

Wit DERKOWSKI*
Politechnika Krakowska

WZMACNIANIE MATERIAŁAMI CFRP ZGINANYCH BELEK ŻELBETOWYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM ZMĘCZENIOWYM

Streszczenie. Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych poddanych obciążeniom zmęczeniowym przy użyciu materiałów kompozytowych na bazie włókien węglowych jest bardzo aktualnym, choć nie do końca rozpoznanym problemem. W referacie przedstawiono przegląd dotychczasowych badań prowadzonych w tej dziedzinie, modele obliczeniowe poszczególnych materiałów składowych poddanych obciążeniom powtarzalnym oraz wytyczne PN dotyczące obliczania wytrzymałości zmęczeniowej przekrojów normalnych.

STRENGTHENING OF FLEXURE RC BEAMS UNDER FATIGUE LOAD BY THE MEANS OF CFRP COMPOSITES

Summary. Strengthening of the RC structures with CFRP composites subjected to fatigue loading is a present problem, but it is not fully examined still. In the paper a review of researches which were done in this area so far, analytical models of component materials under cyclic load and Polish Code recommendations for calculating the fatigue strength of normal cross-section are presented.

1. Wprowadzenie

Coraz częściej wiele istniejących konstrukcji żelbetowych wymaga zwiększenia bądź przywrócenia im pierwotnej nośności. Do najczęstszych powodów wzmacniania konstrukcji budowlanych i inżynierskich należą: korozja zbrojenia zwykłego lub sprężającego, uszkodzenia mechaniczne konstrukcji nośnej, bądź też błędy projektowe, lub wykonawcze. Inna grupa przyczyn planowanego wzmacniania jest związana z chęcią zwiększenia planowanego obciążenia użytkowego (liczne przypadki zwiększania klasy obciążenia obiektów mostowych) lub zmianą układu statycznego konstrukcji.

* Opiekun naukowy: Prof. zw. dr hab. inż. Krzysztof Dyduch

Od połowy lat 60, w dziedzinie wzmocnień, poza stalowymi kształtownikami przykręcانymi do konstrukcji, zaczęto stosować płaskowniki stalowe przyklejane do powierzchni konstrukcji za pomocą specjalnych klejów produkowanych na bazie żywic epoksydowych. Metoda ta okazała się nieefektywna dla konstrukcji poddanych obciążeniom dynamicznym oraz konstrukcji narażonych na niekorzystne działanie warunków atmosferycznych. W szczególności, w konstrukcjach mostowych poddanych działaniu roztworu soli dochodziło do przyspieszonej korozji stali, co znacząco obniżało trwałość wzmocnienia. Stąd też narastała potrzeba szukania nowych rozwiązań efektywnego i trwałego wzmocnienia konstrukcji żelbetowych.

Materiały FRP (Fibre Reinforced Plastics) są wykorzystywane w inżynierii od końca lat 60. Przez wiele lat ich zastosowanie było ograniczone przede wszystkim do przemysłu zbrojeniowego, lotniczego i samochodowego. Następnie zaczęły być wykorzystywane do produkcji łodzi i urządzeń na potrzeby sportu, a także wyrobów, gdzie obok wysokiej wytrzymałości ochrona antykorozyjna była parametrem decydującym (np. zawory, rury).

