

Pręty zbrojeniowe FRP jako główne zbrojenie zginanych elementów betonowych – przegląd zaleceń i efektywność projektowania

Mgr inż. Michał Drzazga, prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński,
Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Pierwsze zastosowanie zbrojenia polimerowego w elemencie betonowym miało miejsce w 1970 r. Od tego czasu rozpoczął się intensywny proces weryfikacji tego typu prętów w kontekście wykorzystania go jako zbrojenia głównego elementów betonowych. Głównymi zaletami prętów FRP jest ich odporność na korozję, obojętność elektromagnetyczna i duża wytrzymałość na rozciąganie. Tego typu zbrojenie może znaleźć zastosowanie m.in. przy obiektach narażonych na agresywne działanie środowiska, czy w obiektach wymagających obojętności elektromagnetycznej (by urzędnicy, które się tam znajdują, mogły pracować bez zakłóceń i strat). Stosowanie prętów FRP wydłuża żywotność konstrukcji i znacznie zmniejsza zakres prac remontowych (stąd liczne realizacje obiektów inżynierskich np. mostów, wiaduktów). Pręty FRP mogą znaleźć zastosowanie również w zakresie zbrojenia obiektów przemysłowych, np. wanień elektrolitycznych (np. w KGHM Polska Miedź) czy fundamentów transformatorów. Obiecująca wizja wykorzystania prętów polimerowych jako głównego zbrojenia elementów betonowych doprowadziła do podjęcia wielu badań i prób znormalizowania projektowania elementów

betonowych zbrojonych prętami FRP. Rysunek 1 przedstawia zarys historyczny rozwoju zaleceń projektowych dotyczących zbrojenia FRP. Zalecenia podejmujące tematykę zbrojenia polimerowego są głównie formą modyfikacji norm dotyczących elementów żelbetowych, opierających się w większości na półprobabilistycznej metodzie stanów granicznych.

Spośród dostępnych zaleceń podejmujących tematykę zbrojenia FRP możemy wyróżnić:

- Zbiór zaleceń Japońskich JSCE, 1997 [N1];
- Zbiór zaleceń Kanadyjskich do obiektów kubaturowych CSA-S806, 2002 [N2] oraz do obiektów mostowych CHDBC, 2006 [N5];
- Zbiór zaleceń Amerykańskich ACI 440.1R-06, 2006 [N3];
- Zbiór zaleceń Włoskich CNR-DT 203/2006 [N4].

Zalecenia podejmujące tematykę zbrojenia FRP opierają się między innymi na rozwiązaniach analitycznych oraz empirycznych równaniach wynikających z prac badawczych przeprowadzanych nad próbkami prętów polimerowych oraz elementów betonowych zbrojonych prętami FRP. W związku z odmiennymi właściwościami mechanicznymi prętów FRP (w porównaniu ze stalą zbrojeniową) zalecenia wprowadzają modyfikację współczynników dostępnych w dotychczasowych

1970	Pierwsze zastosowanie zbrojenia FRP w elemencie betonowym
1996	The European Committee for Concrete wydaje zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP
1997	The Japan Society of Civil Engineers wydaje zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP
2000	The Canadian Standard Association wydaje zbiór zaleceń projektowych w zakresie mostów betonowych zbrojonych prętami FRP
2001	The ISIS Canada wydaje instrukcję stosowania prętów FRP jako zbrojenia elementów betonowych The American Concrete Institute Committee 440 wydaje pierwszy zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP
2002	The Canadian Standard Association wydaje zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP
2003	The American Concrete Institute Committee 440 wydaje drugi zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP
2006	The National Research Council wydaje zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP The American Concrete Institute Committee 440 wydaje trzeci zbiór zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP
2007	The ISIS Canada wydaje kolejną instrukcję stosowania prętów FRP jako zbrojenia elementów betonowych
2009	The Canadian Standard Association wydaje załącznik do zbioru zaleceń projektowych w zakresie elementów betonowych zbrojonych prętami FRP

Rys. 1. Zarys historyczny rozwoju zaleceń projektowych dotyczących zbrojenia FRP

normach podejmujących tematykę elementów żelbetowych. Różnice w projektowaniu elementów betonowych zbrojonych prętami FRP a elementami żelbetowymi wynikają z m.in. mniejszej sztywności prętów FRP, większej wytrzymałości prętów FRP oraz liniowo-sprężystego zachowania w całym zakresie wytrzymałości. Zbiór zaleceń [N1] jest modyfikacją japońskiej normy – JSCE (2007) Standard specifications for Concrete structures – 2007, Design – i znajduje zastosowanie również w projektowaniu elementów sprężonych (zbrojonych prętami FRP). [N1] zawiera ogólne informacje na temat m.in. charakterystyk badań wytrzymałościowych prętów FRP. Zalecenie [N1] definiuje współczynniki bezpieczeństwa odniesione do elementu oraz do materiału. Wartości tych współczynników są większe aniżeli w przypadku elementów żelbetowych (projektowanych wg JSCE – 2007 Standard specifications for Concrete structures – 2007, Design. Zalecenie [N2] podaje (podobnie jak [N1]) charakterystykę badań cech wytrzymałościowych prętów FRP oraz tak jak zalecenie [N1] dotyczy również elementów sprężonych zbrojonych prętami FRP. W roku 2004 zalecenie [N2] zostało uznane jako norma. W 2001 roku The ISIS Canada opublikowało instrukcję projektową [1] dotyczącą zastosowania prętów FRP jako zbrojenia elementów betonowych. Wytyczne te zawierają informację o dostępnych średnicach prętów, o dostępnym typie zbrojenia itp. [N2] podobnie jak [N1] podejmuje tematykę projektowania elementów o przekroju nieprostokątnym. Zalecenie [N3] jest modyfikacją normy amerykańskiej ACI-318 i w przeciwieństwie do [N1] i [N2] nie dotyczy elementów o przekroju nieprostokątnym oraz elementów sprężonych. Podstawę wytycznych w [N3] stanowią rozwiązania analityczne, badania doświadczalne oraz dotychczasowe wykorzystanie prętów FRP jako zbrojenia elementów betonowych. Zalecenie [N3] wprowadza materiałowe współczynniki redukcyjne oraz przy wymiarowaniu na zginanie w stanie granicznym nośności współczynniki redukcyjne zależne od mechanizmu zniszczenia. [N3] podobnie jak instrukcja [1] podaje informację o właściwościach mechanicznych i fizycznych prętów FRP oraz o dostępnych rodzajach zbrojenia. Zalecenie [N4] jest modyfikacją Eurokodu 2 i tak jak [N3] nie obejmuje projektowania elementów sprężonych.

