

**Tomasz Trapko**

Politechnika Wrocławska, Instytut Budownictwa, pl. Grunwaldzki 11, 50-377 Wrocław, Poland  
Corresponding author. E-mail: tomasz.trapko@pwr.wroc.pl

Otrzymano (Received) 01.09.2010

## CHARAKTERYSTYKA PEŁZANIA ELEMENTÓW ŚCISKANYCH WZMACNIANYCH MATERIAŁAMI KOMPOZYTOWYMI CFRP

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych charakterystyki pełzania betonowych elementów ściskanych wzmocnionych materiałami kompozytowymi z włókien węglowych CFRP. Pełzanie polega na rozłożonym w czasie procesie narastania odkształceń betonu w konstrukcji poddanej obciążeniu. Narastające odkształcenia powodują powstawanie dodatkowych deformacji konstrukcji, a co za tym idzie dodatkowych oddziaływań na elementy konstrukcji (m.in. mimośrodów). Parametrem, poprzez który w obliczeniach uwzględnia się wpływ pełzania betonu, jest współczynnik pełzania  $\phi(\infty, t_0)$ , czyli charakterystyka pełzania. Dla betonu zjawisko pełzania jest rozpoznane i opisane w literaturze, a wartość charakterystyki pełzania można wyznaczyć, posługując się nomogramami zawartymi w normie PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. W literaturze brakuje natomiast informacji, jak przyjmować wartość tego współczynnika w przypadku elementów hybrydowych, będących połączeniem betonu i kompozytów węglowych CFRP.

Celem przeprowadzonych badań własnych była ocena wpływu poprzecznego i podłużnego wzmocnienia kompozytowego CFRP na charakterystykę pełzania elementów poddanych długotrwałemu ściskaniu osiowemu. Badania eksperymentalne podzielone były na kilka etapów, w których przedmiotem badań były walcowe próbki betonowe o średnicy  $\varnothing 113$  mm i wysokości 350 mm. Badaniami objęto elementy w dwóch grupach wzmocnienia. W pierwszej grupie elementy wzmocniano wyłącznie: jedną, dwoma lub trzema warstwami maty CFRP przyklejonymi wokół próbek walcowych. W drugiej grupie do elementów doklejono łącznie: podłużne odcinki taśm CFRP o powierzchni  $A_L = 378$  i  $252$  mm<sup>2</sup> i poprzeczne wzmocnienie w postaci jednej, dwóch lub trzech warstw maty CFRP. W celach porównawczych, dla każdego typu elementów wzmocnionych, wykonano elementy kontrolne bez wzmocnienia. Wszystkie elementy poddano próbie długotrwałego ściskania osiowego w stałych warunkach środowiskowych. Podczas badań rejestrowano odkształcenia podłużne elementów. Po ustabilizowaniu się odkształceń elementy badawcze odciążono i poddano zniszczeniu. W pracy wyznaczono doświadczalne wartości charakterystyk pełzania dla wszystkich typów elementów i przedstawiono analizę otrzymanych wyników badań.

Słowa kluczowe: CFRP, ściskanie, pełzanie, odkształcenia reologiczne, wzmocnianie

## CREEP CHARACTERISTICS OF COMPRESSED MEMBERS STRENGTHENED WITH CFRP COMPOSITE MATERIALS

In the paper, the results of the experimental studies on the creep characteristics of compressed concrete members strengthened with CFRP composite materials are presented. Creep consists in a process in which concrete strains in a structure are subjected to an external load over an extended period of time. Increasing strains initiate additional deformations of structures. The subsequent consequences of them are additional impacts on structural members (e.g. eccentricities). The parameter considering the influence of creep on concrete in engineering calculations is the creep coefficient  $\phi(\infty, t_0)$  that is the creep characteristic. The phenomena of concrete creep is investigated and described in specialist literature. The value of the creep characteristic can be obtained with nomograms included in PN-EN 1992-1-1:2008 Eurocode 2. In literature there is a lack of information concerning the coefficient in the case of hybrid members which are combinations of concrete and CFRP composites.