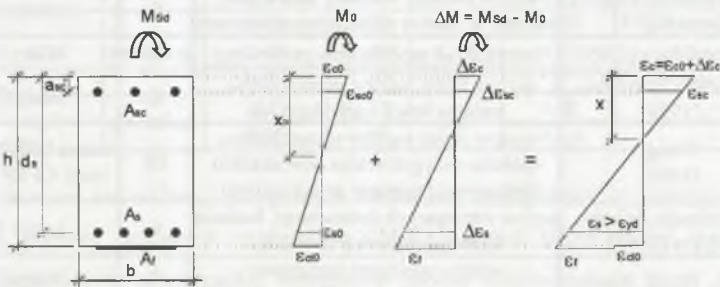
Początkowo materiały kompozytowe FRP miały nikłe zastosowanie w inżynierii lądowej ze względu na relatywnie wysoki koszt. Jednakże w ostatnim okresie coraz częściej są one stosowane do wzmocnień istniejących konstrukcji żelbetowych oraz do produkcji cięgien sprężających dla konstrukcji znajdujących się w środowiskach agresywnych korozyjnie. Istnieje pełna zgoda co do tego, iż skuteczne jest użycie materiałów kompozytowych do wzmocnienia zginanych konstrukcji zarówno obciążonych statycznie, jak i zmęczeniowo. Wzmocnienie strefy rozciąganej poprzez doklejenie materiałów kompozytowych niesie za sobą ryzyko niewykorzystania w pełni ich wytrzymałości - skuteczność zabiegu determinowana jest głównie własnościami wytrzymałościowymi materiałów konstrukcji wzmocnianej.

2. Wzmocnianie materiałami FRP zginanych belek żelbetowych

FRP są materiałami anizotropowymi. Włókna o bardzo małej średnicy (5 – 20 μm) są osadzone w matrycach, zwykle żywicznych. Używa się przede wszystkim żywic poliestrowych, epoksydowych lub winyloestru. Matryce rozkładają naprężenia na wszystkie włókna równomiernie, chronią przed uszkodzeniami mechanicznymi i niekorzystnym działaniem środowiska. Matryca praktycznie nie ma wpływu na wytrzymałość kompozytu na rozciąganie, natomiast odgrywa ważną rolę przy przenoszeniu sił ścinających.

Poszczególne wyroby z FRP wykonywane są zazwyczaj przy użyciu metody przeciągania włókien szklanych (E-glass), aramidowych (Aramid) lub węglowych (Carbon) połączonego z impregnowaniem polimerami przy odpowiednio dobranych parametrach ciśnienia i temperatury. Ponieważ włókna szklane posiadają słabą odporność na środowiska alkaliczne oraz niższą wytrzymałość zmęczeniową, a włókna aramidowe mają znacznie niższy moduł sprężystości niż włókna węglowe, to właśnie materiały CFRP (Carbon FRP) są zalecane do wzmacniania konstrukcji poddanych obciążeniom zmęczeniowym.

Wzmocnienie zazwyczaj wykonuje się poprzez doklejenie taśm CFRP na rozciąganej (zwykle dolnej), odpowiednio przygotowanej powierzchni belki. W przypadku gdy nie ma możliwości dostępu do powierzchni dolnej belki lub gdy jest ona bardzo nierówna, taśmy można doklejać na bocznych powierzchniach belki [1]. W obu tych przypadkach pełne wykorzystanie wytrzymałości taśmy możliwe jest tylko w przypadku wstępnego naciągu taśm, jednakże z technologicznego punktu widzenia jest to bardzo trudne. Poprawę przyczepności niesprężonych taśm do powierzchni betonowej można uzyskać poprzez dodatkowe zakotwienie końców taśm, stosując strzemię zewnętrzne bądź owijając belkę, lub jej część matami kompozytowymi. Inne rozwiązanie poprawiające przyczepność taśmy do betonu, a zarazem zwiększenie sztywności wzmocnionej belki zaproponowali Blaschko i Zilch [2]. Taśmy CFRP wklejane są w pionowe szczeliny nacięte w otulinie betonowej dolnej powierzchni belki. Rozwiązanie to, choć na razie jest na etapie badań, pozwala na pełniejsze wykorzystanie właściwości materiału. Jego dodatkową zaletą jest poprawienie odporności ogniowej wzmocnionego przekroju w stosunku do innych metod wzmacniania.



