

**Jan Kubicki\***

## **BADANIA DOŚWIADCZALNE ZARYSOWANYCH BELEK ŻELBETOWYCH Z NAKLEJONYMI TAŚMAMI KOMPOZYTOWYMI Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH**

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wstępnie zarysowanych belek żelbetowych, dozbrojonych zewnętrznie nalepieniem taśm kompozytowych z włókien węglowych. Omówiony został mechanizm zniszczenia oraz efektywność wzmocnienia badanych belek w odniesieniu do belek żelbetowych. Podano także przybliżony sposób oceny ugięcia belek z naklejonymi taśmami kompozytowymi.

### **1. Wprowadzenie**

Powierzchniowe dozbrajanie zginanych elementów żelbetowych poprzez naklejanie na ich dolnej powierzchni taśm kompozytowych z włókien węglowych CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer composite plates*) znajduje ostatnio coraz szersze zastosowanie w praktyce wzmocniania konstrukcji jako substytut ciężkich i ulegających korozji taśm stalowych.

W analizie znacznej liczby przeprowadzonych już badań doświadczalnych szczególną uwagę zwracano na mechanizm zniszczenia oraz efektywność wzmocnienia belek żelbetowych wyrażoną stosunkiem nośności na zginanie (lub nośności na ścinanie – zależnie od charakteru zniszczenia) belki wzmocnionej do odpowiedniej nośności kontrolnej belki żelbetowej (bez wzmocnienia). W znacznie zawężonym zakresie przedstawiano natomiast informacje dotyczące oceny ugięcia wzmocnionych belek, ograniczając się najczęściej do stwierdzenia, że naklejenie taśm kompozytowych na spodzie belek prowadzi do zmniejszenia ich ugięcia (zwiększenia sztywności) w porównaniu z ugięciem belek nie wzmocnionych.

Jest oczywiste, że wzmocniony element żelbetowy powinien spełniać wymagania stawiane elementom żelbetowym w zakresie stanów granicznych nośności i użytkowości. Opublikowane wyniki badań doświadczalnych belek żelbetowych z naklejonymi taśmami kompozytowymi wskazują, że przekroczenie granicznej wartości ich ugięcia na-

---

\* dr inż. – adiunkt w ITB

następowało przy obciążeniu znacznie niższym od obciążenia niszcącego, a także niższym od obciążenia, przy którym przekraczane były graniczne szerokości rys. Wynika stąd wnioski, że nieprzekroczenie granicznej wartości ugięcia stanowi kryterium determinujące zakres stosowania zginanych elementów żelbetowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi i powinno być decydujące przy ocenie efektywności ich wzmocnienia.

Badania doświadczalne belek żelbetowych z naklejonymi taśmami kompozytowymi z włókien węglowych przeprowadzone w Zakładzie Konstrukcji i Badań Wytrzymałościowych Instytutu Techniki Budowlanej pozwoliły na dokonanie wstępnej oceny mechanizmu ich zniszczenia, efektywności wzmocnienia z uwagi na nieprzekroczenie ugięcia granicznego oraz oszacowanie ugięcia w przedziale stosowanego obciążenia doraźnego.

## 2. Opis badań

Przedmiotem badań są belki żelbetowe o przekroju prostokątnym (120 × 220) mm, wykonane z betonu zwykłego (rys. 1).

Zbrojenie dolne belek stanowią dwa pręty  $\phi$  12 mm ze stali klasy A-III znak 34GS, a zbrojenie górne dwa pręty  $\phi$  10 mm wykonane z takiej samej stali. Zbrojenie poprzeczne tworzą strzemiąta dwugłęziowe  $\phi$  6 mm ze stali klasy A-O znak StOS, rozmieszczone na odcinkach przypodporowych w rozstawie 100 mm. Do prętów zbrojenia dolnego zostały dospawane w środkowej części belek dwa bolce  $\phi$  12 mm rozmieszczone w rozstawie 500 mm, stanowiące podstawy do przyklejenia reperów tensometru nasadowego.

Ogółem zbadano trzy serie belek żelbetowych wykonanych z tego samego zarobu masy betonowej. Każdą serię reprezentowały trzy wstępnie obciążone belki żelbetowe z naklejonymi (po odciążeniu) taśmami kompozytowymi z włókien węglowych Sika Carbo Dur S 914 o szerokości  $b_f = 90$  mm, grubości  $t_f = 1,4$  mm i polu przekroju poprzecznego  $A_f = 126$  mm<sup>2</sup>. Taśmy przyklejano wzdłuż całej rozpiętości belek na oczyszczoną (szlifowaniem) z warstwy mleczka cementowego, odkurzoną i odtłuszczoną dolną powierzchnię belek, stosując klej Sikadur 30. Końce taśm zostały doprowadzone na odległość 20 mm od lica podpór (rys. 1).

W badaniach, przeprowadzonych w czterosiłowej prasie hydraulicznej firmy Amsler, realizowano schemat statyczny belki wolnopodpartej o rozpiętości  $l_{eff} = 3,00$  m, obciążonej dwiema siłami skupionymi  $F$ , usytuowanymi od osi podpór w odległości  $a_v$ , wynoszącej:

$$a_v = \frac{1}{3} l_{eff} = 1000 \text{ mm} - \text{w przypadku belek serii 1 i 2 (schemat obciążenia A),}$$

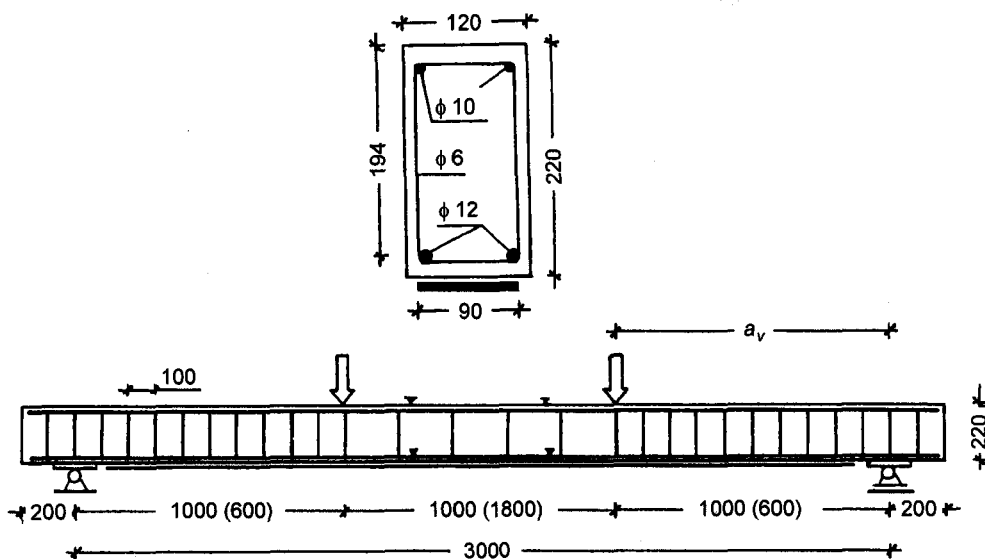
$$a_v = \frac{1}{5} l_{eff} = 600 \text{ mm} - \text{w przypadku belek serii 3 (schemat obciążenia B).}$$

