

Praca wzmocnionego przekroju żelbetowego

Dr inż. Jacek Korentz, Uniwersytet Zielonogórski

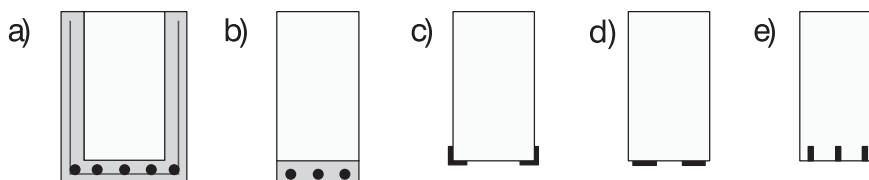
1. Wprowadzenie

Wzmocnienia konstrukcji wykonywane są często podczas remontów, modernizacji czy też renowacji obiektów budowlanych. Ich celem jest przywrócenie konstrukcji pierwotnej nośności lub zwiększenie jej nośności. Do wzmocnienia konstrukcji betonowych stosowane są bardzo różne technologie i materiały naprawcze [5]. O skuteczności wzmocnienia decyduje tzw. „inżynieria napraw” [1], natomiast na jej efektywność, tj. uzyskanie zwiększonej nośności i odpowiedniej odkształcalności mają wpływ między innymi zastosowane techniki wzmocnienia oraz cechy fizyczne i mechaniczne zastosowanych materiałów naprawczych [3, 4].

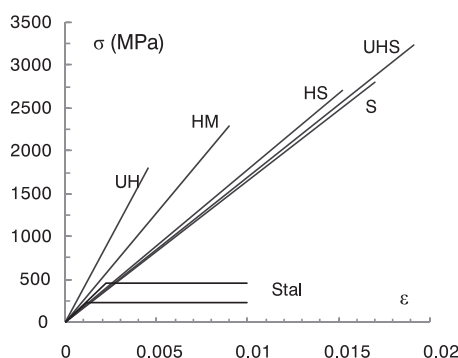
W artykule przedstawione zostały wyniki analiz numerycznych pracy przekroju żelbetowego wzmocnianego różnymi technikami naprawczymi z zastosowaniem materiałów naprawczych o bardzo różnych właściwościach mechanicznych. Zaprezentowano również wybrane techniki wzmocnień przekrojów żelbetowych oraz podstawowe właściwości mechaniczne najczęściej stosowanych materiałów naprawczych.

2. Techniki wzmocnień i materiały naprawcze

Wzmocnienie żelbetowych elementów konstrukcyjnych można przeprowadzić zmieniając ich schemat statyczny albo zwiększając przekrój poprzeczny lub najczęściej wzmocniając strefę rozciąganą [5]. Obecnie wzmocnienia przy wykorzystaniu różnych technik i materiałów stosuje się nie tylko w słupach, belkach i płytach, ale także w tarczach [7], a nawet w płytach w strefie przebicia [8].



Rys. 1. Sposoby wzmocnienia belek żelbetowych (opis w tekście)



Neoxe	HS	HM	UHS
E (GPa)	178	256	169
f (MPa)	2700	2300	2340

Sika	XS	S	UH
E (GPa)	165	165	400
f (MPa)	2200	2800	1800

Rys. 2. Właściwości mechaniczne kompozytów i stali

Na rysunku 1 przedstawiono kilka możliwych sposobów wzmocnienia belek żelbetowych o przekroju prostokątnym w strefie działania maksymalnego momentu zginającego. Zwiększenie nośności można uzyskać przez zwiększenie przekroju i jednocześnie dobrojenie strefy rozciąganej (rys. 1a, b) lub wzmocnienie strefy rozciąganej kształtownikami stalowymi (rys. 1c), wzmocnienie strefy rozciąganej doklejonymi taśmami stalowymi lub taśmami FRP (rys. 1d), wzmocnienie strefy rozciąganej wklejonymi taśmami stalowymi lub taśmami FRP (rys. 1e).

We wszystkich wymienionych przypadkach, do wzmocnienia można zastosować bardzo różne materiały. Na rysunku 2 zamieszczono wykresy zależności naprężenie-odkształcenie na podstawie danych producentów dla najczęściej stosowanych kompozytów oraz stali.

Wybór materiałów wzmocniających zależy od wielu czynników i wyma-

ga przeprowadzenia analizy stanu odkształceń, stanu naprężeń oraz stanu deformacji wzmocnianych elementów dla istniejącego stanu wyętnienia i w zakresie nowo projektowanych obciążeń.

