

dr inż. Czesław Bywalski¹⁾
ORCID: 0000-0003-0460-9000

Badania odkształceń pełzania wysokowytrzymałej zaprawy cementowej modyfikowanej włóknami stalowymi

Investigation on the creep strains of high-strength cement mortar modified with steel fibers

DOI: 10.15199/33.2023.11.10

Streszczenie. Celem artykułu było przedstawienie wyników, prowadzonych przez 1,5 roku, badań odkształceń pełzania wysokowytrzymałej zaprawy cementowej modyfikowanej włóknami stalowymi. Badano zaprawy z zawartością włókien: 0, 50, 100 i 150 kg/m³. Dodatek włókien nieznacznie zmniejszył odkształcenia pełzania, jednak stopień ich redukcji nie zależał istotnie od ich ilości. Wyniki badań mogą służyć rozszerzeniu baz danych dotyczących pełzania kompozytów cementowych, które aktualnie są zbyt skromne, by było na ich podstawie możliwe opracowanie nowych lub zmodyfikowanie istniejących modeli empirycznych pełzania, na co zwraca się uwagę w publikacjach dotyczących przedstawianej tematyki.

Słowa kluczowe: wysokowytrzymała zaprawa cementowa; włókna stalowe; pełzanie; badania.

Abstract. The aim of the article was to present the results of creep deformation tests conducted for 1.5 years on high-strength cement mortar modified with steel fibers. Mortars with fiber contents of 0, 50, 100 and 150 kg/m³ were tested. The addition of fibers slightly reduced the creep strains, but the degree of their reduction did not depend significantly on the fiber content. The research results can be used to expand the databases on the creep of cement composites, which are currently too modest to enable the development of new or modification of existing empirical models of creep, which is emphasized in current publications on the presented topic.

Keywords: high-strength cement mortar; steel fibers; creep; research.

Wysokowytrzymałe zaprawy cementowe (o wytrzymałości większej od 60 MPa) stosowane są z powodzeniem m.in. do napraw konstrukcyjnych [1], wzmocnienia elementów żelbetowych [2, 3], wykonywania podlewek pod elementy konstrukcyjne i maszyny przemysłowe, kotwienia prętów lub do uzupełniania ubytków betonu w istniejących elementach konstrukcyjnych [4]. Po modyfikacji składu, z zapraw takich można wykonywać również elementy konstrukcyjne [5].

Na przestrzeni ostatnich dwudziestu pięciu lat podejmowano liczne badania skupiające się na cechach reologicznych niestwardniałej zaprawy oraz mechanicznych i skurczu zaprawy stwardniałej [6, 7]. Skład mieszanek wielokrotnie modyfikowano, analizując wpływ modyfikacji na właściwości zapraw. Takie badania prowadzone są obecnie [8]. Jedną z modyfikacji polega na dodaniu do składu zaprawy włókien stalowych m.in. w celu poprawie-

nia cech plastycznych i redukcji odkształceń skurczowych [5]. Ostatnio ukazują się publikacje dotyczące właściwości i wymagań stawianych wysokowartościowym zaprawom cementowym, stosowanym do wypełnień złączy szalunków wykonanych z betonów wysoko- i ultrawysokowartościowych [9]. Obserwuje się również rozwój badań dotyczących różnego rodzaju zapraw formowanych w technologii druku 3D [10, 11].

W przypadku drukowania „warstwa po warstwie” widać postępujące odkształcenia pod wpływem ściskania spowodowanego ciężarem własnym zaprawy. Z tego powodu w zautomatyzowanym procesie następuje opóźniona deformacja, co może zmniejszyć precyzję drukowania lub potencjalnie spowodować uszkodzenie drukowanego elementu [10, 11]. Ten typ opóźnionego odkształcenia występuje podczas drukowania i składa się z pełzania podstawowego, skurczu autogenicznego, skurczu plastycznego i osiadania konsolidacyjnego pod obciążeniem ściskającym [10]. To narastające w czasie odkształcenie pod stałym obciążeniem ściskają-

cym kompozytów cementowych w młodym wieku określa się terminem „pełzanie we wczesnym wieku” [10]. W porównaniu ze stwardniałymi kompozytami cementowymi jest to nieco inny rodzaj pełzania, ale istotny z punktu widzenia zapewnienia precyzji druku 3D i z pewnością ten kierunek badań będzie nadal rozwijany, tym bardziej że, jak wskazano w [10], nie ma wielu badań dotyczących odkształceń pełzania nawet konwencjonalnych kompozytów cementowych, w szczególności zapraw wysokowytrzymałych stosowanych do napraw konstrukcyjnych.