W każdym z dwóch schematów obciążenia (A i B) zbadano również po dwie belki żelbetowe bez oklejenia taśmami (belki kontrolne) w celu określenia ich rzeczywistej nośności oraz kontroli ugięć i rys w przedziale obciążenia od siły  $F$  równej sile rysującej  $F_r$  do siły  $F$  równej sile niszczącej  $F_u$ .

Belki serii 1 obciążono wstępnie do wartości  $F = 0,55 F_u$ , belki serii 2 do wartości  $F = 0,80 F_u$ , a belki serii 3 do wartości  $F = 0,75 F_u$  siły niszczącej określonej na podstawie badań żelbetowych belek kontrolnych.

Belki z naklejonymi taśmami były obciążane stopniowo, etapami wynoszącymi około 1/18 – 1/12 siły niszczącej  $F_u$  belek kontrolnych. Przy każdym etapie obciążenia (lub odciążenia) dokonywano pomiaru ugięcia w środku rozpiętości belek (zredukowanego osiadaniem podpór), stosując czujniki zegarowe o dokładności odczytu 0,01 mm, pomiaru odkształceń skrajnego włókna strefy ściskanej oraz zbrojenia rozciągającego, stosując tensometr nasadowy typu Huggenbergera o dokładności odczytu 0,002‰. Prowadzono również obserwację zarysowania belek za pomocą lupy o 20-krotnym powiększeniu i o dokładności pomiaru 0,05 mm.

Badania wytrzymałościowe betonu zastosowanego do wykonania belek pozwoliły określić: średnią wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm} = 33,7$  MPa, średnią wytrzymałość na rozciąganie  $f_{ctm} = 3,6$  MPa, średni moduł sprężystości  $E_{cm} = 29,9$  GPa. Średnia wartość modułu sprężystości stali prętów zbrojenia dolnego wynosi  $E_s = 200$  GPa. Średnia wartość modułu sprężystości określona przy rozciąganiu taśmy kompozytowej z włókien węglowych wynosi  $E_f = 183$  GPa.



Rys. 1. Schemat obciążenia, wymiary oraz wewnętrzne i zewnętrzne zbrojenie badanych belek żelbetowych

Fig. 1. Loading configuration, dimensions, internal and external reinforcement of tested RC beams

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Mechanizm zniszczenia belek

Belki żelbetowe stanowiące przedmiot niniejszych badań zostały zaprojektowane przy założeniu, że ich zniszczenie (bez naklejenia taśm kompozytowych z włókien węglowych) ma następować w wyniku osiągnięcia granicy plastyczności stali prętów zbrojenia

rozciąganego w strefie czystego zginania, czyli na odcinku środkowym belki ograniczonym usytuowaniem sił skupionych.

W celu spełnienia takiego założenia przyjęto:

- średni stopień zbrojenia przekroju belki

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} = \frac{2 \cdot 113}{120 \cdot 194} = 0,97\%$$

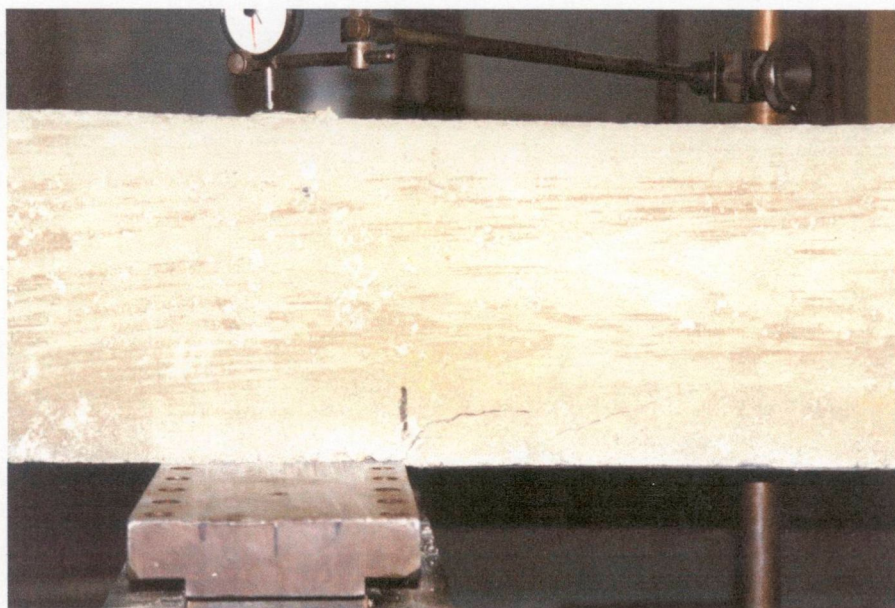
- silne zbrojenie strefy przypodporowej strzemionami pionowymi na odcinku  $a_v$  występowania siły poprzecznej  $V = F$  (rys. 1).

Wyniki badań kontrolnych belek żelbetowych potwierdziły słuszność przyjętych założeń projektowych – belki żelbetowe przy realizacji obu schematów obciążenia (A i B) ulegały zniszczeniu w strefie czystego zginania. Szerokość rys prostopadłych przy obciążeniu bliskim obciążeniu niszczącemu wynosiła  $w_m = 0,9 \div 1,2$  mm.

Początek procesu niszczenia wszystkich belek z naklejonymi na dolnej powierzchni taśmami kompozytowymi sygnalizowało wystąpienie ukośno-podłużnej rysy w pobliżu lub w miejscu końca taśmy przy jednej z podpór (rys. 2).