3. Praca przekroju żelbetowego i przekroju wzmocnionego

W projektowaniu wzmocnień poza sprawdzeniem nośności wzmocnianego elementu konieczne jest również sprawdzenie stanów granicznych użytkowości, w szczególności strzałki ugięcia. W celu dokładnej oceny ugięć, Eurokod 2 [6] zaleca obliczanie krzywizn w przekrojach gęsto rozmieszczonych wzdłuż elementu, a następnie obliczanie ugięcia przez całkowanie numeryczne.

Nadmienić należy, że konstrukcja przed wzmocnieniem jest już trwale zdeformowana i istniejące już ugię-

cie od obciążeń długotrwałych może znacznie wzrosnąć po wzmocnieniu od działania nowych obciążeń. Ten wzrost ugięcia zależy od zastosowanych technik wzmocnienia i właściwości materiałów naprawczych [3]. Na rysunku 3 przedstawiono idealizowane zależności moment-krzywizna dla przekroju żelbetowego bez pełzania betonu (ścieżka równowagi $OA_0B_0C_0$) i z uwzględnieniem pełzania betonu (OAB_1) oraz dla przekroju żelbetowego wzmocnionego taśmami FRP ($OA_LB_LC_L$) i przekroju wzmocnianego taśmami FRP po upływie czasu t ($OA_A B_A C_A$). Na rysunku tym punkty A ze wszystkimi indeksami oznaczają chwilę zarysowania przekroju, natomiast punkty B odpowiadają chwili uplastycznienia prętów zbrojenia podłużnego, punkt C to chwila, w której w betonie strefy ściskanej są osiągnięte odkształcenia graniczne, a punkt C_L odpowiada

chwili osiągnięcia odkształceń granicznych w taśmach wzmocniających. Oznacza to, że w zakresie obciążeń eksploatacyjnych w przekroju wzmocnionym może dojść do uplastycznienia istniejącego zbrojenia podłużnego belki. Ponadto, sztywność przekroju wzmocnianego w zakresie odkształceń eksploatacyjnych może zmieniać się w istotny sposób, co może nieco skomplikować obliczanie ugięcia wzmocnionej belki.

Zastosowanie materiałów naprawczych o różnych właściwościach mechanicznych powoduje, iż elementy wzmocniane będą zachowywać się w różny sposób pod wpływem zwiększonych obciążeń [4]. Analizie poddano belkę o przekroju prostokątnym pojedynczo zbrojonym, która została wzmocniona różnymi technikami przy zastosowaniu różnych materiałów (rys. 4) [3]. Wymiary po-

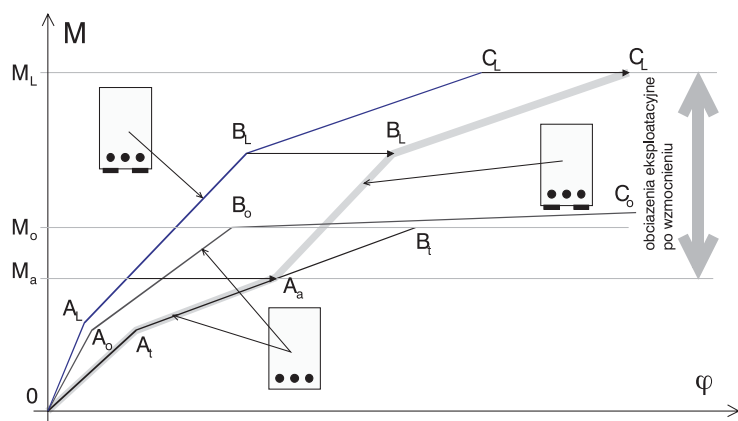
przezne wzmocnionej belki wynoszą 30 cm x 50 cm, wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{co}=30$ MPa, zbrojenie wykonane jest ze stali o granicy plastyczności $f_{sy}=400$ MPa. Sposób zbrojenia wzmocnionej belki ilustruje rysunek 4a. Rozpatrywane są trzy techniki wzmocnienia: wzmocnienie dodatkowym zbrojeniem prętami i betonem natryskowym (rys. 4b), wzmocnienie taśmami FRP nisko modułowymi i wysoko modułowymi (rys. 4c) i wzmocnienie taśmami stalowymi (rys. 4d).