W dostępnej literaturze w odniesieniu do stwardniałych zapraw modyfikowanych zbrojeniem rozproszonym można znaleźć stwierdzenia, iż zarówno rodzaj włókien, jak i ich zawartość wpływają na rozwój pełzania materiałów cementowych, ale nie zbadano jeszcze w pełni, w jaki sposób dodane włókna powodują defekty w kompozytach cementowych [12]. Niewiele prac dotyczy np. wpływu orientacji włókien na właściwości pełzania materiałów cementowych. Przedstawione w [12] wyniki badań odkształceń pełzania zapraw

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; czeslaw.bywalski@pwr.edu.pl

modyfikowanych włóknami stalowymi w ilości 1 – 3% obj. wskazują, iż wpływ ten może sięgać 30%. Z syntetycznego przeglądu stanu wiedzy dotyczącej odkształceń pełzania betonu zbrojonego włóknami [13] wynika, że duża różnorodność parametrów testowych w dalszym ciągu utrudnia sformułowanie modeli konstytutywnych, które pozwoliłyby na właściwe uwzględnienie pełzania w projektowaniu elementów fibrobetonowych, przez co istniejące empiryczne modele pełzania (w tym zawarty w EC2) bez odpowiednich modyfikacji nie są w stanie dobrze opisać rozwoju odkształceń pełzania kompozytów cementowych modyfikowanych włóknami. Do tego momentu należy w pierwszej kolejności rozszerzyć bazy danych dotyczące odkształceń pełzania, np. NU-ITI [13] i pomijać wpływ włókien w projektowaniu elementów konstrukcyjnych, jak proponują autorzy pracy [13].

Nieliczne inne publikacje opisujące badania zapraw wysokowytrzymałych stosowanych do wzmocniania lub wykonywania elementów konstrukcyjnych [14, 15] odnoszą się do zapraw bez włókien. Niewielka liczba publikacji dotyczących odkształceń pełzania zapraw wysokowytrzymałych modyfikowanych włóknami stalowymi może świadczyć o istnieniu luki badawczej [6]. Rezultaty badań belek żelbetonowych wzmocnianych takimi zaprawami wskazują, iż charakteryzują się one podobną lub większą nośnością i plastycznością w przypadku obciążeń doraźnych niż referencyjne belki żelbetowe [2], natomiast nie jest możliwe oszacowanie ugięć długotrwałych ze względu na brak informacji o odkształceniach pełzania zaprawy. W kartach technicznych systemowych zapraw do napraw konstrukcyjnych również próżno szukać informacji o wartości odkształceń pełzania, czy współczynnika pełzania.

W artykule przedstawiono wyniki badań odkształceń pełzania gotowej zaprawy AP VM 100 [4], która po jednym dniu od zaformowania osiąga wytrzymałość na ściskanie przekraczającą 100 MPa [5]. Wyniki te są częścią rezultatów szerszych badań, których celem było zweryfikowanie warunków i możliwości zastosowania badanej zaprawy

do wykonania, podlegających wymianie lub wzmocnieniu, elementów konstrukcyjnych stropu w konkretnym zakładzie przemysłowym (w związku ze zmianą technologii). Nie było możliwości zastosowania elementów prefabrykowanych, jak również dostarczenia mieszanki betonowej pompą do betonu ze względu na brak dostępu do modyfikowanej części stropu i liczne ograniczenia wynikające z produkcji prowadzonej w obiekcie. Inwestorowi zależało na zastosowaniu rozwiązania umożliwiającego obciążenie stropu w ciągu 2 – 3 dni od zakończenia robót betonowych. Wykonawca zaproponował więc wykorzystanie zaprawy AP VM 100 [4], którą dotychczas stosował do wykonywania podlewek. Z niej miały być wykonane m.in. belki stropu. Ze względu na dużą zawartość cementu w składzie zaprawy, podczas wiązania i twardnienia wydziela się duża ilość ciepła, które mogłoby doprowadzić do zarysowania belek. Obawy te były słuszne, co potwierdziły wykonane badania wstępne. Wobec tego zmodyfikowano skład zaprawy przez dodanie włókien stalowych OL 13/0,20. Prezentowane wyniki dotyczą 4. serii zaprawy modyfikowanej w różnym stopniu włóknami stalowymi i mogą służyć rozszerzeniu istniejących baz danych dotyczących odkształceń pełzania kompozytów cementowych.