Rys. 1. Rozkład odkształceń w przekroju wzmocnionym
Fig. 1. Strain diagram for strengthened cross-section

W trakcie wzmacniania konstrukcja jest częściowo obciążona (co najmniej ciężarem własnym). Wywołuje to początkowy stan naprężeń w betonie i zbrojeniu zwykłym, który

musi być uwzględniony w analizie pracy przekroju wzmocnionego. Na rys. 1 przedstawiono rozkład odkształceń w przekroju wzmocnionym z uwzględnieniem stanu początkowego (wywołanego M_0). Dokładną analizę pracy takiego przekroju przedstawiono w [3].

3. Badania belek wzmocnionych materiałami FRP poddanych obciążeniom zmęczeniowym

Do tej pory ilość badań dotyczących zachowania się żelbetowych belek wzmocnionych materiałami CFRP poddanych działaniu obciążenia zmęczeniowego jest nieporównywalnie mniejsza niż ilość badań takich belek pod obciążeniem statycznym.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono przegląd dotychczasowych badań zmęczeniowych belek wzmocnionych materiałami kompozytowymi. W tabeli 1 wyróżniono grupy badawcze, podstawowe cele badań, liczbę próbek przebadanych pod obciążeniami zmęczeniowymi oraz rodzaj materiału użytego do wzmocnienia.

Tabela 1
Zestawienie badań zmęczeniowych żelbetowych belek wzmocnionych FRP

Lp.	Grupa badawcza, rok	Cel badania	Liczba próbek	Rodzaj materiału wzmocniającego
1	Kaiser (1989)	obserwacja sposobu zniszczenia po zerwaniu prętów zbrojeniowych	1	maty hybrydowe 33%CFRP – 67%GFRP
2	EMPA - Deuring (1993)	wpływ środowiska o bardzo dużej wilgotności	1	maty CFRP
3	Arockiasamy, Thayer, Dutta (1997)	wpływ rodzaju warstwy adhezyjnej, badania w bardzo niskich temperaturach	6	taśmy CFRP
4	Barnes, Mays (1999)	weryfikacja modelu obliczeniowego	5	taśmy CFRP
5	Shahawy, Beitelman (1999)	wpływ ilości warstw wzmocnienia, badanie belek uszkodzonych	6	maty CFRP
6	Wang (1999)	wpływ ilości warstw wzmocnienia, sposobu przygotowania powierzchni betonowej (zginanie ze ścinaniem)	10	taśma CFRP - zginanie maty GFRP - ścinanie
7	Senthilnath, Belarbi, Myers (2001)	wpływ istniejących delaminacji, badania taśm połączonych na zakład	6	taśmy CFRP
8	Breña, Wood, Kreger (2001)	wpływ wielkości obciążenia użytkowego, badania 2 sposobów wzmocnienia	4	maty CFRP
			4	laminaty CFRP
9	Kachlakev (2001)	badania wpływu modułu sprężystości włókien i żywicy oraz ilości warstw wzmocnienia	5	niskomodulowa żywica i włókna szklane
			5	wysokomodulowa żywica i wł. węglowe

W tabeli 2 przedstawiono wybrane dane dotyczące geometrii belki i jej obciążenia, a także modelu zniszczenia. Pojęcie „zerwanie zbrojenia” określa zniszczenie zmęczeniowe rozciąganych prętów zbrojenia zwykłego, a „odspojenie” zerwanie przyczepności taśmy do betonu w trakcie trwającego obciążenia cyklicznego, natomiast „próba statyczna” oznacza, iż zniszczenie belki osiągnięto w trakcie obciążenia statycznego po zakończeniu próby zmęczeniowej.