Nośność przekroju przed wzmocnieniem wynosi $M_u=265$ kNm. Zakłada się, że zwiększenie obciążeń wymaga zwiększenia nośności o około 40%, to jest do $M=370$ kNm. Ponadto zakłada się, że belka przed wzmocnieniem będzie odciążona do poziomu 50% dotychczasowych obciążeń całkowitych, zatem początkowy moment zginający można oszacować na $M_0=132$ kNm. W obliczeniach belki przed wzmocnieniem uwzględniono wpływ pełzania betonu przyjmując współczynnik pełzania $\Phi_p=2$.

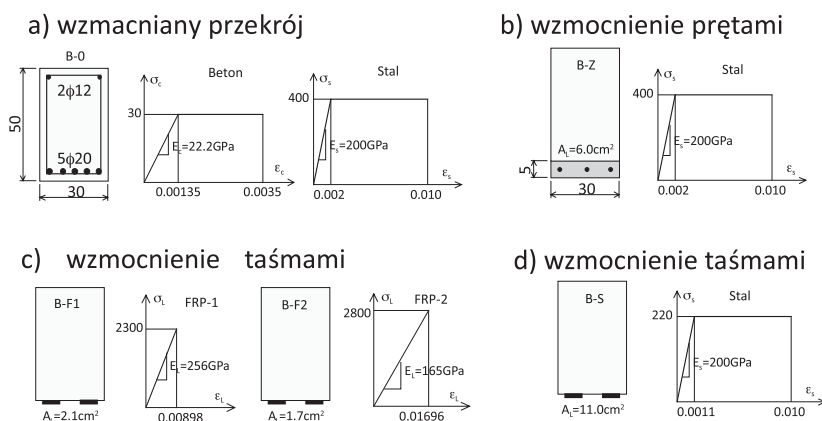
W przypadku wzmocnienia strefy rozciąganej prętami zbrojeniowymi i betonem natryskowym, potrzebne obliczeniowe pole powierzchni zbrojenia wzmocniającego A_L określone w sposób podany w punkcie 3 wynosi 5,7 cm². Do dalszych obliczeń i analiz przyjęto wzmocnienia trzema prętami $\Phi=16$ mm o polu powierzchni $A_s=6,0$ cm². W analogiczny sposób obliczono potrzebne pole powierzchni zbrojenia wzmocniającego A_L dla pozostałych technik wzmocnienia, przy czym w przypadku wzmocnień kompozytami założono 50% wykorzystanie ich wytrzymałości.

Oceny zachowania przekrojów dla poszczególnych sposobów wzmocnienia dokonano na podstawie analiz numerycznych wykonanych programem XTRACT. W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano między innymi zależności moment-krzywizna ($M-\phi$).

Na rysunku 5 przedstawiono uzyskane zależności moment-krzywizna dla analizowanego przekroju przed



Rys. 3. Zależności moment-krzywizna dla przekroju: żelbetowego, wzmocnionego i wzmocnianego

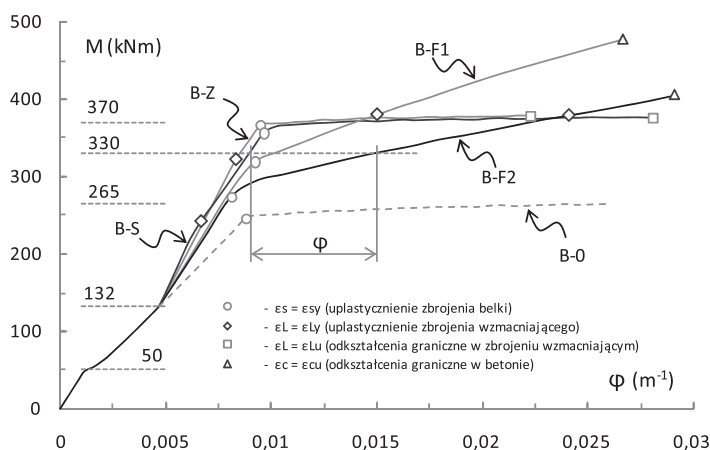


Rys. 4. Wzmocniany przekrój, techniki wzmocnienia, zastosowane materiały

wzmocnieniem i po wzmocnieniu wymienionymi wcześniej technikami. Na rysunku tym naniesione są punkty odpowiadające chwili, w której nastąpiło uplastycznienie zbrojenia belki ϵ_{sy} , uplastycznienie zbrojenia wzmacniającego ϵ_{Ly} (dla zbrojenia taśmami FRP przyjęto 50% ϵ_{Lu}) oraz punkty odpowiadające chwili gdy zbrojenie wzmacniające osiąga odkształcenia graniczne ϵ_{Lu} , i chwili, gdy beton strefy ściskanej osiąga odkształcenie graniczne ϵ_{cu} . Jak można zauważyć, praca przekroju żelbetowego po wzmocnieniu w istotny sposób zależy od zastosowanych technik wzmocnienia i właściwości mechanicznych materiałów naprawczych. Przekroje wzmocnione prętami B-Z i taśmami stalowymi B-S zachowują się bardzo podobnie niezależnie od granicy plastyczności prętów i taśm, ale odmiennie niż przekroje wzmocnione taśmami z kompozytów B-F1, B-F2, których zachowanie zależy bardzo mocno od modułu sprężystości taśm.