The aim of the conducted investigations was to estimate the influence of transverse and longitudinal CFRP strengthening on the creep characteristic of members subjected to long-term axial compression. The experimental investigations were divided into a few stages. The studies were performed on cylindrical concrete specimens with a diameter of 113 mm and height of 350 mm. Two types of strengthening were applied in the experiment. The first type of strengthening was one, two or three layers of CFRP sheet attached around the cylindrical specimens. Second type was longitudinal segments of CFRP strips (with an area  $A_L$  of 378 or 252 mm<sup>2</sup>) and one, two or three layers of CFRP sheet as transverse strengthening. For comparative analyses, control un-strengthened specimens were performed for each type of strengthening. All of the specimens were subjected to long-term axial compression in constant environmental conditions. During the investigations the longitudinal strains of the specimens were measured. When the strains stabilized the specimens were unloaded and standard compression failure tests were performed. The experimental values of the creep characteristics for each type of member was determined in the paper. The analyses of the results is presented as well.

Keywords: CFRP, compression, creeping, rheological strain, strengthening

## WPROWADZENIE

Zjawisko pełzania, czyli stałego narastania odkształceń pod wpływem stałego obciążenia długotrwałego,

jest jedną z najważniejszych własności betonu. Proces narastania odkształceń w czasie zależy od wielu para-

metrów, takich jak: skład mieszanki betonowej i właściwości jej składników, sposobu ułożenia i pielęgnacji betonu, wilgotności środowiska, poziomu obciążenia.

Pełzanie ma istotne znaczenia przy projektowaniu elementów konstrukcyjnych z betonu. Wpływa na deformacje tych elementów oraz na końcową wartość modułu sprężystości betonu, co uwzględniono w normie [1], wprowadzając tzw. efektywny moduł sprężystości  $E_{c,eff}$ . Przy stałym poziomie naprężeń w betonie moduł ten można obliczyć z zależności:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} \quad (1)$$

gdzie:  $E_{cm}$  - moduł sprężystości betonu określony w wieku 28 dni [1],  $\varphi(\infty, t_0)$  - końcowy współczynnik pełzania (charakterystyka pełzania).

W elementach ściskanych pełzanie ma wpływ na powstanie tzw. efektów drugiego rzędu, czyli dodatkowych oddziaływań na konstrukcję spowodowanych jej odkształceniem. Pełzanie zwiększa krzywiznę osi podłużnej elementu i powoduje powstanie dodatkowego mimośrodu siły podłużnej. Następuje przegrupowanie i zmienia się rozkład naprężeń pomiędzy betonem i stalą. Wpływ długotrwałego działania obciążenia uwzględniono w normie [1], wprowadzając efektywny współczynnik pełzania  $\varphi_{ef}$ , który wykorzystywany jest przy sprawdzaniu efektów drugiego rzędu. Wartość tego współczynnika oblicza się ze wzoru:

$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{0Egp}}{M_{0Ed}} \quad (2)$$

gdzie:  $\varphi(\infty, t_0)$  - końcowy współczynnik pełzania (charakterystyka pełzania),  $M_{0Egp}$  - moment zginający pierwszego rzędu wywołany prawie stałą kombinacją obciążeń,  $M_{0Ed}$  - moment zginający pierwszego rzędu wywołany obliczeniową kombinacją obciążeń.

Dla wyznaczenia wartości współczynnika pełzania można, w celach projektowych, posłużyć się nomogramami zawartymi w normie [1], które podane zostały dla „czystego” betonu. Nie obejmują one jednak hybrydowego połączenia betonu z zewnętrznym zbrojeniem kompozytowym CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers - tworzywa sztuczne wzmocnione włóknami węglowymi).

## ELEMENTY ŚCISKANE WZMACNIANE KOMPOZYTAMI CFRP

Metoda wzmocniania elementów ściskanych zewnętrznym zbrojeniem CFRP polega na doklejanu do betonu kompozytów węglowych składających się z włókien wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, zatopionych w matrycy (taśmy, kształtki) lub ułożonych w jedno- lub wielokierunkowych arkuszach na osnowie (maty). Tworzone w ten sposób wzmocnienie składać się może wyłącznie z jednej lub kilku warstw maty

CFRP owiniętej poprzecznie wokół słupa, co odpowiada stosowaniu w słupach uzwojenia stalowego jako wewnętrznego zbrojenia poprzecznego. Innym sposobem jest doklejanie podłużnych odcinków taśm CFRP, jako odpowiednika podłużnych prętów zbrojeniowych, któremu powinno towarzyszyć obwodowe zbrojenie z maty CFRP, zapobiegające odpajaniu się kompozytu od betonu [2-4].

