

Jarosław Szulc*

REDYSTRYBUCJA NAPRĘŻEŃ STYCZNYCH I POŚLIZG W ŚCINANYM POŁĄCZENIU BETON-TAŚMA CFRP. ANALIZA NIELINIOWA Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW TYPU „INTERFACE”

Zalecenia raportu FIB *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures* stanowią, iż przy sprawdzaniu warunków SGN uwzględnić należy dwa modele zniszczenia elementu, przy założeniach pełnego zespolenia oraz przy częściowej utracie tego zespolenia. W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowej badania ścinania połączenia beton-taśma CFRP (Zilch i in., 1998, oraz Bizindavji, Neale, 1999) przy wykorzystaniu w modelu numerycznym elementów typu „interface” o bilinearnej charakterystyce sztywnościowej zaproponowanej przez Holzenkämpfera, 1994. Przyjmując poziom obciążenia, przy którym połączenie wchodzi w pozasprężystą fazę pracy, analizowano wielkość tzw. zjawiska poślizgu oraz rozkład naprężeń ścinających (ich redystrybucję). Zweryfikowany doświadczalnie model numeryczny ścinania stanowi podstawę do dalszych prac, wyjaśniających złożone modele zniszczenia zginanych belek żelbetonowych wzmacnianych taśmami CFRP (według systematyki Blaschko, 1998).

1. Sformułowanie problemu

Zgodnie z zaleceniami raportu FIB [1] przy projektowaniu zginanych belek żelbetonowych wzmacnianych zewnętrznie taśmami CFRP należy uwzględnić dwa podstawowe modele zniszczenia elementu, odpowiednio przy założeniach:

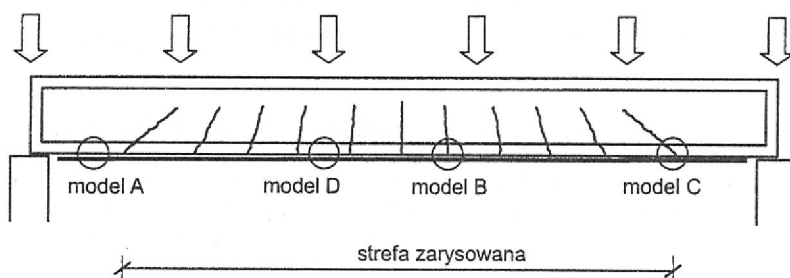
- pełnego zespolenia,
- częściowej utraty zespolenia.

Sprawdzenie warunku SGN, jak przy przekroju jednorodnym, jest determinowane zabezpieczeniem elementu przed zniszczeniem połączenia beton-taśma CFRP, następującym w wyniku propagacji dopuszczalnych – według raportu [1] – uszkodzeń lokalnych.

Analogiczne podejście reguluje w swoich postanowieniach norma [2] w odniesieniu do projektowania na przykład konstrukcji zespolonych, podając warunek (na rozwarstwienie połączenia), przy którym nośność elementu można określać zakładając tzw. pełne zespolenie. W tym przypadku istnieje jednak zasadnicza różnica – projektant może bowiem (poprzez odpowiednie zbrojenie) w określonym zakresie regulować sztywność połączenia.

* dr inż. – adiunkt w Zespole Obserwacji i Analiz Budowli ITB

W projektowaniu wzmocnień zginanych belek żelbetonowych przyjęcie możliwości wystąpienia lokalnych uszkodzeń w strefie połączenia beton-taśma CFRP implikuje zmiany rozkładu naprężeń ścinających (redystrybucję). Zasadniczym problemem staje się więc wiarygodne (a więc i potwierdzone doświadczalnie) określenie zakresu propagacji tzw. zjawiska poślizgu (na długości elementu), przy którym następuje całkowite zniszczenie połączenia i w konsekwencji utrata nośności elementu. Wyjaśnienie tego zagadnienia, wymagające niewątpliwie zastosowania złożonych metod numerycznych (z aktywacją zweryfikowanych doświadczalnie opcji nieliniowości materiałowych), stanowi podstawę do dalszych prac ukierunkowanych już na analizy metodyki obliczeniowej zginanych belek żelbetonowych wzmocnianych taśmami CFRP (według algorytmów [1]), na podstawie klasyfikacji modeli zniszczenia opracowanych przez M. Blaschko [3] – rysunek 1.