Tabela 2

Podstawowe parametry badań

Numer badania	Rozpiętość belki [m]	Kształt przekroju	Oznaczenie próbki	P_{max}/P_u [-]	Częstotl. [Hz]	Ilość cykli [$\times 10^3$]	Model zniszczenia
1	2,00	prostokąt.	---	---	4	480	zerwanie zbrojenia
2	6,00	teowy	---	0,35	---	12 000	zerwanie zbrojenia
3	2,13	prostokąt.	---	---	4	1 000	---
4	2,10	prostokąt.	3	0,39	1	508,5	zerwanie zbrojenia
			4	0,32		1 889	zerwanie zbrojenia
			5	0,26		> 11 968,2	bez zniszczenia
5	5,79	teowy	C-2L5-FB	0,50	1	2 000	próba statyczna
			F-2L5-A	0,37		1 800	
			F-2L5-B	0,37		1 756	
			F-3L5-A	0,34		3 000	
			F-3L5-B	0,34		3 215	
6	5,00	teowy	F2	0,5	0,2	10	próba statyczna
			F4	0,6			
			S1	0,4			
			C2	0,5			
7	2,75	prostokąt.	---	0,58	3	2 000	próba statyczna
8	2,70	prostokąt.	A-F2	0,33	2	1 000	próba statyczna
			A-F3	0,50	2	1 000	
			A-F4	0,90	1,75	155,95	
	3,00	prostokąt.	D-F2	0,50	2	1 000	próba statyczna
			D-F3	0,90	1,75	55,5	odspojenie
D-F4	1,10	0,5	9	odspojenie			
9	4,50	prostokąt.	1LG	0,37	0,5	648	---
			2HC	0,39		916,4	---

Podstawowym wnioskiem z powyższych badań jest stwierdzenie, iż wzmocnienie belki żelbetowej poprzez doklejenie materiałów CFRP znacząco poprawia jej wytrzymałość zmęczeniową, nawet w przypadku elementów mocno uszkodzonych przed momentem wzmocnienia [4]. W żadnym z prezentowanych badań nie zaobserwowano zniszczenia zmęczeniowego materiału kompozytowego. Przeprowadzone testy pokazały, że w większości przypadków zniszczenie belki poddanej obciążeniu zmęczeniowemu jest determinowane poprzez zerwanie zmęczeniowe zbrojenia zwykłego. W przypadku belek poddanych znacznemu przeciążeniu [1] utrata nośności belki była sygnalizowana dużym wzrostem

ugięcia (spadkiem sztywności). Badania wykazały możliwość stosowania wzmocnień przy użyciu CFRP dla konstrukcji poddanych obciążeniom zmęczeniowym znajdującym się w środowisku o bardzo dużej wilgotności i podwyższonej temperaturze [5], jak i w bardzo niskich temperaturach [6]. W badaniach [7] pokazano, iż niedokładności powstałe w procesie wzmacniania, jeżeli powierzchnia odspojenia nie przekracza 175 cm^2 , nie miały wpływu na zachowanie się belki pod obciążeniem zmęczeniowym. W przypadku połączeń taśmy CFRP na zakład o długości nie mniejszej niż 75 mm (połączenie taśmy zlokalizowane było w strefie maksymalnego momentu zginającego) nie zaobserwowano przyspieszonego zniszczenia.

4. Modele obliczeniowe

4.1. Modele betonu poddanego obciążeniom zmęczeniowym

Zasady uwzględniania zmęczenia betonu w wyniku działania obciążeń powtarzalnych są zróżnicowane w ujęciu poszczególnych norm. Albo wprowadza się ograniczenie wielkości maksymalnego naprężenia wywołanego obciążeniem cyklicznym dla danej liczby cykli, albo uzależnia się liczbę cykli prowadzących do zniszczenia od wielkości S_{\min} i S_{\max} [8]:

$$S_{\min} = \frac{\sigma_{c,\min}}{f_{c,N_i}}, \quad S_{\max} = \frac{\sigma_{c,\max}}{f_{c,N_i}}, \quad (1)$$

gdzie: f_{c,N_i} - wytrzymałość zmęczeniowa betonu ściskanego;

$\sigma_{c,\max}, \sigma_{c,\min}$ - max i min naprężenia w betonie przy częstej kombinacji obciążeń.