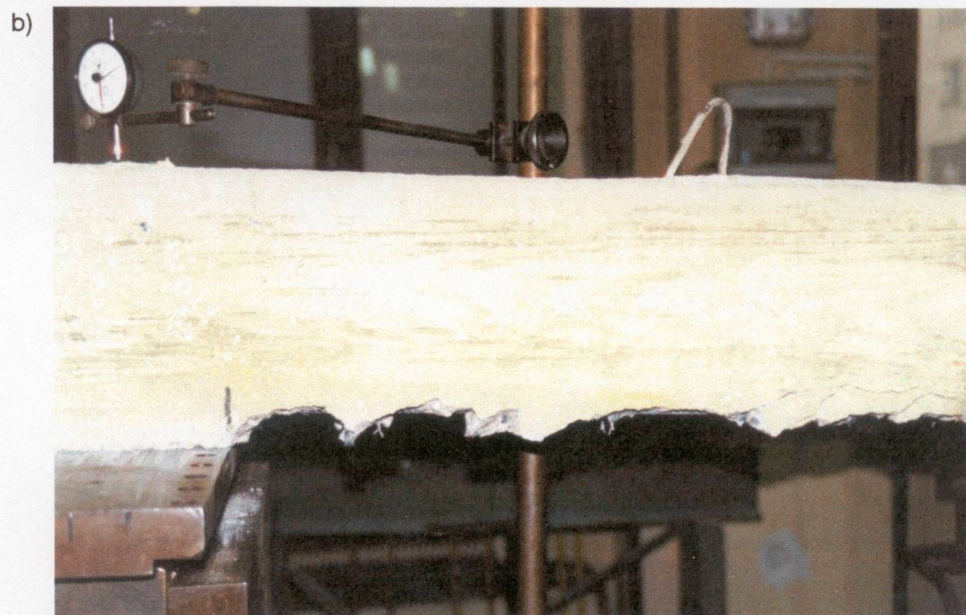
Zniszczenie belek zawsze następowało gwałtownie. W badaniach obserwowano dwa rodzaje zniszczenia, zależne od realizowanych schematów obciążenia belek.

W przypadku belek serii 1 i 2, badanych przy usytuowaniu sił skupionych w odległości  $a_v = 1000$  mm od osi podpór (schemat A), zniszczenie następowało w wyniku odspojenia końcowego odcinka taśmy od spodu belki oraz częściowego odspojenia betonu otuliny podłużnego zbrojenia rozciąganego na odcinku równym około  $2/3 l_{eff}$  (rys. 3).

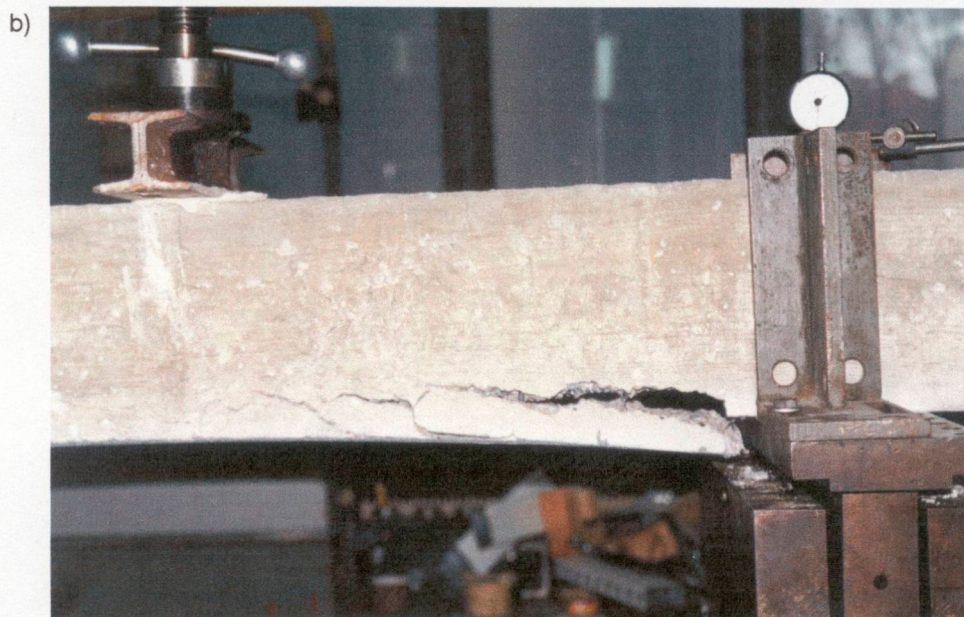


Rys. 2. Usytuowanie rysy początkującej proces niszczenia belki z naklejoną taśmą  
Fig. 2. Location of failure initiation crack at the plated beam





Rys. 3. Charakter zniszczenia belki nr 3 (seria 1): odspojenie końcowego odcinka taśmy od spodu belki oraz częściowe odspojenie betonu otuliny zbrojenia; a – widok ogólny, b – zbliżenie  
Fig. 3. Failure mode of beam No 3 (series 1): plate-end interfacial debonding with partial concrete cover separation; a – overall view, b – close-up view



Rys. 4. Charakter zniszczenia belki nr 7 (seria 3): odspojenie betonu otuliny zbrojenia;

a – widok ogólny, b – zbliżenie

Fig. 4. Failure mode of beam No 7 (series 3): concrete cover separation; a – overall view, b – close-up view



Belki serii 3, badane według schematu B, w którym odległość sił skupionych od osi podpór wynosiła  $a_v = 600$  mm – ulegały zniszczeniu na skutek odspojenia betonu otuliny zbrojenia na odcinku o długości nie przekraczającej  $a_v$  (rys. 4).

W tablicy 1 zestawiono wartości doświadczalne  $F_{u\text{exp}}$  sił niszczących uzyskane z badań żelbetowych belek kontrolnych oraz belek z naklejonymi taśmami kompozytowymi z włókien węglowych.