Uzwojenie z maty CFRP powoduje powstanie w przekroju poprzecznym elementu ściskanego, trójosiowego stanu naprężeń i ograniczenie przyrostu odkształceń poprzecznych. Efekt ten jest wyraźnie widoczny dla elementów walcowych, natomiast mniejszy wpływ widoczny jest dla elementów o przekrojach czworokątnych - kwadratowym i prostokątnym, gdzie decydujący wpływ na efektywność wzmocnienia ma promień wyokrąglenia naroży [5]. Zastosowanie taśm kompozytowych CFRP, których włókna są zorientowane równoległe do osi słupa, powoduje przyrost sztywności elementu, co przekłada się bezpośrednio na zmniejszenie przyrostu odkształceń podłużnych i co za tym idzie przyrost nośności elementu. Wzmocnianie samymi odcinkami taśm CFRP jest niekorzystne ze względu na przedwczesne odspojenie się kompozytu od betonu [6-8].

Przedmiotowa literatura szeroko omawia zagadnienia związane z pracą tego typu wzmocnień. Analizowanych jest wiele parametrów, m.in.: liczba warstw zbrojenia poprzecznego CFRP, kształt przekroju poprzecznego, intensywność wzmocnienia podłużnego CFRP, smukłość, mimośród siły podłużnej, wstępne obciążenie elementów przed aplikacją systemu [5]. Jest to tematyka bardzo aktualna, o czym świadczy wiele publikacji w renomowanych czasopismach, poruszających nowe problemy.

Jednym z tych nowych zagadnień, którym zajmowano się w badaniach własnych, była ocena cech reologicznych ściskanych elementów betonowych wzmocnianych powierzchniowo materiałami kompozytowymi CFRP. Badaniami objęte były modelowe elementy betonowe o różnym typie wzmocnienia. Elementy wzmocnione były zewnętrznym zbrojeniem kompozytowym - podłużnymi odcinkami taśm CFRP i poprzecznym uzwojeniem z maty CFRP. Prace doświadczalne podzielone były na kilka etapów, w których elementy badawcze poddawane były długotrwałemu ściskaniu osiowemu.

## BADANIA WŁASNE

### Cel i program badań

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu stopnia poprzecznego i intensywności podłużnego wzmocnienia kompozytowego CFRP na charakterystykę pełzania ściskanych elementów betonowych poddanych długotrwałemu obciążeniu osiowemu. Przez stopień poprzecznego zbrojenia kompozytowego rozumie się liczbę warstw maty CFRP przyklejonej wokół ele-

mentu, natomiast intensywność wzmocnienia podłużnego  $\rho_L$  charakteryzuje stosunek pola powierzchni taśmy CFRP doklejonej do betonu ( $A_L$ ) do pola powierzchni przekroju betonu ( $A_c$ ).

Elementy badawcze różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia kompozytowego i podzielono je na dwie grupy. W pierwszej grupie oceniono wyłącznie wpływ stopnia poprzecznego wzmocnienia matą z włókien węglowych, natomiast w drugiej grupie przeanalizowano wpływ liczby warstw maty CFRP i intensywności podłużnego wzmocnienia taśmami CFRP na wartość współczynnika pełzania.

### Wykonanie i przygotowanie elementów badanych

Przedmiotem badań były walcowe próbki betonowe o średnicy  $\varnothing 113$  mm i wysokości 350 mm, które wykonano z betonu na cemencie portlandzkim CEM I 32,5R [9] z Cementowni Góraździe i naturalnym kruszywem płukanym o frakcjach: piaskowej – 0÷2 mm, żwirowej – 2÷8 mm oraz 8÷16 mm z kopalni kruszywa w Mietkowie koło Wrocławia.

Dobór składników na 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej w oparciu o [10] dla projektowanego betonu B30 (C25/30) i założonej konsystencji plastycznej podano w tabeli 1.