2. Charakterystyka zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami FRP

Wszystkie zalecenia ([N1], [N3], [N4]) z wyjątkiem kanadyjskiego [N2] akceptują oba mechanizmy zniszczenia w stanie granicznym nośności przy zginaniu: zerwanie prętów FRP oraz zmiążdżenie betonu. Dzięki cechom plastycznym betonu, przy mechanizmie zniszczenia przez kontrolowanie ściskanej strefy betonu, obserwuje się sygnalizację przekroczenia stanu granicznego, w wyniku czego taka moda zniszczenia charakteryzuje się mniejszą gwałtownością i jest sugerowana jako

korzystniejsza z poziomu projektowania. Belka ulega zniszczeniu, gdy odkształcenia w betonie osiągną wartość graniczną ε_{cu} . Tablica 1 prezentuje algorytmy wymiarowania elementów betonowych zbrojonych prętami polimerowymi w stanie granicznym nośności na zginanie według zaleceń [N1], [N2], [N3], [N4], [2]. Instrukcja [1] w oparciu m.in. o [N5] dopuszcza mechanizm zniszczenia w postaci zerwania prętów, przy nałożeniu współczynnika redukcyjnego uwzględniającego gwałtowność tego typu mechanizmu zniszczenia. Określenie „balanced failure strain condition” zawarte w [N2] i [N3] opisuje stan odkształceń w przekroju. Pojęcie to oznacza sytuację, w której zarówno odkształcenia w zbrojeniu FRP oraz odkształcenia w betonie zrównają się z wartościami granicznymi ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$, $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$) i ma miejsce, gdy stopień zbrojenia podłużnego ρ_f jest równy granicznemu ρ_{fb} ($A_f = A_{fb}$). Pojęcie „balanced failure strain condition” jest rozumiane inaczej niż pojęcie „balanced strain condition” (dotyczące zbrojenia stałą zbrojenio-wą). Pręty FRP nie wykazują zachowania plastycznego przy granicznych odkształceniach [3], stąd ich zerwanie następuje w sposób gwałtowny (bez jakichkolwiek ostrzeżeń). Gdy stopień zbrojenia podłużnego elementu ρ_f jest mniejszy od granicznego stopnia zbrojenia ρ_{fb} ($A_f < A_{fb}$), obserwuje się zniszczenie w postaci zerwania prętów FRP umieszczonych w strefie rozciąganej. W przypadku zbrojenia prętami polimerowymi zniszczenie (w stanie granicznym, gdy $\rho_f < \rho_{fb}$) następuje w sposób gwałtowny (niesygnalizowane zerwanie prętów). W zginanym elemencie zbrojonym prętami polimerowymi, przy $A_f > A_{fb}$ zniszczeniu ulega strefa ściskana betonu, taki mechanizm zniszczenia charakteryzuje się mniejszą gwałtownością (w wyniku cech plastycznych betonu). Wszystkie dostępne zalecenia [N1], [N2], [1], [2], [N3], [N4] przy wymiarowaniu elementu na zginanie wprowadzają następujące założenia:

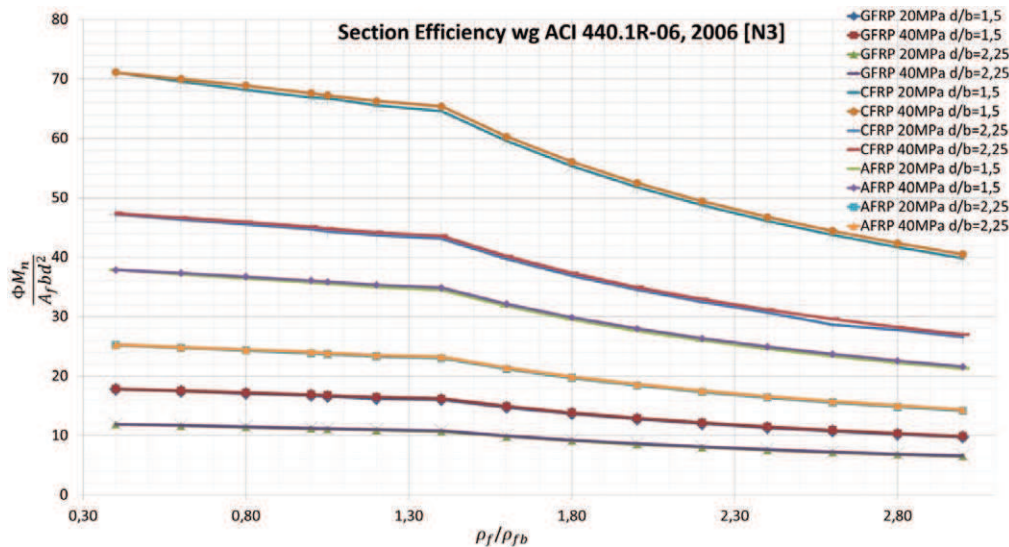
- odkształcenia graniczne w betonie $\varepsilon_{cu} = 3\%$ [N3] lub $\varepsilon_{cu} = 3,5\%$ [N1], [N2], [1], [2], [N4];
- beton w strefie rozciąganej się pomija;
- obowiązuje liniowy wykres odkształceń (hipoteza płaskich przekrojów);
- zakłada się, że zależność odkształcenie – naprężenie rozciąganych prętów FRP jest liniowa aż do zniszczenia;
- zakłada się idealną przyczepność pomiędzy betonem i prętami FRP.