Istniejące teorie przyjmują hipotezę, iż inicjacja zniszczenia zmęczeniowego może być związana z postępującą destrukcją przyczepności między ziarnami kruszywa grubego a zaczynem cementowym. Ostateczne zniszczenie jest wynikiem zniszczenia matrycy. Inną hipotezę zaproponował Antrim, przyjmując, iż zniszczenie zmęczeniowe w zwykłym betonie występuje w wyniku mikrozarysowań powstających i propagujących się w zaczynie cementowym, wywołujących w rezultacie układ rys tak dalece osłabiający przekrój, że nie jest on w stanie przenieść przyłożonego obciążenia.

Niemożliwość ekstrapolowania modeli betonu poddanego obciążeniom zmęczeniowym, proponowanych przez różnych autorów, znacznie ogranicza ich stosowanie. W rzeczywistości nie ma ogólnego modelu mechanicznego betonu obciążanego zmęczeniowo.

Najczęściej w analizach obliczeniowych stosuje się jeden z dwóch modeli wytrzymałości zmęczeniowej betonu:

- model oparty na teorii naprężeń krytycznych σ_I i σ_{II} [9]. Naprężenie σ_I odpowiada górnej granicy względnie sprężystej pracy betonu przy obciążeniu krótkotrwałym, zaś naprężenie σ_{II} odpowiada górnej granicy odkształceń plastycznych przy obciążeniach krótkotrwałych. W przedziale $\sigma_I < \sigma < \sigma_{II}$ następuje stały rozwój mikrorys, głównie w warstwach stykowych między kamieniem cementowym a ziarnem kruszywa;
- model opierający się na teorii przyrostu trwałych odkształceń betonu i spadku jego modułu odkształceń. Modele takie szerzej pokazane zostały w [8], [3].

4.2. Model stali zbrojeniowej poddanej obciążeniom zmęczeniowym

Większość autorów zajmujących się zmęczeniem stali zbrojeniowej prezentuje wyniki swoich badań w formie zależności $\Delta\sigma - \log N_F$.

W oparciu o analizę statystyczną badań Corleya (12) przyjmuje się zależność:

$$\log N_F = 6,1044 - 0,0059 S_{\max} + 0,0039 S_{\min} + 0,001 f_{su} - 0,0069 \phi \left(\phi - 18,45 \frac{r}{h} \right), \quad (2)$$

gdzie: f_{su} - wytrzymałość statyczna na rozciąganie [MPa]; ϕ - średnica prętów [cm];

h - wysokość żeberka [cm]; r - promień wyokrąglenia [cm].

Według Destrebecq, Bressolette [10] zależność S- N_F dla żebrowanych prętów pracujących w rozciąganej strefie przekroju wyprowadzona na podstawie modelu bazującego na mechanice zniszczenia przyjmuje następującą postać:

$$N_f = K(\rho)(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^{-m} \quad (3)$$

przy $\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$, gdzie liczba cykli do zniszczenia stanowi większą z dwóch wartości

otrzymanych przy rozważeniu kolejno:

$$a) \quad m = 5,136 \quad \log K = \frac{3,89}{\rho - 1,952} + 20,58$$

$$b) \quad m = 37,59 \quad \log K = \frac{24,16}{\rho - 1,762} + 111,4$$

Ponadto zależność naprężenie - odkształcenie może być uznawana za niezmienną aż do momentu poprzedzającego zniszczenie (materiał nie podlegający mikrouszkodzeniom).

4.3. Model dla materiałów kompozytowych poddanych obciążeniom zmęczeniowym

Na zachowanie zmęczeniowe materiałów kompozytowych FRP ma wpływ wiele parametrów, m. in.: maksymalny poziom naprężeń, współczynnik R (stosunek minimalnej do maksymalnej siły w cyklu), częstotliwość obciążenia, kształt próbki, model zniszczenia

w próbie zmęczeniowej, rodzaj i procentowa zawartość włókien w kompozycie oraz rodzaj żywicy.