Skład i przygotowanie zaprawy oraz wykonanie próbek

Szczegółowa receptura zaprawy stanowi tajemnicę wytwórcy. Przedstawiono zatem tylko informacje, które mogą być ujawnione. Suchą zaprawę w 40% stanowi cement CEM I 52,5R i dodatki, a w 60% kruszywo o uziarnieniu do 4 mm o specjalnie dobranym składzie granulometrycznym. Przeanalizowano cztery serie kompozytu różniące się zawartością włókien stalowych (tabela 1). Zastosowano włókna proste OL 13/0,20 o smukłości 65 ($l = 13 \text{ mm}$, $d = 0,20 \text{ mm}$).

Głównymi kryteriami wyboru włókien była dostępność na rynku i możliwość zastosowania jako rozproszonego zbrojenia konstrukcyjnego. Dodatek włókien pogarsza urabialność zaprawy i zmniejsza jej rozptył [5]. W związku z tym we wstępnej fazie badań analizo-

Tabela 1. Skład badanych mieszanek
Table 1. Composition of the tested mixtures

Składniki	Seria			
	A	B	C	D
Włókna stalowe OL 13/0,20 [kg/m ³]	50	100	150	0
Włókna stalowe OL 13/0,20 [%]	0,64	1,27	1,91	0
Woda [kg/m ³]	228			
Zaprawa AP VM 100 [kg/m ³]	2165			

wano wpływ dodatku włókien na te parametry, jak również na gęstość kompozytu. Przyjęto, iż jedynym składnikiem kompozytu, którego wartość będzie zmieniana, będą włókna stalowe (by nie ingerować w skład chemiczny gotowej zaprawy). Na wniosek projektanta i wykonawcy elementów konstrukcyjnych, które projektowano z tego kompozytu i które miały być wykonane w konkretnym zakładzie przemysłowym, należało określić maksymalny dodatek włókien gwarantujący otulenie prętów zbrojenio- wych umieszczonych w formach oraz zagęszczenie zaprawy samoczynne lub przez sztychowanie (brak możliwości zastosowania zagęszczania mechanicznego). Podczas tych analiz określono, że maksymalna zawartość włókien w 1 m³ wynosi 150 kg. Tak duża ilość włókien powodowała problemy technologiczne przy formowaniu zaprawy, jednak na prośbę wykonawcy analizowano również tę serię kompozytu.

Składniki mieszanki, poza włóknami stalowymi, dozowano wagowo z dokładnością do 5 g, a włókna stalowe do 0,1 g. Wodę zarobową podzielono na 2 części w proporcjach 2/3 i 1/3 całości. W pierwszej kolejności wymieszano suchą zaprawę w betoniarce przeciwbieżnej, po czym dodano wodę w ilości 2/3 docelowej zawartości i mieszano przez 3 min. Następnie stopniowo dozowano pozostałą część wody i mieszano całość przez kolejne 2 min. Łączny czas przygotowania mieszanki niezawierającej włókien (seria D) wynosił ok. 6 min. W przypadku serii A, B i C po dodaniu wody dozowano włókna, wysypując je do pracującej betoniarki, przez co łączny czas mieszania wydłużył się maksymalnie o 3 min w przypadku serii C. Bezpośrednio po wymieszaniu przystąpiono do układania mieszanki betonowej w formach, a następnie próbki przy-

kryto folią i pozostawiono w temperaturze 20°C do momentu rozformowania, które nastąpiło po 22. h. Po pięć próbek z każdej serii pobrano do oznaczenia jednodniowej wytrzymałości na ściskanie i gęstości, a pozostałe przechowywano w stałych warunkach ciepło-wilgotnościowych do momentu kolejnych badań (temperatura powietrza wynosiła 20 ± 2°C, wilgotność 95 ± 3%).