TABELA 1. Skład mieszanki betonowej, kg/m<sup>3</sup>  
TABLE 1. Concrete mix proportions, kg/m<sup>3</sup>

Cement CEM I 32,5R	404
Żwir 2÷8 mm	627
Żwir 8÷16 mm	537
Piasek 0÷2 mm	627
Woda	175
Wskaźnik w/c	0,43

Mieszankę betonową przygotowano w warunkach laboratoryjnych. Składniki mieszanki odmierzano wagowo i mieszano w betoniarce wolnospadowej przez około 10 minut. Elementy wykonywano w formach stalowych. Betonowanie elementów badanych i próbek do określenia cech wytrzymałościowych betonu odbyło się z jednego zarobu mieszanki betonowej, odpowiednio dla każdej grupy. Beton w formach zagęszczano na stole wibracyjnym przez około 1 minutę. Po dwóch dniach wyciągano elementy badane oraz próbki z form i przechowywano je w komorze klimatycznej na ruszcie z wodą w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Do wykonania wzmocnień wykorzystano materiały systemu Sika CarboDur [11, 12]: taśmy CarboDur typu M, klej do taśm Sikadur 30, maty SikaWrap 230C, impregnat epoksydowy do mat Sikadur 330, preparat do czyszczenia i aktywacji kompozytów węglowych Sika Colma Reiniger.

Podczas betonowania elementów badawczych, dla każdego z etapów, wykonano próbki sześciennie 150x150x150 mm oraz próbki walcowe  $\varnothing 113$  mm

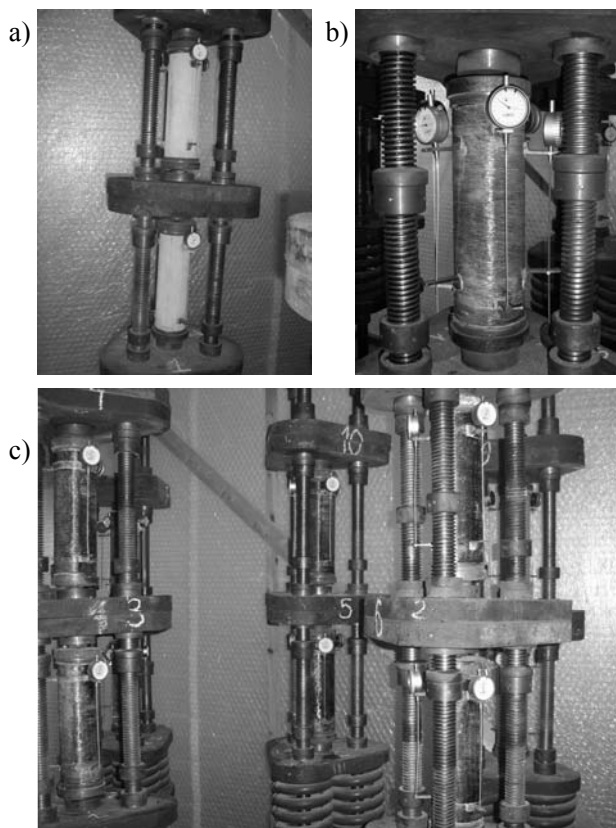
i wysokości 350 mm do określenia cech wytrzymałościowych betonu. W przeddzień długotrwałego obciążania elementów badanych określono:

- 1) średnią wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{cm}$  (zniszczenie próbek sześciennych o krawędzi 150 mm),
- 2) średni moduł odkształcenia betonu  $E_{cm}$  (określony jako wartość stosunku przyrostu naprężeń do przyrostu odkształceń w przedziale naprężeń  $0,1 \div \pm 0,3 f_{c,cyl}$  [13]),
- 3) średnią wytrzymałość słupową betonu na ściskanie  $f_{cm,cyl}$  (zniszczenie przy siódmym cyklu obciążenia próbek stosowanych do wyznaczania modułu sprężystości betonu).

Otrzymane parametry betonu zamieszczono w tabelach 2-4 razem z wynikami badań długotrwałych.