Tablica 1. Wartości doświadczalne  $F_{u\text{exp}}$   
Table 1. Experimental values  $F_{u\text{exp}}$  of failure forces

Seria belek	Symbol belki	Siła niszcząca $F_{u\text{exp}}$ kN
Belki kontrolne (schemat A)	01	18,6
	02	17,4
Seria 1	1	42,0
	2	42,4
	3	40,8
Seria 2	4	42,2
	5	42,0
	6	42,8
Belki kontrolne (schemat B)	03	31,5
	04	30,7
Seria 3	7	45,0
	8	45,0
	9	47,7

### 3.2. Ugięcie belek

Na rysunku 5 przedstawiono wykresy średnich wartości  $y_{\text{exp}}$  ugięć doświadczalnych w funkcji momentu zginającego  $M$  uzyskane z badań sześciu belek serii 1 i 2 z naklejonymi taśmami kompozytowymi z włókien węglowych (wykres górny) oraz dwóch kontrolnych belek żelbetowych (wykres dolny). Z wykresów tych wynika, że ugięcie belek z naklejonymi taśmami jest (przy tych samych wartościach momentu zginającego) mniejsze od ugięcia belek kontrolnych. Stosunek ugięcia badanych belek waha się w przedziale od 0,83 do 0,44, przy czym jego wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia.

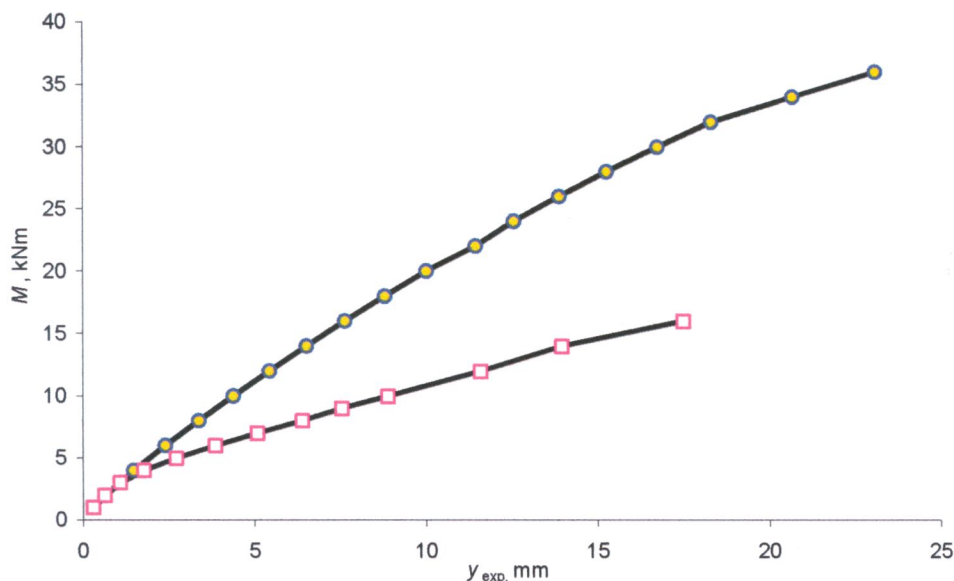
Realizowany w badaniach zróżnicowany stopień zaawansowania pierwotnego obciążenia belek (przed naklejeniem taśm) nie ma istotnego wpływu na ich ugięcie. Ugięcia belek przy obu stopniach zaawansowania obciążenia (0,55 i 0,80) były prawie jednakowe.

Pomiary odkształceń  $\epsilon_c$  skrajnego ściskanego włókna betonu oraz odkształceń  $\epsilon_s$  zbrojenia rozciąganego umożliwiły wyznaczenie względnej wysokości  $\xi = \frac{x}{d}$  ściskanej strefy betonu belek z naklejonymi taśmami kompozytowymi według następującej zależności, wynikającej z założenia płaskości przekrojów po ich odkształceniu (por. rys. 8).

$$\xi = \left( 1 + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_c} \right)^{-1} \quad (1)$$

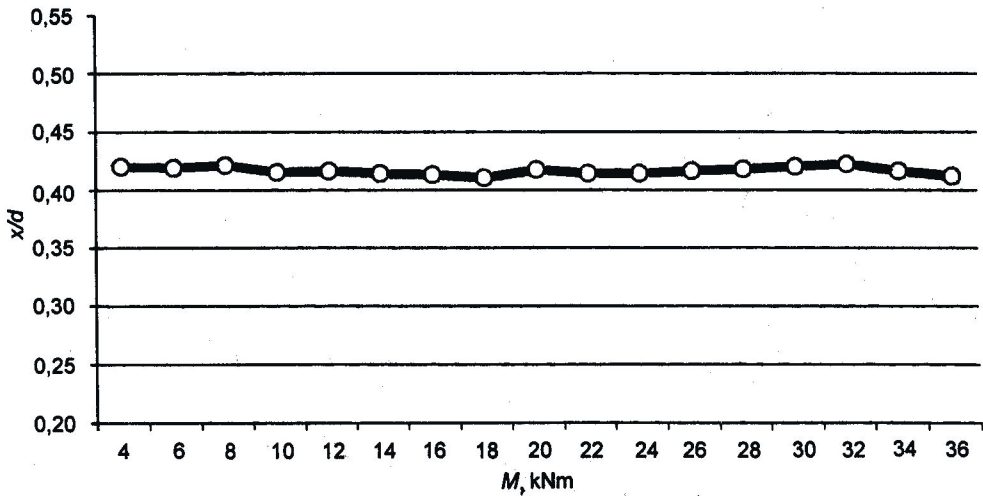
Pomiary odkształceń były dokonywane na odcinku o długości 500 mm, na którym przy pierwotnym obciążeniu belek występowały rysy prostopadłe do osi podłużnej belki. Można więc przyjąć, że zmierzone odkształcenia są odkształceniami średnimi, uwzględniającymi współpracę betonu rozciąganego na odcinkach niezarysowanych (efekt *tension stiffening*). Zatem wyznaczona ze wzoru (1) wartość  $\xi$  jest również wartością średnią, przedstawioną na rysunku 6 w funkcji  $M$  momentu zginającego.

Na podstawie rysunku 6 można stwierdzić, że wysokość strefy ściskanej belek żelbetowych wstępnie zarysowanych, a następnie dozbrojonych zewnątrz taśmami kompozytowymi z włókien węglowych – jest prawie stała przy różnym stopniu zaawansowania obciążenia. Wyznaczona średnia wartość  $\xi$  w przypadku badanych belek była równa 0,416.