3. Porównanie efektywności przekroju zginanego elementu betonowego zbrojonego prętami FRP

Celem przedstawienia szeregu dostępnych algorytmów wyznaczania obliczeniowej nośności elementu na zginanie dla każdego zalecenia z tabeli 1 sformułowano m.in. wykres funkcji wartości obliczeniowej nośności momentowej znormalizowanej z polem przekroju elementu oraz ilością zbrojenia podłużnego $\Phi M_n / A_p b d^2$ (przykładowo

Tablica 1. Algorytmy wymiarowania na zginanie

Procedura	Amerykański zbiór zaleceń projektowych ACI 440.1R-06, 2006 [N3]	Kanadyjski zbiór zaleceń projektowych CSA-S806, 2002 [N2]	Instrukcja ISIS, 2007 [2]	Japoński zbiór zaleceń projektowych JSCE, 1997 [N1]	Włoski zbiór zaleceń projektowych CNR-DT 203/2006 [N4]
Wytężalność prętów na zerwanie	$f_{fu} = C_F \cdot f_u$	f_{frpu}	f_{frpu}	$f_{fud} = \frac{f_{fuk}}{Y_{mf}}$	$f_{fd} = 0,9\eta_{fa} Y_f$
Stożek zbrojenia belki	$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$	$\rho_{frpb} = \frac{A_{frf}}{bd}$	$\rho_{frpb} = \frac{A_{frf}}{bd}$	$\rho_w = \frac{A_f}{bd}$	$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$
Graniczny stopień zbrojenia prętami FRP	$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f_c}{f_u} \beta_1 \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$	$\rho_{frpb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f_c}{\Phi_{frp} f_{frpu}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{frpu}} \right)$	$\rho_{frpb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f_c}{\Phi_{frp} f_{frpu}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{frpu}} \right)$	$\rho_{wb} = \frac{k_1 \beta f_{cd}}{f_{ud}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fud}} \right)$	$\rho_{fb} = \frac{\eta \lambda f_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fd}} \right)$
$\rho_{fb} \leq \rho_f$	$f_f = \left[\sqrt{A+B} - C \right] \leq f_{fu}$ $A = \frac{4}{(E_f \epsilon_{cu})^2}$ $B = \frac{0,85 \beta_1 f_c}{\rho_f} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu}}$ $C = 0,5 E_f \epsilon_{cu}$	$f_{frp} = A \sqrt{1+B} - 1$ $A = 0,5 E_{frp} \epsilon_{cu}$ $B = \frac{4 \alpha_1 \beta_1 \Phi_c f_c}{\rho_{frp} \Phi_{frp} E_{frp} \epsilon_{cu}}$	$f_{frp} = A \sqrt{1+B} - 1$ $A = 0,5 E_{frp} \epsilon_{cu}$ $B = \frac{4 \alpha_1 \beta_1 \Phi_c f_c}{\rho_{frp} \Phi_{frp} E_{frp} \epsilon_{cu}}$	$f_f = \left[\sqrt{A+B} - C \right] \leq f_{fud}$ $A = \frac{4}{(E_f \epsilon_{cu})^2}$ $B = \frac{k_1 \beta f_{cd}}{\rho_w} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu}}$ $C = 0,5 E_f \epsilon_{cu}$	$f_f = \left[\sqrt{A+B} - C \right] \leq f_{fd}$ $A = \frac{4}{(E_f \epsilon_{cu})^2}$ $B = \frac{\eta \lambda f_{cd}}{\rho_f} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu}}$ $C = 0,5 E_f \epsilon_{cu}$
Zniszczenie betonu	$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f_c} \right) b d^2$	$c = \frac{\alpha_1 \beta_1 \Phi_c f_c \cdot b}{A_{frp} \Phi_{frp} f_{frp}}$ $M_r = \alpha_1 \beta_1 \Phi_c f_c \cdot b c \left(d - \frac{c \beta_1}{2} \right)$	$c = \frac{\rho_{frp}}{\rho_{frpb}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{frpu}} \right) d$ $\epsilon_c = \frac{d - c}{d} \epsilon_{frpu}$ dobranie c drogą iteracji, tak aby współczynniki $\alpha(c)$ i $\beta(c)$ wg tabeli z [2] spełniały warunek: $\beta(c) \alpha(c) = \frac{A_{frp} \Phi_{frp} f_{frpu}}{\Phi_c f_c \cdot b}$	$x_{eff} = \frac{A_f f_f}{k_1 \beta f_{cd} \cdot b}$ $M_r = k_1 x_{eff} f_{cd} \cdot b \left(d - \frac{x_{eff}}{2} \right)$	$x_{eff} = \frac{A_f f_f}{\eta \lambda f_{cd} \cdot b}$ $M_r = \eta x_{eff} f_{cd} \cdot b \left(d - \frac{x_{eff}}{2} \right)$
$\rho_{fb} > \rho_f$	$c = \frac{A_f f_u}{0,85 \beta_1 f_c \cdot b}$	-	-	$\epsilon_c = \frac{\epsilon_{fud}}{k_1 \beta \frac{f_{ud}}{f_{ud}} \cdot \rho_w \cdot \rho_f - 1}$ $x = \frac{\epsilon_c d}{\epsilon_c + \epsilon_{fud}}$	$\epsilon_c = \frac{\epsilon_{fd}}{\eta \lambda \frac{f_{fd}}{f_{fd}} \cdot \rho_f - 1}$ $x = \frac{\epsilon_c d}{\epsilon_c + \epsilon_{fd}}$