Rys. 1. Modele zniszczenia połączenia beton-taśma CFRP [3]
Fig. 1. Bond failure models of concrete element with CFRP strip [3]

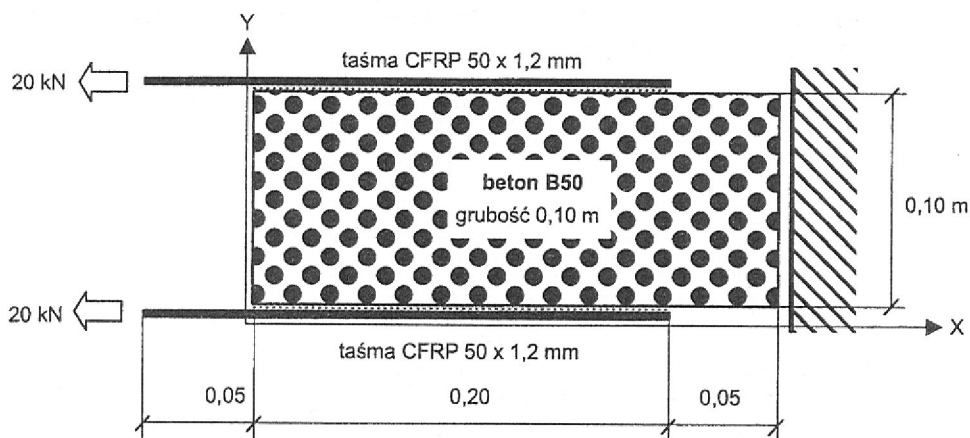
Podstawowym problemem, który pojawia się przy tworzeniu modelu numerycznego, staje się przyjęcie w opcji własności materiałowych pełnego przebiegu charakterystyki sztywnościowej połączenia beton-taśma CFRP. W artykule dokonano próby symulacji badania ścinania (zespół Zilcha [3] i Bizindaviego [4]), przy implementacji bilinearnego modelu zniszczenia zespolenia według Holzenkämpfera [5]; analizie poddano stopień redystrybucji naprężeń ścinających oraz wielkość tzw. zjawiska poślizgu połączenia.

2. Model numeryczny. Ścinanie połączenia beton-taśma CFRP

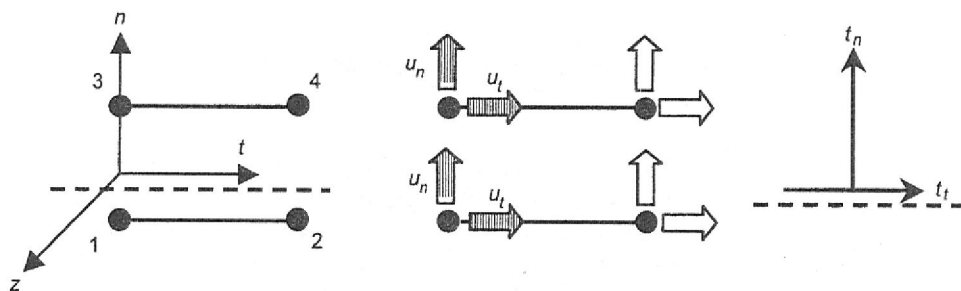
Próbie wyjaśnienia zjawisk towarzyszących ścinaniu połączenia beton-taśma CFRP przeprowadzono na drodze analiz numerycznych, odwzorowujących badania doświadczalne Zilcha [3] – rysunek 2. Realizację postawionych zadań uzyskano przy wykorzystaniu system komputerowego DIANA [6] współpracującego z post- i preprocesorem FEMSYS [7].

Analizy numeryczne wykonano dla modelu 2D, przyjmując:

- czworokątne, czterowzłowe elementy Q8MEM „plane stress”, odwzorowujące beton i taśmę CFRP,
- liniowe, dwuwzłowe elementy L8IF typu „interface”, odwzorowujące połączenie beton-taśma CFRP (rys. 3).



Rys. 2. Model numeryczny
Fig. 2. Numerical model



Rys. 3. Element typu „interface”: LBIF – line, 2+2 nodes, 2D (oznaczenia według [6])
Fig. 3. Interface element: line, 2+2 nodes, 2D (symbols acc. [6])

Wprowadzenie w model numeryczny elementów typu „interface” pozwala na pełną i rzeczywistą symulację zachowania ustroju przy dowolnej zmienności parametru określającego podatność połączenia (analizy sprężyste) według warunków:

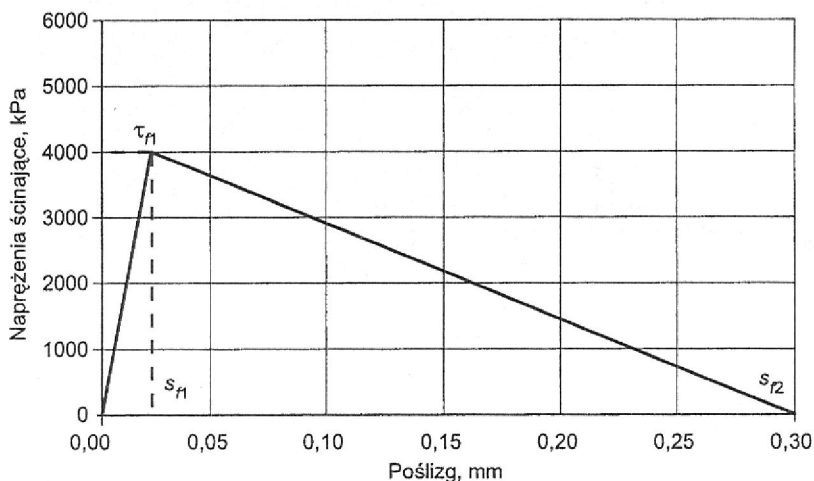
$$K_n = \frac{t_n}{u_n} \quad (1)$$

$$K_t = \frac{t_t}{u_t} \quad (2)$$

gdzie: t_n, t_t – naprężenia w połączeniu (w kierunku normalnym i stycznym),
 u_n, u_t – przemieszczenia w połączeniu odpowiadające naprężeniom t_n, t_t .

W celu pełniejszego określenia wartości poślizgu obliczenia wykonano również przy założeniu pozasprężystej charakterystyki sztywnościowej połączenia beton-taśma CFRP

według bilinearnego przebiegu Holzenkämpfera [5] (rys. 4), który został opracowany na podstawie szeregu badań doświadczalnych.



Rys. 4. Połączenie klejowe beton-taśma CFRP.

Zależność: naprężenia ścinające-poślizg (według Holzenkämpfera [5])

Fig. 4. Bond between concrete and CFRP strips.

Shear stress-slip relationship (by Holzenkämpfer [5])

Analizie jakościowych i ilościowych zmian wartości naprężeń ścinających w połączeniu (ich redystrybucji) poddano przyjęty model poziomu obciążenia 2×20 kN, implikujący wprowadzenie powstanie lokalnych uszkodzeń konstrukcji (zwiększonych wartości poślizgu), nie wywołujących jednak utraty jej nośności (poprzez całkowite zerwanie połączenia).

W opcji własności materiałowych założono następujące wartości modułu sprężystości:

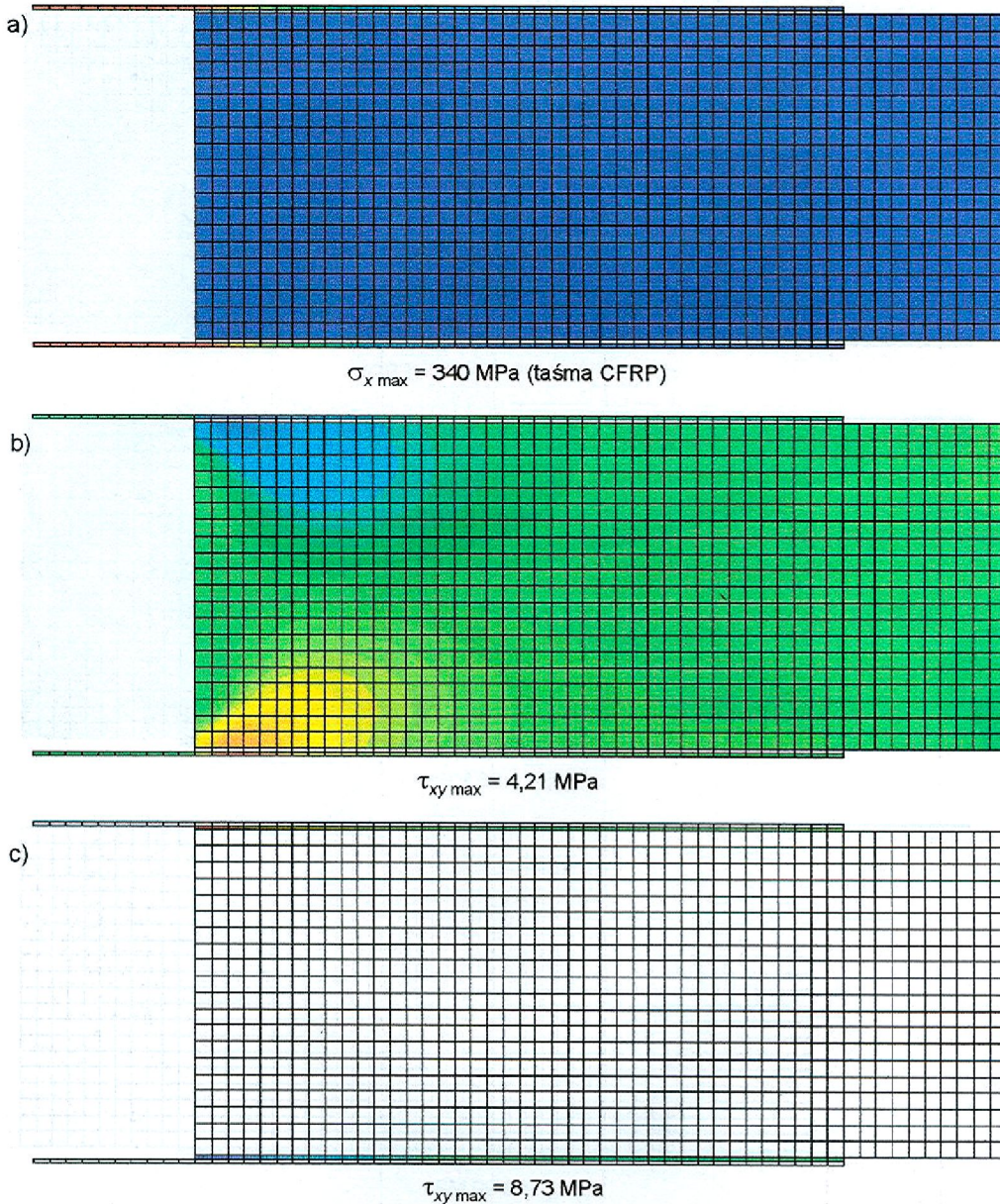
- beton klasy B50 – $E_{cm} = 35 \cdot 10^6$ kPa,
- taśma CFRP – $E_f = 200 \cdot 10^6$ kPa.

Według badań doświadczalnych wytrzymałość CFRP na rozciąganie zawiera się w przedziale od 1300 MPa do 2800 MPa.

3. Wyniki analiz numerycznych

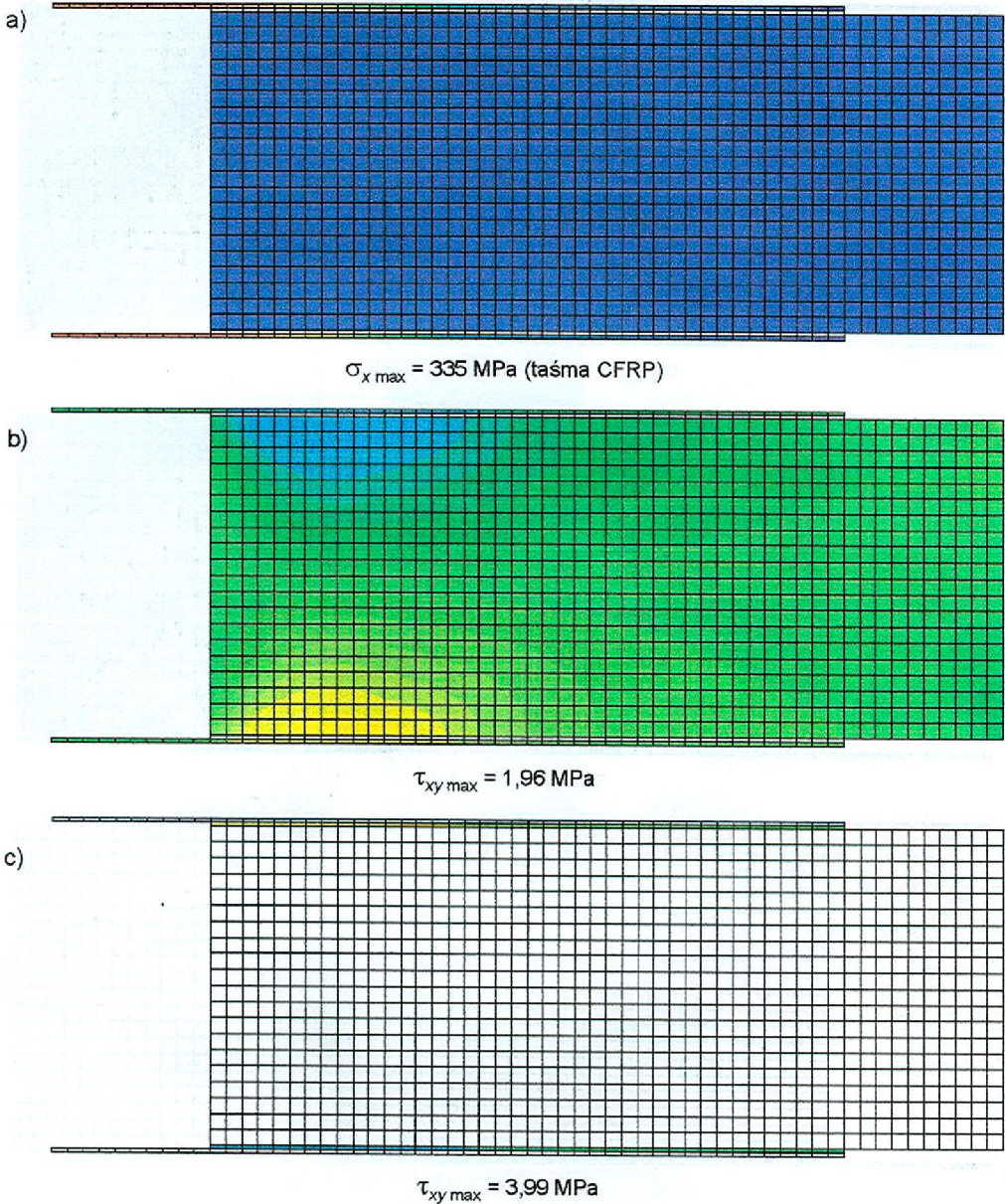
Przeprowadzone (w fazie sprężystej i pozasprężystej) analizy numeryczne symulacji badania ścinania połączenia beton-taśma CFRP pozwoliły określić tendencje w zakresie zmian:

- rozkładu poziomych naprężeń normalnych σ_x w betonie i taśmie CFRP,
- rozkładu naprężeń ścinających τ_{xy} w betonie i taśmie CFRP,
- redystrybucji naprężeń ścinających w połączeniu beton-taśma CFRP (na długości elementu),
- deformacji elementu (przemieszczenia u_x, u_y),
- wzajemnych przemieszczeń w połączeniu (wartości poślizgu).



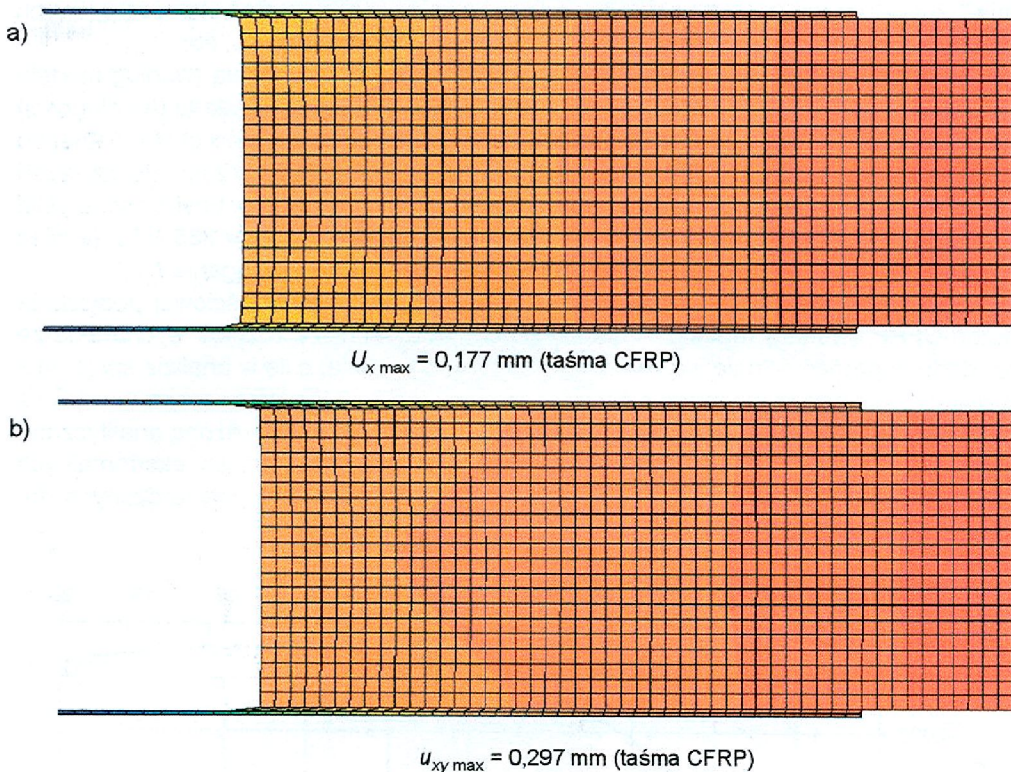
Rys. 5. Wyniki analiz numerycznych – model sprężysty: a – naprężenia normalne σ_x (beton, taśma CFRP), b – naprężenia styczne τ_{xy} (beton, taśma CFRP), c – naprężenia ścinające τ_{xy} w połączeniu klejowym