Opis badań

Wytrzymałość na ściskanie oznaczono na próbkach sześciennych o boku 150 mm w wieku 1, 2, 7, 28 i 90 dni [5]. Odształcenia pełzania przy ściskaniu oznaczano na próbkach walcowych o średnicy $d = 113$ mm i wysokości $h = 350$ mm (smukłość $h/d \approx 3$). Do próbek przytwierdzono trzy czujniki zegarowe umożliwiające pomiar przemieszczeń z dokładnością do 0,001 mm. Mierzono przemieszczenie reperów przyklejonych do próbek w odległości bazowej 250 mm, rozmieszczonych co 120° na obwodzie próbki. Następnie po dwie próbki z każdej serii umieszczono w pelzarce i wprowadzono obciążenie 160 kN. Wiek kompozytu w chwili obciążenia wynosił dwie doby. Właściwe obciążenie ściskające wprowadzano w trzech krokach: 1/3, 2/3 i pełnej wartości obciążenia docelowego, wykonując jednocześnie odczyty wskazań czujników w poszczególnych krokach obciążania i 5 min po zakończeniu obciążania, które realizowano w czasie krótszym niż 10 min. Odczyty czujników w trakcie oznaczania odształceń pełzania wykonywane były z następującą częstotliwością: codziennie w pierwszym tygodniu; co najmniej 1 raz w tygodniu przez okres pierwszego miesiąca i co najmniej 1 raz w miesiącu w pozostałym okresie. Odształcenia całkowite badanych kompozytów w czasie (t) stanowią sumę odształceń: sprężystego ε_{el} ; pełzania $\varepsilon_c(t)$ i skurczu $\varepsilon_{sh}(t)$, co przedstawia wyrażenie (1):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

W celu wydzielenia odształceń pełzania konieczne było więc równoległe oznaczenie odształceń skurczu, które w przypadku każdej serii wykonywano na dwóch próbkach walcowych o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm. Umiesz-

czone je na stojakach do pomiaru odształceń skurczowych wyposażonych w czujniki zegarowe o dokładności 0,001 mm. Baza pomiarowa wynosiła 350 mm.

Badania odształceń reologicznych analizowanych kompozytów wykonywano pod kątem planowanego praktycznego ich zastosowania do wykonania elementów konstrukcyjnych stropu w obiekcie konkretnego zakładu przemysłowego z uwzględnieniem zadanych warunków termicznych i wilgotnościowych. Z informacji uzyskanych od służb właściciela obiektu wynikało, iż w strefie planowanego wykonania elementów konstrukcyjnych z badanych kompozytów, wilgotność powietrza przez 4 ÷ 5 miesięcy w roku będzie wynosiła ok. 40%, a temperatura 20°C (względnie technologiczne). Wystąpienie takich warunków było zakładane bezpośrednio po wykonaniu elementów konstrukcyjnych, dlatego przez 5 pierwszych miesięcy badanie odształceń pełzania prowadzono w stałych warunkach ciepło-wilgotnościowych, tzn. temperatura powietrza wynosiła 20°C ± 2°C, zaś wilgotność względna 40% ± 4%. Natomiast po tym okresie, a dokładnie od 153. dnia od obciążenia warunki termiczno-wilgotnościowe nie były stabilizowane – wilgotność powietrza wynosiła 45 ÷ 65%, a temperatura 18 ÷ 24°C. Należy podkreślić, iż warunki te były jednakowe w przypadku wszystkich badanych serii kompozytów, co pozwala na porównywanie wyników badań również po 153. dniu od obciążenia. Pomiar odształceń kompozytów zakończono po 548 dniach (1,5 roku).

Wyniki badań i ich analiza

Szczegółowe wyniki badań dotyczące wytrzymałości kompozytu na ściskanie przedstawiono w [5], a średnie wartości wytrzymałości i gęstości w tabeli 2.