Zerwanie prętów FRP	$M_n = A_f f_u \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$	-	$M_r = \Phi_{frp} A_{frp} f_{frpu} \left(d - \frac{\beta(c)c}{2} \right)$	$M_r = k_1 \beta x_{fd} \cdot b \left(d - \frac{\beta x}{2} \right)$	$M_r = \eta \lambda x_{fd} \cdot b \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right)$
Nosność elementu zginanego	$\Phi = \begin{cases} 0,55 \text{ dla } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ dla } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 \text{ dla } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases}$ $\Phi M_n \geq M_u$	$\Phi = \begin{cases} 1,5 \text{ dla } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 1,0 \text{ dla } \rho_f > \rho_{fb} \end{cases}$	$\Phi = \begin{cases} 1,5 \text{ dla } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 1,0 \text{ dla } \rho_f > \rho_{fb} \end{cases}$	$Y_b = \begin{cases} 1,30 \text{ dla zniszczenia betonu} \\ 1,15 + 1,30 \text{ dla zerwania prętów FRP} \end{cases}$	-
Współczynnik redukcyjny nosności	$M_n \geq M_u$	$M_r \geq M_f$	$M_r \geq \Phi M_f$	$M_n \geq Y_b M_d$	$M_{rd} \geq M_{Sd}$
Warunek nosności elementu na zginanie	$A_{f,min} = \min \left\{ \frac{330 bd}{f_u}, \frac{49 \sqrt{E_c} bd}{f_u} \right\}$ U.S. units	$A_{frp,min} \leftarrow M_r \geq 1,5 M_{cr}$	$A_{frp,min} \leftarrow M_r \geq 1,5 M_{cr}$	$A_{f,min} = \min \left\{ \frac{0,002 bd}{f_{fuk}}, \frac{0,35 f_{fk}}{f_{fuk}} \right\}$	$A_{f,min} \leftarrow M_{rd} \geq 1,5 M_{cr}$
Zbrojenie minimalne	$C_F -$ współczynnik redukcji, zależny od typu włókien oraz środowiska;	$\alpha_1 -$ współczynnik średnich naprężeń w betonie przy prostokątnym wykreśle naprężeń; $\beta(c) \alpha(c) -$ współczynniki do określania zasięgu strefy ścisłkanej oraz średnich naprężeń w betonie przy uproszczonym wykreśle naprężeń; $\Phi_c -$ współczynnik materiałowy odporności dla betonu; $\Phi_{frp} -$ współczynnik materiałowy odporności dla FRP;	$\epsilon_1 -$ współczynnik średnich naprężeń w betonie przy prostokątnym wykreśle naprężeń; $\beta(c) \alpha(c) -$ współczynniki do określania zasięgu strefy ścisłkanej oraz średnich naprężeń w betonie przy uproszczonym wykreśle naprężeń; $\Phi_c -$ współczynnik materiałowy odporności dla betonu; $\Phi_{frp} -$ współczynnik materiałowy odporności dla FRP;	$Y_{mf} -$ częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla prętów FRP	$\eta_a -$ środowiskowy współczynnik redukcji, zależny od typu włókien oraz środowiska; $Y_f -$ częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla prętów FRP
Opis oznaczeń wspólnych	$f_{fu}, f_{frpu}, f_{fuk}, f_{fk} -$ charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie pręta FRP [MPa]; $f_{fu}, f_{fud}, f_{fd} -$ obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie pręta FRP [MPa]; $A_{frp}, A_f -$ powierzchnia zbrojenia FRP [mm ²]; $b -$ szerokość prostokątnego przekroju belki [mm]; $d -$ wysokość użyteczna [mm]; $\rho_{frpb} -$ graniczny stopień zbrojenia FRP [MPa]; $f_c -$ wytrzymałość betonu na ścisłkanie [MPa]; $f_{cd} ; f_{cd} -$ obliczeniowa wytrzymałość betonu na ścisłkanie [MPa]; $f_{frp} -$ naprężenia w zbrojeniu FRP [MPa]; $E_f -$ moduł sprężystości prętów FRP [MPa]; $\epsilon_c -$ odkształcenia w betonie; $\epsilon_{cu} -$ odkształcenia graniczne w betonie; $\epsilon_{frpu} ; \epsilon_{fud} ; \epsilon_{fd} -$ odkształcenia graniczne w zbrojeniu FRP przy zerwaniu; $M_r ; M_u ; M_d ; M_{rd} -$ nośności na zginanie; $M_f ; M_u ; M_d ; M_{rd} -$ moment zginający [Nmm]; $\Phi ; Y_b -$ współczynnik uwzględniający redukcję nośności na zginanie; $c ; x -$ zasięg strefy ścisłkanej [mm]; $x_{min} -$ graniczny zasięg strefy ścisłkanej [mm]; $\beta ; \beta_1 -$ współczynniki do określania zasięgu strefy ścisłkanej, zależny od wytrzymałości betonu; $\alpha_1 ; k_1 ; \eta -$ współczynnik do określania naprężeń w betonie; $A_{f,min} ; A_{frp,min} -$ minimalna powierzchnia zbrojenia FRP [mm ²]; $M_{cr} -$ moment tysiacy [Nmm];				



