniem jest tu nośność na zginanie i nośność krzyżulców ściskanych. Skuteczne pod względem nośności i łatwe technologicznie okazało się kształtowanie kompozytowych strzemion jako wewnętrznych, z maty CFRP.

Badania doświadczalne będą kontynuowane, będą też podjęte próby analitycznego opisu odkształceń wzmocnionych belek w całym zakresie obciążenia.

LITERATURA

1. Kalifa A., Nanni A.: Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, Cement & Concrete Composites 22. 2000, p. 165-174.
2. Deniaud C., Cheng J.J.R.: Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets. ACI Structural Journal. V-VII 2001.
3. Täljsten B.: Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. Construction and Building Materials. 2003 Vol. 17, No. 1, p.15-26.
4. Chen J.F., Teng J.G.: Shear capacity of FRP – strengthened RC beams: FRP debonding. Construction and Building Materials. 2003 Vol. 17, No. 1, p.27-41.
5. FIB. Bulletin no 14, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical Report, task group 9.3 FRP, July 2001, p.130.
6. Kamińska M.E., Kotynia R., Sowa Ł., Waśniewski T.: Efektywność wzmacniania belek żelbetowych na ścinanie materiałami kompozytowymi CFRP. XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN wrzesień KN PZITB, Krynica 2003 (w druku).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński

Abstract

The paper presents the tests of four reinforced concrete beams strengthened for shear with CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastics) strips and fabrics. One beam was strengthened with the internal CFRP fabrics and the others with externally bonded composite stirrups. The anchorages of the external strips were different. The test results showed that the most effective way of strengthening were the internal stirrups and the beam wrapping.