Rys. 5. Ugięcie doświadczalne belek żelbetowych z naklejonymi taśmami (wykres górny) oraz belek kontrolnych (wykres dolny) w funkcji momentu zginającego  
 Fig. 5. Moment-deflection experimental curves of plated (upper) and unplated (lower) RC beams





Rys. 6. Względna wysokość  $\xi = \frac{x}{d}$  strefy ściskanej belek żelbetowych z naklejonymi taśmami w zależności od momentu zginającego

Fig. 6. Experimental value of neutral axis  $\xi = \frac{x}{d}$  of plated beams in dependence on bending moment

## 4. Omówienie wyników badań

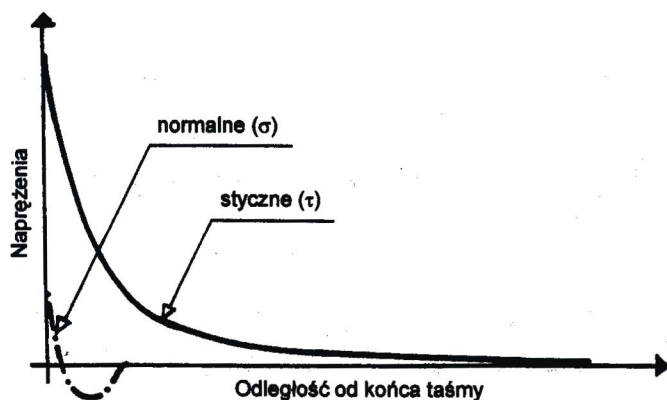
### 4.1. Mechanizm zniszczenia belek

Rysy ukośnie-podłużne, początkujące proces niszczenia badanych belek żelbetowych z naklejonymi taśmami kompozytowymi, powstawały przy końcu taśmy (rys. 2), to jest w miejscu, w którym zgodnie z badaniami [1], [2], [3] następuje koncentracja maksymalnych naprężeń normalnych  $\sigma$  i naprężeń stycznych  $\tau$ , działających w warstwie kleju na styku taśmy z dolną powierzchnią belki. Idealizowany rozkład tych naprężeń na długości naklejonej taśmy kompozytowej przedstawiono na rysunku 7.

Dodatnie naprężenia normalne, skoncentrowane na końcu taśmy, wywołują rozciąganie warstwy kleju prowadzące do odspojenia końcowego odcinka taśmy od powierzchni belki.

Naprężenia styczne, występujące na odcinku dłuższym niż naprężenia normalne, wywołują ścinanie warstwy kleju i odspojenie otuliny betonowej prętów zbrojenia rozciąganego. Naprężenia styczne na końcu taśmy są prawie 4-krotnie większe od wartości naprężeń normalnych i to one głównie kształtują mechanizm zniszczenia belek obserwowany w przeprowadzonych badaniach.

Określenie nośności belek żelbetowych dozbrojonych zewnątrz taśmami kompozytowymi, których proces niszczenia rozpoczynał się przy końcu taśmy (*end shear failure*), było przedmiotem wielu analiz teoretycznych i badań doświadczalnych.



Rys. 7. Rozkład naprężeń normalnych ( $\sigma$ ) i naprężeń stycznych ( $\tau$ ) w płaszczyźnie styku taśmy i belki  
 Fig. 7. Interfacial normal ( $\sigma$ ) and shear ( $\tau$ ) stress distributions

W biuletynie [4] zaproponowano, aby nośność obliczeniową na ścinanie  $V_{Rd}$  określać według wzoru opracowanego przez Jansze [5] na podstawie badań belek żelbetowych z naklejonymi taśmami stalowymi

$$V_{Rd} = \tau_{Rd} b d \quad (2)$$

w którym

$$\tau_{Rd} = 0,15 \sqrt[3]{3 \frac{d'}{a_L} \left(1 + \sqrt{\frac{200'}{d}}\right)^3 \sqrt[3]{100 \rho_1 f_{ck}}} \quad (3)$$

gdzie:  $b$  i  $d$  – odpowiednio: szerokość i wysokość użyteczna przekroju żelbetowego, mm,  
 $\rho_1$  – stopień zbrojenia rozciąganego,  
 $f_{ck}$  – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie,  
 $a_L$  – długość fikcyjnego odcinka ścinania, mm, określona wzorem

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_1})^2}{\rho_1}} d L^3 \quad (4)$$

Wzór (2) obowiązuje przy jednoczesnym spełnieniu następujących dwóch warunków:

$$a_v > L + d \quad (5)$$

to jest długość  $a_v$  odcinka ścinania (równa odległości usytuowania siły skupionej od osi podpory) powinna być większa od sumy odległości  $L$  końca taśmy od osi podpory i wysokości użytecznej  $d$  przekroju żelbetowego, przy czym

$$a_L < a_v \quad (6)$$

to jest długość  $a_L$  fikcyjnego odcinka ścinania jest mniejsza od długości  $a_v$ .

Smith i Teng [3] przedstawili wzór określający siłę  $V_{db,end}$ , przy której następuje odspojenie końcowego odcinka taśmy lub odspojenie otuliny zbrojenia

$$V_{db,end} = \eta V_c \quad (7)$$

gdzie:  $\eta$  – współczynnik, którego wartości są przyjmowane zależnie od spodziewanego charakteru zniszczenia

$\eta = 1,4$  – przy odspojeniu końcowego odcinka taśmy i częściowym odspojeniu betonu otuliny zbrojenia (rys. 3),

$\eta = 1,5$  – przy odspojeniu betonu otuliny zbrojenia (rys. 4),

$V_c$  – nośność na ścinanie przekroju żelbetowego, określona wzorem

$$V_c = \left[ 1,4 - \left( \frac{d}{2000} \right) \right] b d \left( \rho_1 f'_c \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

w którym  $f'_c$  – wytrzymałość cylindryczna betonu na ściskanie.

Wzór (8) można stosować do oszacowania wartości  $V_{db,end}$ , jeśli jest spełniony warunek  $\left[ 1,4 - \left( \frac{d}{2000} \right) \right] \geq 1,1$ . Wymiary  $b$  i  $d$  przekroju żelbetowego belki przyjmuje się w mm.