Rys. 2.
Wykres „Section Efficiency”
wyznaczony wg [N3]

w przypadku [N3]). Opisana forma wykresu przedstawia tendencję nawiązującą do „Section Efficiency” czyli zdolności przekroju do osiągnięcia większych nośności obliczeniowych w funkcji stopnia zbrojenia podłużnego odniesionego do zbalansowanego stopnia zbrojenia. W obrębie każdego zalecenia sporządzono wykres „Section Efficiency” dla belki o przekroju prostokątnym różnicząc klasą betonu, typem włókien oraz stosunkiem wysokości użytecznej do szerokości elementu. Do analizy przyjęto pręty GFRP, CFRP oraz AFRP o wytrzymałości na rozciąganie odpowiednio 650 MPa, 2000 MPa, 1200 MPa oraz module Younga odpowiednio 45 GPa, 150 GPa, 80 GPa. Założono rozłożenie prętów zbrojeniowych w jednej warstwie oraz przyjęto stałą wysokość użyteczną d w obrębie jednakowych wymiarów elementu. W wyniku dużej wytrzymałości na rozciąganie prętów FRP oraz preferowanym mechanizmem, jakim jest zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej, naukowcy podejmują badania nad możliwością zastosowania betonu wyższych wytrzymałości. Bariere w tym rozwiązaniu stanowią stany graniczne użyteczności (kontrola ugięcia, kontrola zarysowania oraz kontrola odkształceń w prętach), które niejednokrotnie są decydującym czynnikiem w analizie zginanego elementu betonowego zbrojonego prętami FRP. Do analizy przyjęto beton o charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie równej 20 MPa i 40 MPa. Wykresy zostały utworzone na podstawie niezależnej zmiennej w postaci stosunku ρ_f/ρ_b celem porównania obliczeń nośności elementu na zginanie w zależności od mechanizmu zniszczenia.

3.1. Amerykański zbiór zaleceń projektowych ACI 440.1R-06, 2006

Zalecenie [N3] wprowadza współczynniki zarówno materiałowe C_e (zależne od rodzaju włókna i ekspozycji elementu na działanie wody oraz gruntu) jak również współczynniki zależne od stopnia zbrojenia (mechanizmów zniszczenia) Φ . Współczynnik zależny od stopnia zbrojenia

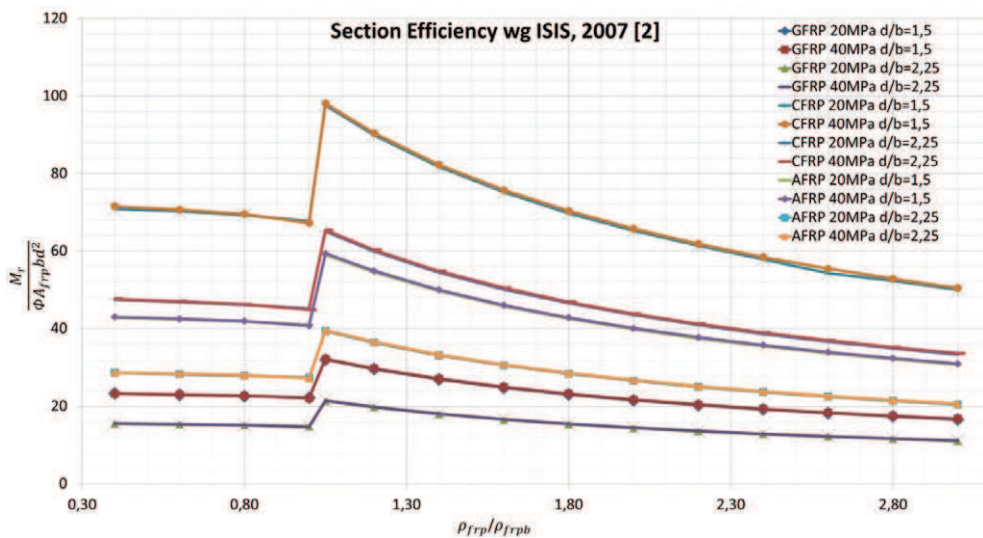
przyjmuje wartość najmniejszą równą 0,55 dla zerwania prętów FRP, 0,65 dla zmiążdżenia betonu w strefie ściskanej (gdy $\rho_f/\rho_b \geq 1,4$) oraz liniową pomiędzy 0,55 i 0,65 dla $1,0 < \rho_f/\rho_b < 1,4$. Tendencja przedstawiona na wykresie charakteryzuje się brakiem znaczącego uskoku dla $\rho_f/\rho_b = 1,0$; spowodowane jest to gładkim przejściem zapewnionym przez liniowo zmieniający się współczynnik redukcyjny Φ . Po przekroczeniu $\rho_f/\rho_b = 1,4$ współczynnik ten jest stały co przedstawia charakterystyczny uskok na wykresie dla każdego rodzaju włókna. Z rysunku 2 wynika, że nośność momentowa elementu rośnie prawie liniowo do osiągnięcia $\rho_f/\rho_b = 1,4$, natomiast w przypadku mechanizmu zniszczenia w postaci zmiążdżenia betonu wzrost momentu przy zwiększaniu stopnia zbrojenia jest nieznaczny. Z wykresu wynika również, iż stosowanie większych stopni zbrojenia nie jest proporcjonalne do wzrostu nośności elementu. Najmniejsze względne różnice zaobserwowano w przypadku zbrojenia CFRP po przekroczeniu $\rho_f/\rho_b = 1,4$, największe natomiast w przypadku GFRP, a pośrednie dla AFRP. Wzrost stosunku d/b skutkował oczywistym wzrostem nośności, natomiast po przekroczeniu $\rho_f/\rho_b = 1,4$ obserwuje się rosnącą niewspółmierność względem przyrostu nośności a dodaną powierzchnią zbrojenia. Z rysunku 2 wynika, że wzrost klasy betonu nie zmienia stopnia efektywności przekroju, a jedynie „przesunie” wykres funkcji