Fig. 5. The results of numerical analysis – linear model: a – normal stresses σ_x (concrete, CFRP strip), b – shear stresses τ_{xy} (concrete, CFRP strip), c – shear stresses τ_{xy} (bond between concrete and CFRP)



Rys. 6. Wyniki analiz numerycznych – model pozasprężysty: a – naprężenia normalne σ_x (beton, taśma CFRP), b – naprężenia styczne τ_{xy} (beton, taśma CFRP), c – naprężenia ścinające τ_{xy} w połączeniu klejowym

Fig. 6. The results of numerical analysis – nonlinear model: a – normal stresses σ_x (concrete, CFRP strip), b – shear stresses τ_{xy} (concrete, CFRP strip), c – shear stresses τ_{xy} (bond between concrete and CFRP)



Rys. 7. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia u_x : a – model sprężysty, b – model pozasprężysty
 Fig. 7. The results of numerical analysis – displacement u_x : a – linear model, b – nonlinear model

W przeprowadzonych analizach świadomie, w celu uproszczenia modelu, zrezygnowano z uwrażliwienia betonu na możliwość pojawienia się zarysowania (założono klasę B50, czyli beton o wysokiej wytrzymałości średniej na rozciąganie $f_{ctm} = 3,5 \text{ MPa}$), nie wprowadzono również ograniczenia f_t (wytrzymałość na rozciąganie CFRP) zważywszy, iż przy założonych obciążeniach wartość ta jest praktycznie nieosiągalna. Graficzną prezentację wyników dwóch serii obliczeniowych przedstawiono w postaci map naprężeń (ze wskazaniem wartości ekstremalnych) na rysunku 5 (analiza sprężysta) i na rysunku 6 (analiza pozasprężysta); stan deformacji analizowanego ustroju pokazano na rysunku 7.

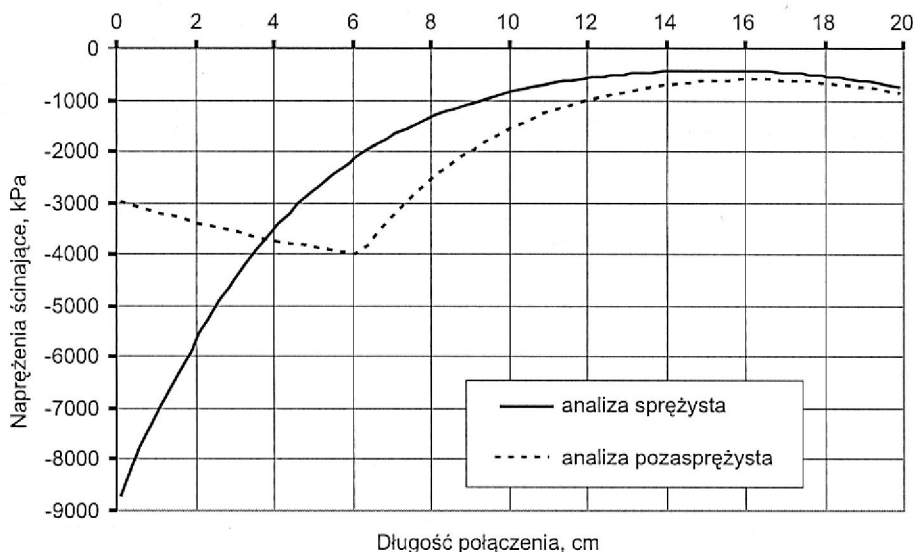
4. Redystrybucja naprężeń stycznych i poślizg w ścinanym połączeniu beton-taśma CFRP