W niemieckiej aprobacie technicznej [6] przedstawiono następujący wzór określający siłę  $V_{k,max}$  przy której następuje odspojenie końcowego odcinka taśmy i otuliny betonowej:

$$V_{k,max} = 0,5 b_f k_b k_T \left( E_f t_f f_{ctm} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

w którym:

$b_f, t_f, E_f$  – odpowiednio: szerokość, grubość i moduł sprężystości taśmy kompozytowej,

$f_{ctm}$  – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie,

$k_T$  – współczynnik zależny od temperatury powietrza; w przypadku elementów przebywających wewnątrz pomieszczeń przyjmuje się  $k_T = 1,0$ ,

$k_b$  – współczynnik zależny od szerokości taśmy  $b_f$  i szerokości belki  $b$  (wyrażonych w mm), którego wartość oblicza się ze wzoru

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad (10)$$

Nośności obliczone z powyższych wzorów przy podstawieniu rzeczywistych wartości parametrów geometrycznych i fizycznych badanych belek wynoszą:

- ze wzoru (2)

$$V_{Rd} = 36,4 \text{ kN}$$

- ze wzoru (7)

$$V_{db, end} = 27,2 \text{ kN} \quad \text{przy } \eta = 1,4$$

$$V_{db, end} = 29,2 \text{ kN} \quad \text{przy } \eta = 1,5$$

- ze wzoru (9)

$$V_{k \max} = 46,2 \text{ kN}$$

Wartości nośności obliczone ze wzorów (2) i (7) są niższe od wartości  $F_{u \exp}$  doświadczalnych sił niszczących zestawionych w tabelicy 1. Wartość siły  $V_{k \max}$  obliczona ze wzoru (9) jest bliska średniej wartości siły  $F_{u \exp} = 45,9 \text{ kN}$  otrzymanej z badań belek serii 3.

Dołąrą zgodność teoretycznych i doświadczalnych wartości sił niszczących badanych belek żelbetowych z naklejonymi taśmami kompozytowymi z włókien węglowych uzyskano obliczając ich nośność z następującego wzoru:

$$V_R = 0,5 \beta b d f_{ctm} \quad (11)$$

w którym  $\beta$  – współczynnik uwzględniający mechanizm zniszczenia belek.

Przy zniszczeniu następującym w wyniku odspojenia końcowego odcinka taśmy od spodu belki oraz częściowego odspojenia betonu otuliny prętów (rys. 3) wartość współczynnika  $\beta = 1$ .

Przy zniszczeniu belek zachodzącym tylko na skutek odspojenia betonu otuliny prętów (rys. 4) – wartość współczynnika  $\beta$  określa się jako

$$\beta = \left( 1 + \frac{b_f}{b} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (12)$$

przy czym  $b$  i  $b_f$  – jak we wzorze (10).

Wartości sił niszczących obliczone ze wzoru (11) wynoszą:

- w przypadku belek serii 1 i 2

$$V_R = 41,9 \text{ kN} \quad \text{przy średniej wartości } F_{u \exp} = 42,0 \text{ kN},$$

- w przypadku belek serii 3

$$V_R = 46,1 \text{ kN} \quad \text{przy średniej wartości } F_{u \exp} = 45,9 \text{ kN}.$$

Przeprowadzone badania doświadczalne pozwalają stwierdzić, że obserwowany mechanizm zniszczenia belek zależy od tzw. wskaźnika ścinania  $\alpha_v$ , wyrażającego stosunek maksymalnej wartości momentu zginającego  $M$  do iloczynu maksymalnej siły poprzecznej  $V$  i wysokości  $h$  przekroju żelbetowego, czyli:

$$\alpha_v = \frac{M}{Vh} \quad (13)$$

Przy stosowanym w badaniach schemacie obciążenia belek dwiema siłami skupionymi  $F$  wskaźnik ścinania można wyrazić następująco (rys. 1):

$$\alpha_v = \frac{Fa_v}{Fh} = \frac{a_v}{h} \quad (14)$$

to jest w postaci stosunku długości odcinka ścinania  $a_v$  do wysokości przekroju  $h$ .



W przypadku badanych belek wartość wskaźnika ścinania wynosiła:

$$\alpha_v = \frac{1000}{220} = 4,55 - \text{belki serii 1 i 2 (schemat obciążenia A),}$$

$$\alpha_v = \frac{600}{220} = 2,72 - \text{belki serii 3 (schemat obciążenia B).}$$

Uzyskane wyniki badań potwierdziły wnioski sformułowane w pracy [7], dotyczące prognozowania mechanizmu zniszczenia belek wzmocnionych taśmami, a mianowicie:

- przy wartości  $\frac{a_v}{h} \leq 4$  następuje odspojenie betonu otuliny prętów zbrojenia rozciąganego,
- przy wartości  $\frac{a_v}{h} > 4$  następuje odspojenie końcowego odcinka taśmy od spodu belki oraz częściowe odspojenie betonu otuliny prętów zbrojenia rozciąganego.

W badaniach doświadczalnych belek żelbetowych wzmocnionych taśmami CFRP [8] obserwowano mechanizmy zniszczenia odpowiadające powyższym stwierdzeniom. Belki o symbolach B-04/S, B-04/M oraz B-06/S obciążane dwiema siłami skupionymi przy stosunku  $a_v/h = 800/300 = 2,67 < 4$  ulegały zniszczeniu poprzez odspojenie otuliny prętów zbrojenia rozciąganego w pobliżu podpory. Natomiast belki o symbolach BF-04/0.5S oraz BF-06/S obciążane siłą skupioną w środku rozpiętości przy stosunku  $a_v/h = 1500/300 = 5 > 4$  niszczyły się na skutek odspojenia końcowego odcinka taśmy przy podporze wraz z częściowym odspojeniem betonowej otuliny prętów zbrojenia.

Doświadczalne siły niszczące  $F_{u\text{exp}}$  uzyskane z badań belek o symbolach B-04/S i B-04/M były jednakowe, a wartości  $F_{u\text{exp}} = 60$  kN. Siła niszcząca  $V_R$  obliczona dla tych belek ze wzoru (11) przyjmuje wartość  $V_R = 63,7$  kN, a więc jest tylko o 6% większa od wartości siły doświadczalnej.

Belki z naklejonymi na spodzie taśmami kompozytowymi z włókien węglowych powinny spełniać wymagania stawiane zginanym elementom żelbetowym w normie PN-B-03264:2002 w zakresie stanów granicznych nośności i użyteczności. Na podstawie wykresu funkcji moment-ugięcie przedstawionego na rysunku 5 można stwierdzić, że przekroczenie granicznej wartości ugięcia belek następowało przy obciążeniu znacznie niższym od obciążenia niszczącego i niższym od obciążenia, przy którym przekraczane były graniczne szerokości rys. Zatem podstawą do oszacowania efektywności wzmocnienia belek żelbetowych poprzez naklejenie taśm kompozytowych nie powinien być stosunek momentów niszczących belek wzmocnionych do kontrolnych belek żelbetowych, lecz stosunek momentów, przy których ich ugięcia osiągają wartości graniczne.