$$\frac{\Phi M_n}{A_s b d^2} (\rho_f)$$

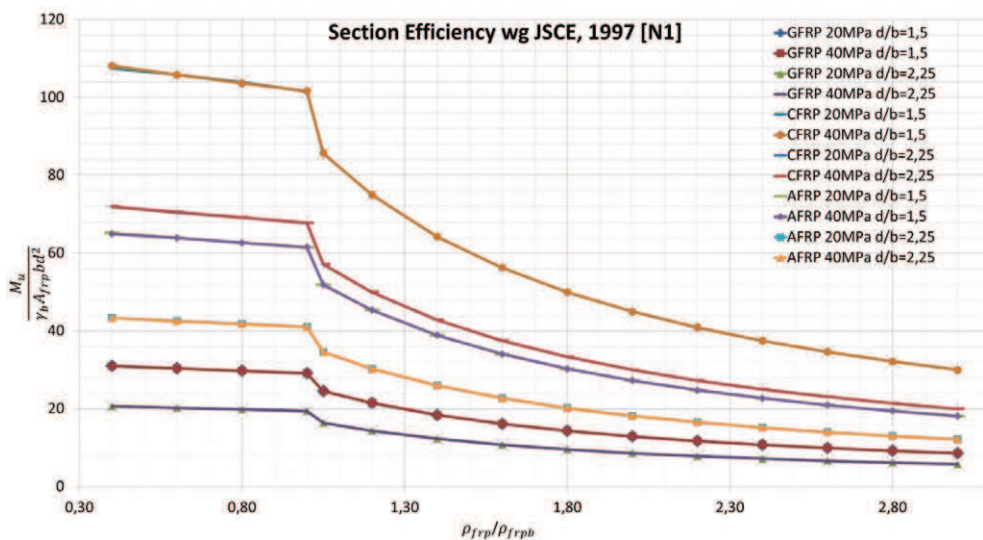
w prawo, powodując wzrost nośności dla określonego ρ_f .

3.2. Kanadyjska instrukcja ISIS (2007)

Zalecenie [2] w przeciwieństwie do [N2] dopuszcza mechanizm zniszczenia w postaci zerwania rozciąganych prętów polimerowych. Przy tego typu metodzie zniszczenia zalecane jest wg [2] stosowanie współczynnika $\Phi = 1,5$. Ponadto zarówno [N2] jak i [2] wprowadza



Rys. 3.
Wykres „Section Efficiency”
wyznaczony wg [2]



Rys. 4.
Wykres „Section Efficiency”
wyznaczony wg [N1]

zalecane współczynniki materiałowe dla betonu (dla elementu prefabrykowanego $\Phi_c = 0,65$; dla elementu monolitycznego $\Phi_c = 0,65$) i prętów FRP (dla wszystkich rodzajów prętów $\Phi_f = 0,75$). Na rysunku 3 wyraźnie widać charakterystyczny uskok po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia ρ_{frpb} , wynika on ze stosowania współczynnika Φ redukującego nośność przy zerwaniu prętów FRP. Z rysunku 3 wynika, że nośność momentowa elementu rośnie prawie liniowo do osiągnięcia $\rho_{frp}/\rho_{frpb} = 1,0$, po czym następuje skok nośności. W przypadku mechanizmu zniszczenia w postaci zmiążdżenia betonu wzrost momentu przy zwiększaniu stopnia zbrojenia jest nieznaczny. Z wykresu wynika również, iż podobnie jak [N3] stosowanie większych stopni zbrojenia nie jest proporcjonalne do wzrostu nośności elementu. Najmniejsze względne różnice zaobserwowano w przypadku zbrojenia CFRP po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia, największe natomiast w przypadku GFRP, a pośrednie dla AFRP. Wzrost stosunku d/b skutkował oczywistym wzrostem nośności, natomiast po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia obserwuje się

rosnącą niewspółmierność względem przyrostu nośności a dodaną powierzchnią zbrojenia (podobnie jak miało to miejsce dla [N3]). Z rysunku 3 wynika, że wzrost klasy betonu nie zmienia stopnia efektywności przekroju, a jedynie „przesunie” wykres funkcji

$$\frac{M_r}{\Phi A_{frp} b d^2} (\rho_{frp})$$

w prawo, powodując wzrost nośności dla określonego ρ_{frp} .