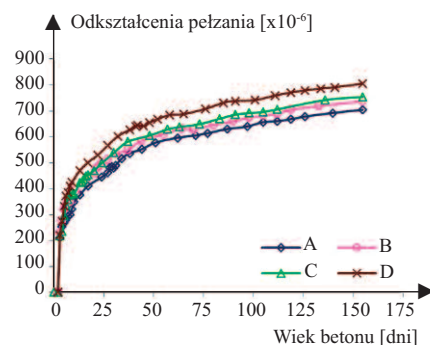
Tabela 2. Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie i gęstość badanych kompozytów
Table 2. Average value of compressive strength and density of the tested composites

Seria	Zawartość włókien [kg/m ³]	f ¹ _{cm,cube} [MPa]	f ² _{cm,cube} [MPa]	f ⁷ _{cm,cube} [MPa]	f ²⁸ _{cm,cube} [MPa]	f ⁹⁰ _{cm,cube} [MPa]	Gęstość [kg/m ³]
A	50	123,10	124,09	126,43	130,13	132,93	2350,06
B	100	117,62	117,84	118,60	124,42	129,29	2346,78
C	150	109,03	109,93	111,00	118,22	123,94	2334,51
D	0	106,82	107,26	108,41	110,33	111,36	2374,14

Charakterystyczną cechą badanych kompozytów jest bardzo duża wytrzymałość wczesna i nieznaczny dalszy przyrost wytrzymałości w czasie.

Na rysunku 1 przedstawiono wydzielone odształcenia pełzania badanych zapraw do 153. dnia od obciążenia, które nastąpiło w wieku 2 dni, kiedy warunki badań były stabilizowane (temperatura 20°C ± 2°C i wilgotność względna 40% ± 4%), a na rysunku 2 odształcenia pełzania w całym okresie badań, tj. również od 153. do 548. dnia od obciążenia, kiedy warunki termiczno-wilgotnościowe nie były stabilizowane (temperatura 18 ÷ 24°C i wilgotność względna 45 ÷ 65%). Odształcenia pełzania po 153 dniach od obciążenia wynosiły: 704·10⁻⁶, 738·10⁻⁶, 755·10⁻⁶ i 804·10⁻⁶ odpowiednio dla serii: A, B, C i D. Z kolei po 1,5 roku od obciążenia odształcenia te wynosiły odpowiednio: 864·10⁻⁶, 888·10⁻⁶, 944·10⁻⁶ i 981·10⁻⁶.

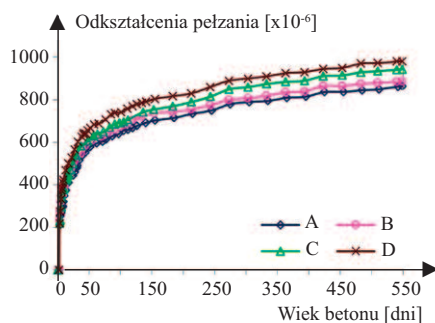
Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowana zawartość włókien stalowych powoduje nieznaczne zmniejszenie wartości odształceń pełzania kompozytu (rysunek 1). Wszystkie zaprawy modyfikowane włóknami charakteryzowały się wprawdzie mniejszy-



Rys. 1. Przyrost w czasie (do 153. dnia) odształceń pełzania badanych kompozytów obciążonych w wieku 2 dni

Fig. 1. Increment over time (up to day 153) of creep strains of the tested composites loaded at the age of 2 days

mi odkształceniami pełzania niż zaprawa bez włókien, ale najlepsze rezultaty otrzymano w przypadku serii A. Zwiększanie zawartości włókien skutkowało większymi odkształceniami pełzania niż serii A, ale jednocześnie mniejszymi niż serii D. Z publikacji dotyczących odkształceń pełzania fibrobetonów wynika, iż dodanie włókien wpływa na nieznaczne zmniejszenie lub zwiększenie odkształceń pełzania [13, 16]. Jest to widoczne również w przypadku badanych zapraw (rysunki 1 i 2). W przypadku serii A usztywniający wpływ obecności włókien jest zauważalny, ale w kolejnych seriach (B i C) zwiększenie zawartości włókien znacznie pogarsza jakość struktury, a przez to usztywniający wpływ przestaje odgrywać istotną rolę.