W badaniach belek pod obciążeniem doraźnym, jako wartość graniczną ugięcia można przyjąć  $y_{\text{lim}} = I_{\text{eff}}/300 = 10$  mm przy założeniu, że w wyniku długotrwałego działania obciążenia nastąpi przyrost ugięcia o 50%, czyli  $y_{\text{lim}}$  będzie odpowiadało  $I_{\text{eff}}/200$ . Przy takim założeniu oszacowano efektywność wzmocnienia badanych belek jako:

- 1,32 – w przypadku belek serii 1 i 2,
  - 1,34 – w przypadku belek serii 3
- w stosunku do kontrolnych belek żelbetowych.

## 4.2. Ocena ugięcia belek

Ugięcie  $y$  wstępnie zarysowanych, a następnie dozbrojonych zewnątrznie taśmami kompozytowymi belek żelbetowych można określić z ogólnego wzoru

$$y = \alpha_k k_{II} I_{eff}^2 \quad (15)$$

w którym:  $\alpha_k$  – współczynnik zależny od układu obciążenia i warunków podparcia belki,  
 $k_{II}$  – krzywizna przekroju zarysowanego w belce o rozpiętości  $l_{eff}$ .

Krzywiznę  $k_{II}$  można wyznaczyć na podstawie zależności geometrycznych zachodzących między krzywizną i odkształceniem  $\epsilon_s$  stali zbrojeniowej w zarysowanym przekroju żelbetowym (rys. 8)

$$k_{II} = \frac{\epsilon_s}{d - x_{II}} = \frac{\sigma_s}{E_s (d - x_{II})} = \frac{M}{E_s A_{s1} z (d - x_{II})} \quad (16)$$

gdzie:  $E_s$  – moduł sprężystości stali zbrojeniowej,  
 $A_{s1}$  – pole powierzchni zbrojenia rozciąganego,  
 $x_{II} z$  – odpowiednio: wysokość strefy ściskanej i ramię sił wewnętrznych w zarysowanym, dozbrojonym zewnątrznie przekroju żelbetowym, określone przy liniowym rozkładzie naprężeń w betonie strefy ściskanej.

Wysokość  $x_{II}$  ściskanej strefy zarysowanego przekroju żelbetowego, wzmocnionego taśmą kompozytową (rys. 8) można wyznaczyć z warunku równowagi momentów statycznych ściskanej i rozciąganej części przekroju względem osi obojętnej. Otrzymuje się wówczas równanie kwadratowe

$$x_{II}^2 + 2r x_{II} - s = 0 \quad (17)$$

którego pierwiastkiem rzeczywistym jest

$$x_{II} = r \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{s}{r^2}} \right) \quad (18)$$

przy wartościach parametrów  $r$  i  $s$  wyrażonych wzorami

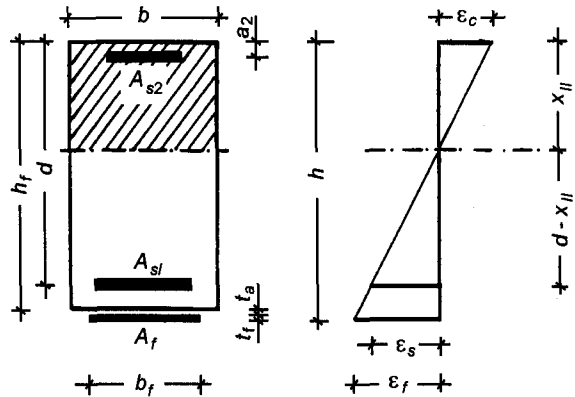
$$r = \frac{1}{b} \left[ \alpha_e (A_{s1} + A_{s2}) + \alpha_f A_f \right] \quad (19)$$

$$s = \frac{2}{b} \left[ \alpha_e (A_{s1} d + A_{s2} a_2) + \alpha_f A_f h_f \right] \quad (20)$$

w których  $\alpha_e$  i  $\alpha_f$  – odpowiednio: stosunki modułów sprężystości stali  $E_s$  i kompozytowej taśmy z włókien węglowych  $E_f$  do modułu sprężystości betonu  $E_{cm}$ , a pozostałe oznaczenia parametrów geometrycznych przyjęto zgodnie z rysunkiem 8.

Odształcenie  $\epsilon_s$  we wzorze (16) oraz wysokość  $x_{II}$  strefy ściskanej określona wzorem (18) dotyczą zarysowanego przekroju żelbetowego wzmocnionego taśmą kompozytową. W przypadku obliczania ugięć wzmocnionych belek żelbetowych należy we wzorze (15) przyjmować średnią krzywiznę  $k_m$ , uwzględniającą efekt *tension stiffening*, czyli wyznaczoną przy średnich wartościach  $\epsilon_{sm}$  i  $x_m$ .

Rys. 8. Oznaczenia wymiarów i odkształceń zarysowanego przekroju belki żelbetowej z naklejoną taśmą kompozytową z włókien węglowych  
 Fig. 8. Notation for dimensions and strains over depth of cracked cross-section of CFRP-plated RC beam



W wyniku przeprowadzonej analizy [9] odkształceń uzyskanych z badań doświadczalnych wzmocnionych belek żelbetowych wykazano, że stosunek  $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_s$  można wyrazić współczynnikiem empirycznym  $\zeta_s$  o wartości określonej wzorem

$$\zeta_s = \frac{\varepsilon_{sm}}{\varepsilon_s} = 1 - 0,875 \frac{A_f E_s}{E_f A_{s1}} \quad (21)$$

w którym:  $A_f$  i  $E_f$  – odpowiednio: pole przekroju i moduł sprężystości kompozytowej taśmy z włókien węglowych,  
 $A_{s1}$  i  $E_s$  – odpowiednio: pole przekroju i moduł sprężystości stali zbrojenia rozciąganego.

Uzyskana z badań wartość empiryczna stosunku  $\frac{x_m}{x_{II}}$  wynosi 1,20.