3.3. Japoński zbiór zaleceń projektowych JSCE, 1997
Wytyczne [N1] zalecają stosowanie współczynników redukcyjnych zależnych od mechanizmu zniszczenia. W przeciwieństwie do pozostałych zaleceń [N1] dopuszcza stosowanie mniejszego współczynnika przy kontrolowaniu zerwania rozciąganych prętów FRP ($\gamma_b = 1,15 \div 1,30$) niż w przypadku zmiążdżenia betonu w strefie ściskanej ($\gamma_b = 1,30$). [N1] wprowadza zalecane współczynniki materiałowe dla betonu ($\gamma_c = 1,30$ dla betonu o charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie

nie większej niż 50 N/mm²) i prętów FRP (dla prętów GFRP $\gamma_{mf} = 1,30$, dla prętów AFRP i CFRP $\gamma_{mf} = 1,15$). Na rysunku 4 wyraźnie widać charakterystyczny uskok po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia wynika on ze stosowania współczynnika $\gamma_b = 1,30$ redukującego nośność przy zmiążdżeniu betonu w strefie ściskanej. Z rysunku 4 wynika, że nośność momentowa elementu rośnie prawie liniowo do osiągnięcia granicznego stopnia zbrojenia, po czym następuje skokowa redukcja nośności. W przypadku mechanizmu zniszczenia w postaci zmiążdżenia betonu wzrost momentu przy zwiększaniu stopnia zbrojenia jest nieznaczny. Z wykresu wynika również, iż stosowanie większych stopni zbrojenia nie jest proporcjonalne do wzrostu nośności elementu. Najmniejsze względne różnice zaobserwowano w przypadku zbrojenia CFRP po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia, największe natomiast w przypadku GFRP, a pośrednie dla AFRP. Wzrost stosunku d/b skutkował oczywistym wzrostem nośności, natomiast po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia obserwuje się rosnącą niewspółmierność względem przyrostu nośności a dodaną powierzchnią zbrojenia (podobnie jak miało to miejsce dla pozostałych zaleceń). Z rysunku 4 wynika, że wzrost klasy betonu nie zmieni stopnia efektywności przekroju, a jedynie „przesunie” wykres funkcji

$$\frac{M_u}{\gamma_b A_{frp} b d^2} (p_{frp})$$

w prawo, powodując wzrost nośności dla określonego p_{frp} .

3.4. Włoski zbiór zaleceń projektowych CNR-DT 203/2006

Wytyczne [N4] w przeciwieństwie do pozostałych zaleceń nie precyzują współczynników redukcyjnych zależnych od mechanizmu zniszczenia. [N4] wprowadza zalecane współczynniki materiałowe dla betonu ($\gamma_m = 1,50$) i prętów FRP zależne od rodzaju włókna

i ekspozycji elementu na środowisko zewnętrzne (dla prętów GFRP,

$$0,9 \cdot \frac{\eta}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{0,7}{1,5} \div 0,9 \cdot \frac{0,8}{1,5} = 0,42 \div 0,48$$

dla prętów AFRP,

$$0,9 \cdot \frac{\eta}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{0,8}{1,5} \div 0,9 \cdot \frac{0,9}{1,5} = 0,48 \div 0,54$$

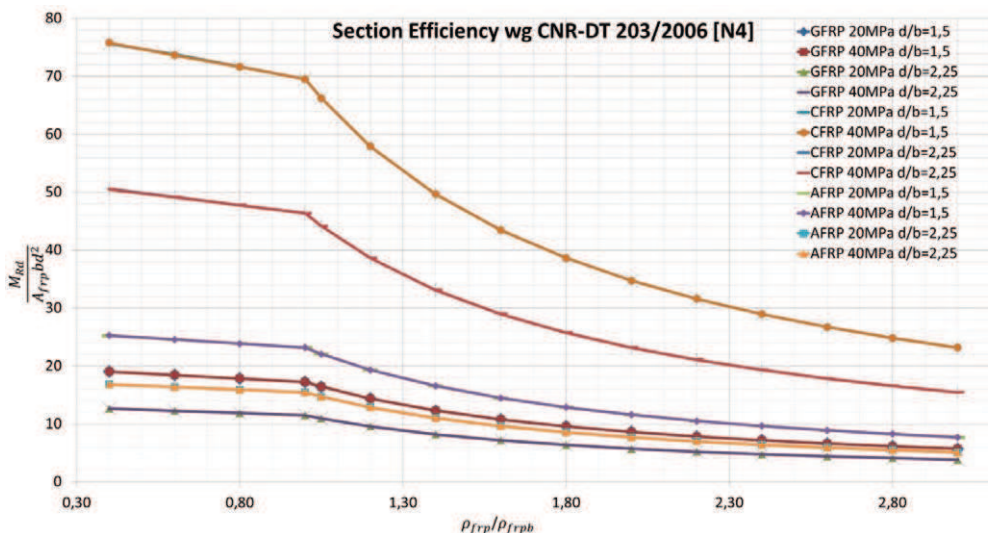
dla prętów CFRP;

$$0,9 \cdot \frac{\eta}{\gamma_m} = 0,9 \cdot \frac{0,9}{1,5} \div 0,9 \cdot \frac{1,0}{1,5} = 0,54 \div 0,60$$

mniej wartości odnoszą się do elementów narażonych na działanie środowiska). Z rysunku 5 wynika, że nośność momentowa elementu rośnie prawie liniowo do osiągnięcia granicznego stopnia zbrojenia. W przypadku mechanizmu zniszczenia w postaci zmiążdżenia betonu wzrost momentu przy zwiększaniu stopnia zbrojenia jest nieznaczny. Z wykresu wynika również, iż stosowanie większych stopni zbrojenia nie jest proporcjonalne do wzrostu nośności elementu. Najmniejsze względne różnice zaobserwowano w przypadku zbrojenia CFRP po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia, największe natomiast w przypadku GFRP, a pośrednie dla AFRP. Wzrost stosunku d/b skutkował oczywistym wzrostem nośności, natomiast po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia obserwuje się rosnącą niewspółmierność względem przyrostu nośności a dodaną powierzchnią zbrojenia (podobnie jak miało to miejsce dla pozostałych zaleceń). Z rysunku 5 wynika, że wzrost klasy betonu nie zmieni stopnia efektywności przekroju, a jedynie „przesunie” wykres funkcji

$$\frac{M_{Rd}}{A_{frp} b d^2} (p_{frp})$$

w prawo, powodując wzrost nośności dla określonego p_{frp} .