### Metodyka badań

Badania długotrwałe przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej w pełzarkach sprężynowych. Na obydwu końcach elementy badawcze wyposażono w stalowe kapsle, dzięki którym za pomocą dwóch przegubów kulowych zapewniono równoległość płaszczyzn docisku i osiowość obciążenia. W każdej pełzarce badano po dwie próbki odpowiedniego rodzaju (rys. 1).

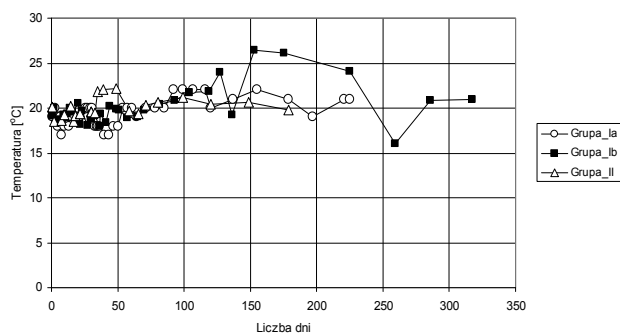


Rys. 1. Elementy na stanowisku badawczym: a) elementy bez wzmocnienia - grupa Ia, b) element z 3 warstwami maty CFRP - grupa Ib, c) elementy wzmocnione - grupa II

Fig. 1. Specimens in experimental set-up: a) unconfined specimen - group Ia, b) specimen with 3 layers of CFRP sheet - group Ib, c) confined specimen - group II

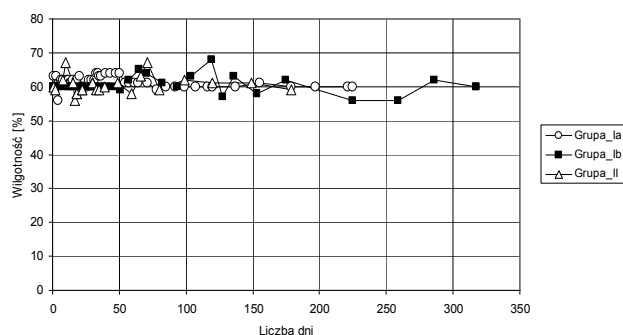
Przy planowaniu eksperymentu założono, że badania zostaną przeprowadzone przy dwóch stałych parametrach środowiskowych: temperaturze  $\sim 20^\circ\text{C}$  (rys. 2) i wilgotności  $\sim 60\%$  (rys. 3). W tym celu pełzarki ustawiono w szczelnym namiocie foliowym zaopatrzonym w klimatyzator i nawilżacz powietrza (rys. 1).

Do pomiaru odkształceń wykorzystano czujniki zegarowe o dokładności 0,001 mm. Na każdym badanym elemencie umieszczono po 3 czujniki, w rozstawie  $60^\circ$ , na bazie pomiarowej 250 mm (rys. 1). Czujniki mocowano bezpośrednio do betonu. W przypadku elementów wzmacnionych tylko trzema warstwami maty zamocowano dodatkowo po 3 czujniki do maty CFRP,  $60^\circ$ , na bazie pomiarowej 200 mm (rys. 1-b).



Rys. 2. Temperatura powietrza

Fig. 2. Temperature of air



Rys. 3. Wilgotność względna powietrza

Fig 3. Relative humidity of air

Wzmacnianie konstrukcji wykonuje się pod częściowym obciążeniem, gdyż niemożliwe jest wyeliminowanie pewnych oddziaływań na konstrukcję (np. ciężaru własnego). W związku z tym dostosowano program obciążania elementów badanych do tych kryteriów.

Po 28 dniach dojrzewania betonu próbki obciążono do poziomu ok.  $1/3f_{cm,cyl}$  (8 MPa). Następnie, po kolejnych trzech tygodniach wstępnego obciążenia, wzmacniono pod obciążeniem po dwa elementy badawcze każdego typu. Dla każdego typu elementów wzmacnionych pozostawiono pod obciążeniem elementy kontrolne bez wzmacnienia. Po kolejnych siedmiu dniach zwiększono poziom obciążenia, dla wszystkich próbek, do ok.  $2/3f_{cm,cyl}$  (16 MPa) i rozpoczęto dalsze pomiary odkształceń długotrwałych. Po ustabilizowaniu się mie-

rzonych odkształceń elementy badawcze odciążono i poddano zniszczeniu.