Rys. 2. Przyrost w czasie (do 548. dnia) odkształceń pełzania badanych kompozytów obciążonych w wieku 2 dni

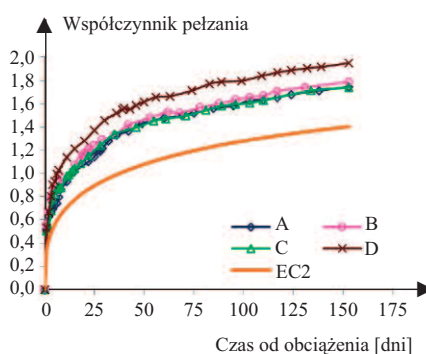
Fig. 2. Increment over time (up to day 548) of creep strains of the tested composites loaded at the age of 2 days

Zgodnie z Eurokodem 2 [17], odkształcenia pełzania są uwzględniane w obliczeniach elementów z betonu w sposób uproszczony przez współczynnik pełzania. Jego wartość końcowa w przypadku betonu zwykłego po 28 dniach dojrzewania (wiek odniesienia) wynosi najczęściej $1,5 \div 3,5$ [18]. Natomiast w przypadku betonu o ultrawysokiej wytrzymałości współczynnik pełzania jest z reguły mniejszy od 1,0, a po poddaniu go obróbce cieplnej wartość tę można zmniejszyć nawet czterokrotnie [19]. W przypadku analizowanych zapraw szybkostrzalnych, gdyby założyć ich wykorzystanie do wykonania lub wzmocnienia belek żelbetowych i szybkiego obciążenia po wzmocnieniu, należałoby przyjąć młodszy wiek odniesienia betonu w celu określenia współczynnika pełzania, np. $t_0 = 2$ dni, jeśli obciążenie belki nastąpiłoby

po dwóch dniach od wykonania lub wzmocnienia, bądź wiek, w którym wytwórca zaprawy deklaruje osiągnięcie przez nią projektowanych parametrów, przede wszystkim wytrzymałości wczesnej. W dalszych analizach przyjęto wiek odniesienia zaprawy 2 dni. Przyjęto również $E_{cm}(t_0) = E_{cm}$, co pozwala zapisać współczynnik pełzania jako iloraz odkształcenia pełzania i odkształcenia sprężystego (2):

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_c(t)}{\varepsilon_{el}} \quad (2)$$

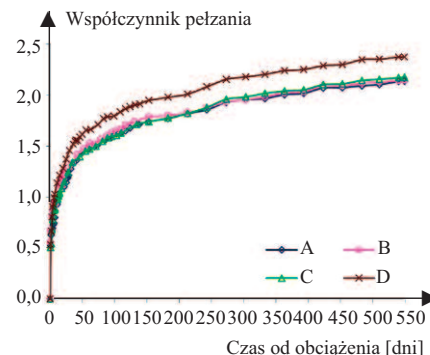
Średnie odkształcenie sprężyste badanych kompozytów w 153. dniu od obciążenia wynosiło: $404 \cdot 10^{-6}$; $413 \cdot 10^{-6}$; $433 \cdot 10^{-6}$ i $413 \cdot 10^{-6}$ odpowiednio w przypadku serii A, B, C i D. Wykorzystując zależność (2) i wyniki wykonanych badań, obliczono wartość współczynnika pełzania kompozytów, które przedstawiono na rysunku 3 (do 153. dnia od obciążenia – stabilizowane warunki termiczno-wilgotnościowe) i na rysunku 4 (w całym okresie badań wynoszącym 1,5 roku). Na rysunku 3 przedstawiono również przyrost współczynnika pełzania betonu klasy C90/105 zgodnie z Eurokodem 2. Na rysunku 4 nie zamieszczono tej zależności, ponieważ od 153. do 548. dnia warunki termiczno-wilgotnościowe nie były stabilizowane.



Rys. 3. Zmiana w czasie (do 153. dnia) współczynnika pełzania badanych zapraw obciążonych w wieku 2 dni i betonu klasy C90/105 wg Eurokodu 2

Fig. 3. Change over time (up to day 153) of the creep coefficient of tested mortars loaded at the age of 2 days and concrete class C90/105 according to Eurocode 2

Z rysunków 3 i 4 wynika, iż dodanie do zaprawy włókien stalowych spowodowało zmniejszenie współczynnika pełzania o ok. 10%. Widać również, jeszcze bardziej niż na przykładzie od-



Rys. 4. Zmiana w czasie (do 548. dnia) współczynnika pełzania badanych zapraw obciążonych w wieku 2 dni