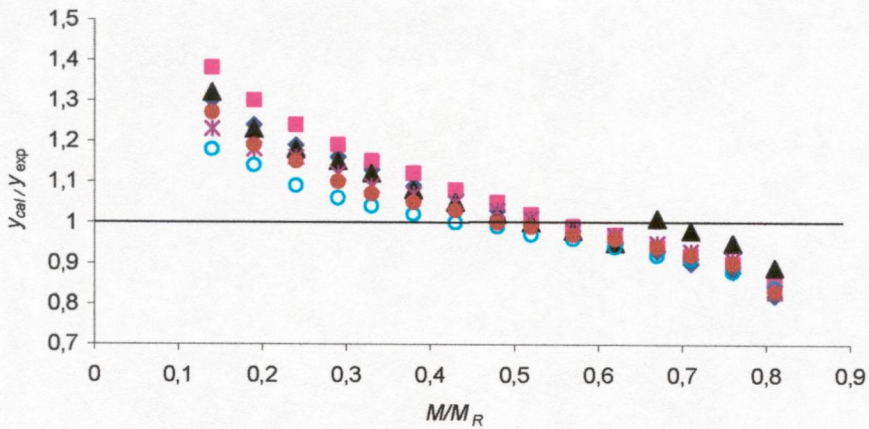
Średnią krzywiznę  $k_m$  zarysowanej belki żelbetowej wzmocnionej kompozytową taśmą z włókien węglowych można wyrazić wzorem

$$k_m = \frac{\zeta_s M}{E_s \rho_1 b d^3 \left(1 - \frac{\xi_m}{3}\right) (1 - \xi_m)} \quad (22)$$

w którym:  $\rho_1$  – stopień zbrojenia rozciąganego belki żelbetowej,

$$\xi_m = \frac{x_m}{d} = 1,20 \xi_{II}.$$

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie ugięć  $y_{cal}$  obliczonych ze wzorów (22) i (15) z ugięciami  $y_{exp}$  uzyskanymi z badań doświadczalnych zarysowanych wstępnie belek żelbetowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi z włókien węglowych. Wartości stosunku  $y_{cal} / y_{exp}$  są przy mniejszych wartościach stopnia zaawansowania obciążenia (określonego stosunkiem  $M/M_R$ ) – mniejsze od jedności, co oznacza, że proponowany sposób obliczania określa ugięcie z zapasem w odniesieniu do ugięcia doświadczalnego. W przedziale obciążeń określonych wartościami stosunku  $M/M_R = 0,5 + 0,7$  (przy których sprawdza się ugięcie) – ugięcia obliczone są prawie równe ugięciom doświadczalnym.



Rys. 9. Porównanie ugięć obliczonych z ugięciami doświadczalnymi belek żelbetowych z naklejonymi taśmami kompozytowymi z włókien węglowych  
 Fig. 9. Comparison of calculated and experimental deflections of CFRP-plated RC beams

## 5. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzenia badań doświadczalnych belek żelbetowych z naklejonymi na spodzie taśmami kompozytowymi z włókien węglowych stwierdzono, że:

- Mechanizm zniszczenia badanych belek występował w postaci
  - odspojenia końcowego odcinka taśmy kompozytywnej oraz częściowego odspojenia betonu otuliny zbrojenia (belki serii 1 i 2 – rys. 3),
  - odspojenia betonu otuliny zbrojenia (belki serii 3 – rys. 4).
- Mechanizm zniszczenia belek zależy od wskaźnika ścinania, którego wartość, określona stosunkiem  $a_v/h$ , wynosi:

$$\frac{a_v}{h} = 4,55 > 4 \text{ – w przypadku belek serii 1 i 2,}$$

$$\frac{a_v}{h} = 2,72 < 4 \text{ – w przypadku belek serii 3.}$$

- Nośność badanych belek dobrze aproksymują wartości obliczone z prostej zależności opisanej wzorem (11).
- Efektywność wzmocnienia belek poprzez naklejenie na spodzie taśm kompozytowych z włókien węglowych, określoną w stosunku do kontrolnych belek żelbetowych (bez wzmocnienia) z uwzględnieniem warunku nieprzekroczenia granicznej wartości ugięcia – można oszacować w przedziale od 30% do 35%.
- Przedstawiony sposób obliczania ugięcia wstępnie zarysowanych, a następnie dozbrojonych zewnętrznie taśmami kompozytowymi belek żelbetowych stanowi próbę oszacowania ugięcia takich elementów, dość dobrze aproksymującą ugięcie doświadczalne.



Prowadzone obecnie w Zakładzie Konstrukcji i Badań Wytrzymałościowych ITB badania doświadczalne i analityczne belek żelbetowych z naklejonymi taśmami, kształtkami i matami kompozytowymi z włókien węglowych stworzą podstawę dalszego uściślenia propozycji w zakresie nośności i odkształcalności takich elementów.

## Bibliografia

- [1] Roberts T.M.: Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams. *Structural Engineer*, Vol. 67, No 12, June 1989
- [2] Garden H.N., Hollaway L.C., Thorne A.M.: A preliminary evaluation of carbon fibre reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members. *Proceedings ICE Structures and Buildings* 123, May 1997
- [3] Smith S.T., Teng J.G.: Debonding failures in FRP-plated RC beams with or without U strip end anchorage. *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. 12–15 December 2001, Hong Kong, China. Elsevier 2001
- [4] International Federation for Structural Concrete (fib); Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report prepared by Task Group 9.3. *Bulletin* 14, July 2001
- [5] Jansze W.: Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates. PhD Thesis, Delft University of Technology, 1997
- [6] German Institute of Construction Technology: Guidelines for the strengthening of concrete members by bonding of unidirectional carbon fibre reinforced polymer plates (CFRP plates) Sika Carbo Dur type. Berlin, October 1997
- [7] Garden H.N., Quantrill R.J., Hollaway L.C., Thorne A.M., Parke G.A.: An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 12, 1998
- [8] Kamińska M.E., Kotynia R.: Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP. Zeszyt 9. Katedra Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej. Łódź 2000
- [9] Kubicki J.: Ugięcie belek żelbetowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi z włókien węglowych. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2002

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF RC CRACKED BEAMS BONDED WITH CFRP SOFFIT PLATES

#### Summary

The paper describes the results of experimentally tested RC cracked beams strengthened by bonding CFRP plates to the soffit of beam. The mode of failure and efficiency of strengthening, as well as the simple method for estimation the deflection values are presented.

*Praca wpłynęła do Redakcji 27 VIII 2002*