## Wyniki badań

W tabelach 2-4 zestawiono pomierzone wartości odkształceń w drugiej fazie badań, czyli po wzmacnieniu i dociążeniu elementów do poziomu ok.  $2/3f_{cm,cyl}$  (czyli 16 MPa). Na podstawie danych zawartych w tabelach 2-4 obliczono charakterystykę pełzania  $\varphi(\infty, t_0)$ , czyli współczynnik pełzania jako stosunek odkształcenia pełzania  $\varepsilon(t)$  po czasie  $t$  do odkształcenia doraźnego  $\varepsilon(t = 28)$  po wzmacnieniu i dociążeniu elementu.

$$\varphi(\infty, t_0) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t = 28)} \quad (3)$$

TABELA 2. Współczynnik pełzania - grupa Ia  
TABLE 2. Creep coefficients of specimens - group Ia

Element	Poniżej w tabeli podano objaśnienia symboli elementów	$\varepsilon(t=28)$ ‰	$\varepsilon(t=225)$ ‰	$\varphi(\infty, t_0)$
C_bw_I		1,175	2,540	2,16
C_1w_I		1,243	2,037	1,64
C_2w_I		1,215	1,835	1,52
C_3w_I		1,065	1,670	1,56
Parametry wytrzymałościowe betonu: $f_{cm,cube} = 35,34$ MPa, $f_{cm,cyl} = 27,85$ MPa, $E_{cm} = 25,94$ GPa.				
C_bw_I - bez wzmacnienia; C_1w_I - 1 warstwa maty; C_2w_I - 2 warstwy maty; C_3w_I - 3 warstwy maty				

TABELA 3. Współczynnik pełzania - grupa Ib  
TABLE 3. Creep coefficients of specimens - group Ib

Element	Poniżej w tabeli podano objaśnienia symboli elementów	$\varepsilon(t=28)$ ‰	$\varepsilon(t=317)$ ‰	$\varphi(\infty, t_0)$
Cc_1		1,483	3,407	2,30
Cw_1		1,504	2,673	1,78
Cc_2		1,389	3,203	2,30
Cw_2		1,288	2,337	1,81
Cc_3		1,342	3,146	2,34
Cw_3		1,206	2,006	1,66
Parametry wytrzymałościowe betonu: $f_{cm,cube} = 33,88$ MPa, $f_{cm,cyl} = 27,66$ MPa, $E_{cm} = 19,86$ GPa.				
Cc_1, Cc_2 i Cc_3 - bez wzmacnienia; Cw_1 - 1 warstwa maty; Cw_2 - 2 warstwy maty; Cw_3 - 3 warstwy maty				

Jak widać w tabelach 2 i 3, elementy wzmacnione wyłącznie matą CFRP, owiniętą (przyklejoną) wokół elementu, charakteryzują się zbliżonymi wartościami współczynnika pełzania bez względu na intensywność tego wzmacnienia. Wartość współczynnika  $\varphi(\infty, t_0)$  dla elementów wzmacnionych samą matą jest około 21÷29% mniejsza w porównaniu z elementami bez wzmacnienia C\_bw i Cc.

TABELA 4. Współczynnik pełzania - grupa II  
TABLE 4. Creep coefficients of specimens - group II

Element		$\varepsilon(t=28)$ ‰	$\varepsilon(t=179)$ ‰	$\varphi(\infty, t_0)$
Cc_4	Poniżej w tabeli podano objaśnienia symboli elementów	1,391	3,192	2,29
C_1IIa		1,305	1,643	1,26
C_2IIa		1,335	1,693	1,27
C_3IIa		1,352	1,706	1,26
C_1IIb		1,447	1,931	1,33
C_2IIb		1,457	1,866	1,28
C_3IIb		1,473	1,897	1,29
Parametry wytrzymałościowe betonu: $f_{cm,cube} = 29,55$ MPa, $f_{cm,cyl} = 26,43$ MPa, $E_{cm} = 22,47$ GPa.				
Cc_4 - bez wzmocnienia; C_1IIa - 3 taśmy 90x1,4 mm + 1 warstwa maty; C_2IIa - 3 taśmy 90x1,4 mm + 2 warstwy maty; C_3IIa - 3 taśmy 90x1,4 mm + 3 warstwy maty; C_1IIb - 3 taśmy 60x1,4 mm + 1 warstwa maty; C_2IIb - 3 taśmy 60x1,4 mm + 2 warstwy maty; C_3IIb - 3 taśmy 60x1,4 mm + 3 warstwy maty				