Fig. 4. Change over time (up to day 548) of the creep coefficient of tested mortars loaded at the age of 2 days

kształceń pełzania, iż zwiększenie zawartości włókien praktycznie nie wpływa na wartość współczynnika pełzania. Może to być spowodowane zwiększeniem porowatości kompozytu, a przez to pogorszeniem jego struktury, co ma wpływ na wartość modułu sprężystości podłużnej i w konsekwencji odkształcenia sprężystego. Po 153 dniach od obciążenia próbek kompozytu w wieku 2 dni współczynnik pełzania zapraw modyfikowanych włóknami stalowymi osiągał niemal identyczne wartości i wynosił: 1,74, 1,79 i 1,74 odpowiednio w przypadku serii A, B i C oraz 1,94 w przypadku zaprawy bez włókien (seria D). Gdyby odnieść te wartości do współczynnika pełzania betonu zwykłego, np. klasy C30/37, to wydają się one duże, ale porównując współczynniki pełzania betonu C30/37 i badanych zapraw, należy pamiętać, iż te ostatnie obciążono w młodym wieku (2 dni), a im młodszy wiek kompozytu cementowego w chwili obciążenia, tym większe odkształcenia pełzania i w konsekwencji współczynnik pełzania. Zgodnie z zależnościami normowymi [17], w przypadku betonu klasy C30/37, wieku 2 dni w chwili obciążenia, wilgotności względnej otoczenia 40%, po 153 dniach od obciążenia, współczynnik pełzania wyniesie ponad 3,7.

Znajomość współczynnika pełzania jest potrzebna m.in. do szacowania ugięcia belek żelbetowych, sprężonych, zespolonych, a także do obliczenia strat sprężania, czy szacowania efektów II rzędu w przypadku elementów ścisanych. Ze względu na brak informacji

o odkształceniach pełzania lub współczynnika pełzania zapraw wysokowytrzymałych, również systemowych do naprawy konstrukcji, czasami spotyka się próby szacowania współczynnika pełzania z wykorzystaniem zasad normowych, np. z Eurokodu 2 [17]. **Takie podejście nie jest poprawne**, co można zauważyć, analizując rysunek 3. Na tle wartości dotyczących badanych zapraw przedstawiono na nim zmianę w czasie współczynnika pełzania betonu klasy C90/105, obliczonego zgodnie z Eurokodem 2 [17]. W obliczeniach przyjęto: wytrzymałość na ściskanie 90 MPa, wiek betonu w chwili obciążenia 2 dni, wilgotność względną otoczenia 40% i miarodajny wymiar przekroju 56,5 mm odpowiadający próbkom, na których oznaczano odkształcenia pełzania zapraw. Widać, iż wykorzystanie zależności normowych [17] prowadzi do niedoszacowania współczynnika pełzania. W przypadku obciążenia betonu w wieku 2 dni, po 153 dniach od obciążenia współczynnik pełzania wyniósł 1,38, natomiast dla badanej zaprawy bez dodatku włókien uzyskano o 41% większe wartości, a dla pozostałych o $26 \div 30\%$.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki, prowadzonych przez 1,5 roku, badań laboratoryjnych odkształceń pełzania gotowej szybkostrawnej, samozagęszczalnej i wysokowytrzymałej zaprawy cementowej pokazują, iż dodatek włókien stalowych w analizowanych ilościach nieznacznie poprawił jej wytrzymałość na ściskanie i nieznacznie zmniejszył odkształcenia pełzania w porównaniu z zaprawą bez włókien. Obecność włókien stalowych miała pomijalnie mały wpływ na wartość odkształceń pełzania, a odkształcenia te nie zależały w znacznym stopniu od ilości dodatku włókien. Chociaż wszystkie zaprawy modyfikowane włóknami charakteryzowały się mniejszym odkształceniem pełzania niż zaprawa bez włókien, to w świetle opublikowanych w literaturze wyników badań dla fibrobetonów wnioski płynące z przedstawianych rezultatów własnych badań zapraw nie mają charakteru ogólnego. Mogą jednak zostać wykorzystane do rozszerzenia

istniejących baz danych dotyczących odkształceń pełzania kompozytów cementowych.