Materiały CFRP generalnie wykazują bardzo dobrą wytrzymałość zmęczeniową. Według G.C. Mays [11] w materiałach o strukturze krystalicznej uszkodzenia zmęczeniowe zaczynają powstawać w postaci mikropęknięć i propagując się tworzą rysy zwiększające się wraz ze wzrostem ilości cykli obciążenia aż do zniszczenia materiału. Wewnątrz struktury taśm kompozytowych (materiał wykonany z ciągłych włókien pracujący jednokierunkowo) jest relatywnie mało mikrouszkodzeń i ewentualnie powstająca mikrorysa nie może się propagować w poprzek matrycy.

W badaniach Curtis [11] wykazano, iż to właściwości matrycy mają zasadniczy wpływ na zachowanie zmęczeniowe kompozytu. Badając cztery różne rodzaje włókien węglowych umieszczonych w tej samej matrycy nie zauważono różnicy w zachowaniu się kompozytu pod obciążeniem cyklicznym, natomiast przy zatopieniu danego rodzaju włókna w różnych matrycach uzyskano wyraźnie różne zależności S-N.

C. E. Demers [12] na podstawie badań opracowała dolne granice żywotności zmęczeniowej (wykresu $S_{\max}/S_{\text{ult}} - \log N$) dla grup materiałów FRP ze względu na rodzaj i kierunek ułożenia włókien. Dla materiałów CFRP wykonanych z krótkich włókien i z włókien ciągłych ułożonych pod kątem $(\pm 45, 0)$, (± 90) , (± 35) , (± 45) , a także dla materiałów E-glass FRP można zapisać zależność:

$$\frac{S_{\max}}{S_{\text{ult}}} = 0,801 - 0,095 \log N \quad (4)$$

Dla materiałów CFRP wykonanych z włókien ciągłych jednokierunkowych oraz wielokierunkowych ułożonych pod kątem $(0, 90)$, $(0, 45, 90)$ można zapisać zależność:

$$\frac{S_{\max}}{S_{\text{ult}}} = 0,823 - 0,052 \log N \quad (5)$$

Na podstawie badań można przyjąć, iż dla materiałów CFRP moduł sprężystości pozostaje wielkością niezmienną aż do momentu zniszczenia.

Przyjmuje się, iż właściwości warstwy adhezyjnej pomiędzy betonem a produktem CFRP nie ulegają zmianie pod działaniem obciążenia zmęczeniowego.

4.4. Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej przekrojów normalnych

Dotychczas stosowane modele obliczeniowe wytrzymałości zmęczeniowej żelbetowego przekroju normalnego - np. według PN-B-03264:1999 [13] i CEB-FIP Model Code 1990 -

oparte są na ograniczeniu wytrzymałości betonu i stali zbrojeniowej. Poniżej przykładowo przedstawiono wytyczne obliczeniowe zawarte w PN [13].

Możliwość zniszczenia poszczególnych materiałów na skutek działania obciążenia zmęczeniowego należy sprawdzać z warunków:

$$\max \Delta \sigma_s \leq \Delta \sigma_{sR}, \quad (6)$$

$$\max \sigma_c \leq \sigma_{cR}, \quad (7)$$

gdzie: $\max \Delta \sigma_s$ - maksymalny zakres zmian naprężeń w stali zbrojeniowej,

$\Delta \sigma_{sR}$ - dopuszczalny zakres zmian naprężeń w stali zbrojeniowej. Wartości podano w [13].

$\max \sigma_c$ - maksymalne naprężenie normalne w betonie, obliczone przy założeniu liniowego rozkładu naprężeń,

σ_{cR} - wartości dopuszczalne naprężeń w betonie ($0,25 f_{ck}$ dla ściskania; $0,25 f_{ctk}$ dla rozciągania oraz $0,18 f_{ck}$ dla ściskania-rozciągania, przy czym $|\sigma_{ct}| \leq 0,02 \sigma_c$).