Przeprowadzone alternatywnie analizy numeryczne ścinanego ustroju połączenia betonu z taśmą CFRP pozwoliły na dostrzeżenie kilku interesujących zjawisk, które mogą

mieć znaczący wpływ przy projektowaniu wzmocnień zginanych belek żelbetonowych (według procedur obliczeniowych [1]). W szczególności stwierdzono, że:

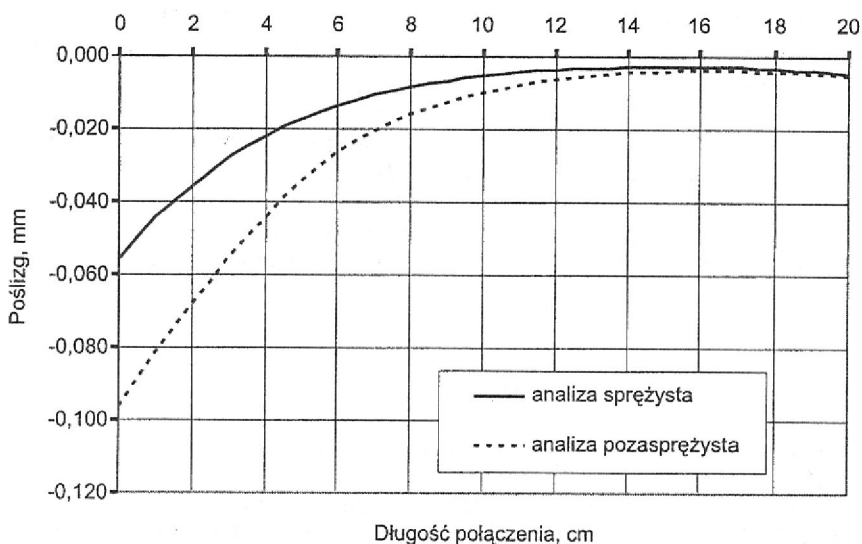
- uwzględnienie pełnej charakterystyki sztywnościowej połączenia (według modelu Holzenkämpfera [5] – rys. 4) nie zmienia zasadniczo charakteru rozkładu (na długości) naprężeń ścinających τ_{xy} w betonie, istotnie jednak zmniejsza wartości ekstremalne: od 4,21 MPa (analiza sprężysta) do 1,96 MPa (analiza pozasprężysta); w zakresie naprężeń rozciągających w taśmie CFRP takich różnic już nie zaobserwowano: w analizie sprężystej uzyskano $\sigma_{x \max} = 340$ MPa, zaś w analizie pozasprężystej $\sigma_{x \max} = 335$ MPa (a więc wartości zbliżone i jednocześnie dalekie od wytrzymałości na rozciąganie f_t);

- uwzględnienie pozasprężystej części charakterystyki sztywnościowej połączenia beton-CFRP (według modelu – rys. 5) generuje zasadnicze różnice w charakterze rozkładu naprężeń ścinających na całej długości połączenia; o ile w analizie sprężystej uzyskano klasyczny przebieg z koncentracją na skraju 8,73 MPa, o tyle w analizie pozasprężystej uzyskano (wyczuwalną intuicyjnie, choć nie potwierdzoną analitycznie) wyraźną redystrybucję naprężeń stycznych (z ograniczeniem wartości ekstremalnych wynikających z przyjęcia w modelu zniszczenia Holzenkämpfera potwierdzonych doświadczalnie wartości $\tau_{f1} = 4$ MPa) – rysunek 8.



Rys. 8. Redystrybucja naprężeń ścinających w połączeniu beton-taśma CFRP
Fig. 8. Distribution of shear stresses along the bond between concrete and CFRP strip

- oczywistym efektem redystrybucji naprężeń ścinających w połączeniu beton-taśma CFRP, wykazanej przy założeniu pełnej charakterystyki sztywnościowej, jest (widoczna na rys. 9) ekspansja zjawiska poślizgu w strefie przekroczenia wytrzymałości na ścinanie τ_{f1} (i w mniejszym stopniu poza nią): w analizie sprężystej uzyskano ekstremalną wartość poślizgu $s_{f \max} = 0,056$ mm, w analizie pozasprężystej $s_{f \max} = 0,096$ mm (znacznie mniejszą od $s_{f2} = 0,300$ mm – jak na rys. 4).



Rys. 9. Wartość poślizgu w połączeniu beton-taśma CFRP

Fig 9. Slip value along the bond length between concrete and CFRP strip

5. Wnioski

Analiza aktualnego stanu wiedzy (w szczególności zaleceń raportu FIB [1]) w zakresie projektowania zginanych belek żelbetonowych wzmocnianych taśmami CFRP, jak również wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych, pozwalają na sformułowanie szeregu uwag w sposób istotny wzbogacających świadomość konstruktora w kształtowaniu algorytmów obliczeniowych przy sprawdzaniu nośności wzmocnianych elementów.