Rys. 5.
Wykres „Section Efficiency”
wyznaczony wg [N4]

4. Podsumowanie

Rysunki 2–5 przedstawiają nośność momentową prostokątnego elementu zbrojonego na zginanie prętami FRP w zależności od wspomnianych zmiennych. Spadek funkcji „Section Efficiency” oznacza niewspółmierny przyrost nośności momentu do dodanej powierzchni zbrojenia. Stosowanie betonu wyższych wytrzymałości nie jest zalecane w przypadku prętów GFRP w szczególności, gdy pożądanym mechanizmem zniszczenia jest zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej. Wytrzymałość tych prętów na rozciąganie nie jest wystarczająco duża, aby można było wykorzystać kontrolę strefy ściskanej. W przypadku prętów AFRP i CFRP wytrzymałość na rozciąganie jest na tyle duża, aby wykorzystać beton wyższej klasy i kontrolować strefę ściskaną elementu, stosując pręty ułożone w jednej warstwie (tylko takiego przypadku dotyczy m.in. [N3]). Wszystkie wytyczne definiują współczynniki materiałowe dla betonu i prętów FRP. Zalecenie [N4] nie podaje współczynników redukcyjnych zależnych od mechanizmów zniszczenia, za to charakteryzuje się największymi redukcjami charakterystycznych parametrów wytrzymałościowych prętów i betonu. Wszystkie zalecenia charakteryzują się tym, że stosowanie większych stopni zbrojenia nie jest proporcjonalne do wzrostu nośności elementu. Wzrost stosunku d/b skutkował oczywistym wzrostem nośności, natomiast po przekroczeniu granicznego stopnia zbrojenia (dla [N3] po przekroczeniu $\rho_f/\rho_b = 1,4$) obserwuje się rosnącą niewspółmierność względem przyrostu nośności a dodaną powierzchnią zbrojenia. Porównując uzyskane momenty dla jednakowych stopni zbrojenia, obserwuje się, że przy kontrolowaniu betonu w strefie

ściskanej najmniej zachowawczym podejściem charakteryzuje się zalecenie [N1], a najbardziej konserwatywnym zalecenie [N3]. Przy mechanizmie zniszczenia w postaci zerwania rozciąganych prętów FRP najmniejsze zapasy nośności proponuje [N2]; [2]; [N4], a największe [N3]. Nośności betonowych elementów zbrojonych prętami polimerowymi ściśle zależą od metody określania rozkładu naprężeń ściskających w betonie (co ma wpływ na graniczny stopień zbrojenia).

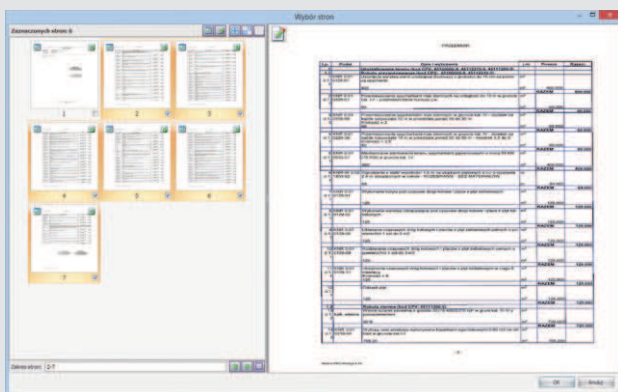
BIBLIOGRAFIA

- [1] ISIS (2001), „Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers”, Design Manual No. 3, Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, 158 p
 [2] ISIS (2007), „Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers”, Design Manual No. 3, Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, 151 p
 [3] Theriault, M., i Benmokrane, B., Effects of FRP Reinforcement Ratio and Concrete Strength on Flexural Behavior of Concrete Beams. Journal of Composites for Construction. 1998, vol. 2, No. 1, s. 7-16

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [N1] JSCE (1997), „Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials”, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 325 p
 [N2] CSA-S806-02 (2002), „Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers”, Canadian Standards Association, Ontario, 177 p
 [N3] ACI 440.1R-06 (2006), „Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars”, ACI Committee 440, American Concrete Institute (ACI)
 [N4] CNR-DT 203/2006. „Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars” National Research Council, Rome, Italy, 2006
 [N5] CAN/CSA (2006), „Canadian Highway Bridge Design Code”, Canadian Standards Association, Ontario, 733 p

Import zeskanowanych wydruków przedmiarów i kosztorysów zapisanych w formacie PDF



Możliwość importu danych z plików PDF pojawiła się w programach Norma już na początku 2011 r. Przez cztery lata udało nam się stworzyć moduł wczytujący nie tylko przedmiary, ale również kosztorysy

wygenerowane przez najpopularniejsze programy dostępne na rynku.

Importer miał jedno zasadnicze ograniczenie – nie działał w przypadku plików PDF zapisanych w formie skanów, czyli obrazów. W najnowszej Normie PRO 4.49 i Normie EXPERT 5.6.100 importer plików PDF został rozbudowany o możliwość obsługi zeskanowanych wydruków papierowych.

W przypadku dobrej jakości plików program automatycznie rozpozna ich zawartość, co umożliwi prawidłowy import bez konieczności korygowania domyślnych ustawień.

Wbudowany w importer „Menedżer skanów” posiada szereg dodatkowych opcji, które pozwalają m.in. odwzorować prawidłową siatkę tabeli oraz poprawić błędne lub niekompletne opisy co jest szczególnie przydatne w przypadku skanów gorszej jakości.