Ponieważ w żadnym z badań opisanych w rozdziale 3 nie zaobserwowano zniszczenia zmęczeniowego materiału kompozytowego, można przyjąć, iż do projektowania wzmocnienia materiałami CFRP konstrukcji poddanych obciążeniom zmęczeniowym wykorzystać można normowe ograniczenia naprężeń w stali i w betonie podane dla przekrojów żelbetowych.

Reasumując, można stwierdzić, iż zagadnienie wzmocniania konstrukcji żelbetowych obciążonych zmęczeniowo przy użyciu materiałów kompozytowych jest bardzo aktualne i wymaga dalszych badań zmierzających do stworzenia pełnego modelu teoretycznego pracy takiej konstrukcji.

LITERATURA

1. Breña S.F., Bramblet R.M., Benouaich M.A., Wood S.L., Kreger M.E.: Use of Carbon Fibre Reinforced Composites to Increase the Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams, Technical Report Documentation Univ. of Texas at Austin; 2001.
2. Blaschko M., Zilch K.: Rehabilitation of Concrete Str. with CFRP Strip Glued into Slits.
3. Derkowski W.: ULS of the Bent RC Beams Strengthened with FRP Comp. under Static and Fatigue Load, 4th International Conf. AMCM 2002, Kraków, June 2002, str. 20-27.
4. Shahawy M., Beitelman T.E.: Static and Fatigue Performance of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates, Journal of Str. Eng.; June 1999; str. 613-621.

5. Meier U.: Strengthening of Structures Using Carbon Fibre/Epoxy Composites, Construction and Building Materials, Vol 9 N. 6; 1995; str. 341-351.
6. Arockiasamy M., Thayer C.C, Dutta P.K.: Damage Process of CFRP Composites-Concrete Interface Under Fatigue Loading at Low Temperatures, International Offshore and Polar Engineering Conference; Canada, May 24-29 1998, str. 211-218.
7. Senthilnath P.S., Belarbi A., Myers J.J.: Performance of CFRP Strengthened RC Beams in the Presence of Delaminations and Lap Splices Under Fatigue Loading, Composites in Construction, 2001 International Conf.; Porto, Portugal; Oct. 2001.
8. Dyduch K.: Analiza metod obliczeniowych nośności przekrojów normalnych w zginanych konstrukcjach żelbetowych pod obciążeniem zmęczeniowym, Cement, Wapno, Beton; 4(1997), str. 136-140.
9. Furtak K.: Nośność przekrojów normalnych w zginanych elementach żelbetowych poddanych obciążeniom zmiennym ze szczególnym uwzględnieniem obiektów mostowych, Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 4, Kraków 1985.
10. Destrebecq J.F., Bressolette Ph.: Comportement des barres crenellees pour beton arme sollicitées en fatigue, Annal. Tech. Bat. et des Trav. Publ. No 471, Jan. 1989.
11. Barnes R.A.; Mays G.C.: Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates, Journal of Composites for Construction; May 1999; str. 63-72.
12. Demers C.E.: Fatigue Strength Degradation of E-glass FRP Comp. and Carbon FRP Comp., Construction and Building Materials; 12(1998); str. 311-318.
13. PN-B-03264:1999, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.

Recenzent: Dr hab. inż. Maria Ewa Kamińska, prof. Politechniki Łódzkiej

Abstract

Strengthening of the flexure RC structures subjected to cyclic loading by the means of CFRP is a present problem, but it is not fully examined and needs further tests. A review of different researches concerning fatigue behaviour of strengthened RC beams and its results are discussed. Paper presents fatigue models for component materials which can be used in cross-section analysis as well as in Polish Code recommendations for calculating the fatigue strength of normal cross-section.