Stan graniczny w przekrojach wzmocnionych stałą osiągnięty jest w wyniku przekroczenia odkształceń granicznych w zbrojeniu wzmacniającym, a w przypadku wzmocnienia kompozytami stan graniczny jest osiągnięty w wyniku przekroczenia odkształceń granicznych w betonie strefy ściskanej. Przekroje wzmocnione taśmami z kompozytów osiągają projektowaną nośność dla znacznie większych krzywizn niż przekroje wzmocnione stałą zwykłą, ale przekroje wzmocnione taśmami z kompozytów mają jeszcze rezerwę nośności, co oznacza, że przekroczenie nowych dopuszczalnych obciążeń nie spowoduje wyczerpania nośności.

Analizując wykresy na rysunku 5 można zauważyć, że w zakresie obciążeń eksploatacyjnych, np. dla $M=330$ kNm, w elementach wzmocnionych kompozytami (przekrój B-F2) należy spodziewać się większych ugięć niż w elementach wzmocnionych stałą zwykłą, ponieważ dla tej wartości momentu występują duże różnice w krzywiznach ($\Delta\phi$ na rysunku 5). W przypadku



Rys. 5. Wpływy technik wzmocnienia na zależność moment-krzywizna

wzmocnienia belki swobodnie podpartej o rozpiętości 6,0 m, równomiernie obciążonej, ugięcie belki B-F2 będzie o około 1 cm większe niż ugięcie belek wzmocnionych innymi podanymi sposobami, które można oszacować na około 3,0 cm. Niedogodność tę można wyeliminować zwiększając pole powierzchni taśm wzmacniających lub stosując taśmy wstępnie naprężone. Przykład ten pokazuje, że ugięcie wzmocnianych belek w istotny sposób zależy od technik wzmocnienia i właściwości mechanicznych materiałów naprawczych. Z tego względu projektując wzmocnienia taśmami z kompozytów należy też zwrócić dużą uwagę na ugięcia.

4. Podsumowanie

Przedstawione przykłady, jak również wyniki badań doświadczalnych wskazują na bardzo duży wpływ właściwości mechanicznych materiałów naprawczych na pracę wzmocnianych belek żelbetowych. Dlatego projektując wzmocnienia belek żelbetowych należy wykonać dokładną analizę stanu odkształceń i stanu naprężeń w przekrojach krytycznych przed wzmocnieniem, aby określić jaką rezerwę nośności ma wzmocniany element konstrukcyjny, i na tej podstawie można dokonać oceny możliwości wzmocnienia, a następnie dokonać wyboru odpowiednich technik wzmocnie-

nia i materiałów naprawczych. Taką samą analizę należy wykonać dla konstrukcji po wzmocnieniu, w której poza sprawdzeniem nośności należy sprawdzić stopień wyłączenia poszczególnych materiałów i deformację konstrukcji. Dlatego celowe jest opracowanie modelu zależności moment-krzywizna, który pozwoliłby na analizę odkształceń wzmocnianych belek żelbetowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki M., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków, 2002
- [2] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Technical Report, Fib Bulletin, No 14, Lausanne, 2001
- [3] Korentz J., Efektywność technik wzmacniania belek żelbetowych, Renowacja budynków i obszarów zabudowanych, t.5, 2009, 301–308
- [4] Kotynia R., Kamińska M. E., Odkształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie materiałami kompozytowymi CFRP, Zeszyt 13, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2003
- [5] Masłowski E., Spiżewska D., Wzmocnianie konstrukcji budowlanych, Arkady, Warszawa, 2000
- [6] PN-EN 1992-1-1, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [7] Wraniak J., Korentz J., Pawłowski M., Wzmocnianie tarcz żelbetowych z otworami przez dodanie warstwy z włókien węglowych, Konstrukcje Zespólone t. VIII, 435-444
- [8] Urban T., Wzmocnianie monolitycznych węzłów płyta-słup materiałami CFRP, 51 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, Krynica 2005, t. III, 121–128