1. Nie budzi jakichkolwiek wątpliwości wskazana w opracowaniu [1] konieczność weryfikacji warunków SGN przy założeniach pełnego zespolenia i częściowej jego utraty. Bezsporny jest bowiem fakt, że powstanie lokalnych uszkodzeń połączenia beton-taśma CFRP nie oznacza jednocześnie zniszczenia tego połączenia. Przy założeniu pełnej charakterystyki sztywnościowej (np. model zniszczenia według Holzenkämpfera) w analizach numerycznych wykazano możliwość redystrybucji naprężeń ścinających na całej długości elementu – w sytuacji lokalnego przekroczenia wartości τ_{f1} .

2. Oczywistym efektem redystrybucji naprężeń ścinających w połączeniu beton-CFRP jest (potwierdzone ilościowo i jakościowo w analizach numerycznych) występowanie zwiększonych wartości poślizgu s_f w strefie przekroczenia wytrzymałości na ścinanie (a także w mniejszym stopniu poza tą strefą) – zalecenia raportu [1] tego zagadnienia w sposób wyraźny nie regulują.

4. Zasadniczym elementem przy określaniu zakresu propagacji uszkodzeń połączenia beton-taśma CFRP (w złożonych modelach zniszczenia belek żelbetonowych wzmocnianych CFRP) staje się wiarygodne (i potwierdzone doświadczalnie) określenie pełnej charakterystyki sztywnościowej τ_f-s_f . Zdefiniowany przez Holzenkämpfera model bili-

nearny (rys. 4), opracowany na podstawie ograniczonej liczby badań, nie ujmuje kilku istotnych parametrów, na przykład rodzaju łączonych powierzchni (szorstkości) czy też zróżnicowania przebiegu wykresu w zależności od klasy betonu – zasadne więc staje się przeprowadzenie kompleksowych prac obejmujących wskazane zagadnienia.

6. Metody numeryczne stanowią efektywne narzędzie pracy przy określaniu i weryfikacji analitycznych zasad projektowania zginanych belek żelbetonowych wzmocnianych taśmami CFRP; do ich wykorzystania niezbędna jest jednak pełna świadomość konieczności konwersacyjnego charakteru pracy człowieka z komputerem na przykład w zakresie znajomości wewnętrznych algorytmów czy też wprowadzanych do nich założeń obliczeniowych.

Bibliografia

- [1] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report. Bulletin FIB 14, 2001
- [2] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone
- [3] Zilch K., Niedermeier R., Blaschko M.: Bericht über Versuche zum Verstärken von Betonbauteilen mit CFK. Versuchsbericht Nr 1310, Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau 1998
- [4] Bizindavyi L., Neale K. W.: Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete. *ASCE Journal of Composite for Construction* 3(4) 1999, s. 153-160
- [5] Holzenkämpfer P.: Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Dissertation. TU Braunschweig 1994
- [6] DIANA – Finite Element Analysis. Users Manual. TNO Building and Construction Research. Delft 1996
- [7] FEMGV 4 – User Manual. Femsys Limited, Leicester 1997

REDISTRIBUTION OF SHEAR STRESSES AND SLIP ALONG THE BOND BETWEEN CONCRETE AND „CFRP” STRIPS. NONLINEAR ANALYSIS WITH USE OF INTERFACE ELEMENTS

Summary

According to FIB report recommendations [1]: the failure models of a RC element strengthened in flexure with externally bonded CFRP strips may be divided into two classes: a) those where full composite action of concrete and CFRP is maintained until concrete reaches crushing in compression or the CFRP fails in tension b) c) those where composite action is lost prior to class a) failure, e.g. due to peeling-off the CFRP d) The paper discussed computer simulation results of simplified bond test (e.g. Zilch et al. 1998, Bizindavyi, Neale 1999) with use of interface elements in numerical model (with bilinear shear-slip relationship according to Holzenkämpfer 1994). The shear displacement (slip) and shear stress distribution was analyzed for specified level of load (when the bond was beyond the elastic phase). Verified numerical model of shear can constitute a base for further research works to explain the complicated models of behaviour under bending, of RC beams strengthened with use of CFRP strips (by classification according to Blaschko 1998).

Praca wpłynęła do Redakcji 23 IX 2004