W przypadku elementów drugiego etapu, gdzie zastosowano podłużne wzmocnienie taśmami CFRP, widać wyraźny wpływ tego wzmocnienia na sztywność i odkształcalność tych próbek. Bez względu na intensywność wzmocnienia podłużnego i poprzecznego charakteryzują się one zbliżonymi wartościami współczynnika pełzania. Dla elementów wzmocnionych taśmami i matami CFRP współczynnik  $\varphi(\infty, t_0)$  jest około 42÷45% mniejszy w porównaniu z elementami betonowymi.

## PODSUMOWANIE

Jak wykazano w badaniach własnych, zewnętrzne zbrojenie kompozytowe CFRP, doklejane do betonu, ma znaczący wpływ na zjawisko pełzania w elementach ściskanych poddanych działaniu obciążenia długotrwałego. Otrzymane wyniki badań pokazują, że doklejanie materiałów kompozytowych CFRP do ściskanych elementów betonowych, oprócz doraźnych korzyści polegających na ponoszeniu ich nośności, wpływają także na ich własności reologiczne. Zwiększenie sztywności elementów wpływa na zmniejszenie deformacji i oddziaływań na konstrukcję spowodowanych jej odkształceniami. Jest to istotna informacja praktyczna, która daje przyczynek do dalszych badań z uwzględnieniem większej liczby parametrów, takich jak temperatura, poziom wyteżenia czy też klasa betonu. Konsekwencją tych prac powinno być opracowanie algorytmów

i wytycznych do sprawdzania stanów granicznych użytkowalności tego typu elementów.

## LITERATURA

- [1] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] Kamiński M., Trapko T., Experimental behavior of reinforced concrete column models strengthened by CFRP materials, *Journal of Civil Engineering and Management* 2006, 12, 2, 109-115.
- [3] Kamiński M., Trapko T., O efektywności zbrojenia materiałami kompozytowymi CFRP mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych, *Inżynieria i Budownictwo* 2006, 62, 1, 39-43.
- [4] Trapko T., Musiał M., Strains of eccentrically compressed RC columns strengthened with CFRP sheets and strips, *Journal of Materials Science and Engineering* 2010, 4, 7, 62-68.
- [5] Trapko T., Nośność żelbetowych słupów wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych, *Rozprawa doktorska, Raport serii PRE 22/04, Politechnika Wrocławska, Instytut Budownictwa*, 178 s.
- [6] Kamiński M., Trapko T., Musiał M., Rheological strains of the compressed concrete elements strengthened by CFRP materials, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Patras, Greece, July 16-18, 2007, Ed. T.C. Triantafyllou, Patras, University of Patras, 2007, 8.
- [7] Kamiński M., Trapko T., Musiał M., Bywalski C., Rheological strains of the compressed concrete elements strengthened with CFRP sheets subjected to cyclically changeable temperature, *Proceedings of the Eighth International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Ise-Shima, Japan, 30 September-2 October 2008, 1, Eds. Tada-aki Tanabe et al., 2008, 775-780.
- [8] Trapko T., Musiał M., Trapko W., The influence of transverse CFRP strengthening on rheological strains of compressed concrete elements, *Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*. APFIS 2009, Seoul, Korea, December 9-11, 2009, Ed. J. Sim. Hanyang University, Korea, 2009, 487-492.
- [9] PN-EN 197-1:2002 Cement Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [10] Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, WN PWN, Warszawa 2006, 2007.
- [11] ITB Aprobata Techniczna AT-15-5604/2004: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych, Warszawa 2004.
- [12] Trapko T., Identyfikacja parametrów wytrzymałościowych kompozytów węglowych CFRP, *Materiały Budowlane* 2010, 7, 29-31.
- [13] Nagrodzka-Godycka K., *Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych*, Arkady, Warszawa 1999.