Z wykonanych badań i analiz wynika również, iż współczynnik pełzania zapraw modyfikowanych włóknami stalowymi był niemal identyczny dla rozpatrywanych zawartości włókien i o ok. 10% mniejszy niż dla zaprawy bez włókien. Zwrócono uwagę, iż wykorzystanie zależności normowych [17] do wyznaczenia współczynnika pełzania badanych zapraw obciążonych w bardzo młodym wieku, prowadzi do niedoszacowania wartości tego współczynnika – w badaniach uzyskano wartości o $26 \div 41\%$ większe i przy braku informacji w tym zakresie w kartach technicznych powinno się ją ustalać doświadczalnie. Wskazuje to również na konieczność kontynuowania badań odkształceń pełzania kompozytów cementowych w celu rozszerzenia baz danych, aby na ich podstawie możliwe było opracowanie nowych lub dokonanie modyfikacji istniejących modeli empirycznych pełzania kompozytów cementowych, na co zwraca się uwagę w aktualnych publikacjach dotyczących tematyki pełzania takich kompozytów, np. [13].

Literatura

- [1] Shannag MJ. High-performance cementitious grouts for structural repair. *Cement and Concrete Research*, 2002; [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00710-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00710-X).
- [2] Peng G, Hu X, Niu D, Zhong S, Huang D. Experimental and theoretical study on the flexural behavior of RC beams strengthened with cementitious grout. *Engineering Structures*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114713>.
- [3] Peng G, Hu X, Niu D, Zhong S. Study on the axial compression behavior of RC columns strengthened with cementitious grout. *Engineering Structures*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115742>.
- [4] Karta informacji technicznej AP VM 100 Zaprawa do podlewek. AP Serwis Inżynieria Budowlana.
- [5] Bywalski C, Kamiński M, Michalski P. O perspektywach nowych zastosowań szybkostrawnych zapraw mineralnych. *Materiały Budowlane*. 2014; 6: 70-1.
- [6] da Rocha Gomes S, Ferrara L, Sanchez L, Sanchez Moreno M. A comprehensive review of cementitious grouts: Composition, properties, requirements and advanced performance. *Constr. Build. Mater*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130991>.
- [7] Ma C, Tan Y, Li E, Dai Y, Yang M. High-Performance Grouting Mortar Based on Mineral Admixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015; <http://dx.doi.org/10.1155/2015/425456>.
- [8] Yang Y, Chen B, Chen Y, Liu F, Xie X, Guo W., Wang H. Effect of admixtures and PVA fiber on the mechanical properties of high strength cementitious grout. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01884>.
- [9] Yang Y, Chen B, Chen Y, Liu F, Xie X, Guo W, Wang H, Development of a high strength cementitious grout for filling the joints of UHPC permanent formwork. *Developments in the Built Environment*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100120>.
- [10] Chang Z, Liang M, Xu Y, Wan Z, Schlagen E, Šavija B. Early-age creep of 3D printable mortar: Experiments and analytical modelling. *Cement and Concrete Composites*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104973>.
- [11] Esposito L, Casagrande L, Menna C, Asprone D, Auricchio F. Early-age creep behaviour of 3D printable mortars: experimental characterisation and analytical modelling. *Mater. Struct*. 2021; <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01800-z>.
- [12] Liang S, Du H, Liu Y, Chen Y, Liu J, Wei Y. Experimental study and mesoscale finite element modeling of elastic modulus and flexural creep of steel fiber-reinforced mortar. *Constr. Build. Mater*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129875>.
- [13] Tošić N, Aidarov S, de la Fuente A. Systematic review on the creep of fiber-reinforced concrete. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13225098>.
- [14] Zhang Y, Zhu Y, Xu Z, Shao X. Long-term creep behavior of NC filled UHPC tube composite column. *Engineering Structures*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114206>.
- [15] Kamiński M, Bywalski C, Musiał MP, Trapko T, Michalski P. Rheological strains of high-performance expansive mortar. *Proceedings of the eighth international conference: Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete structures, Ise-Shima, Japan, 30 September-2 October 2008*. Vol. 1 / eds by Tadaaki Tanabe [i in.]. Leiden : CRC Press/Balkema, 2008, s. 337-342.
- [16] Bywalski C, Kamiński M, Maszczak M, Balbus Ł. Influence of steel fibres addition on mechanical and selected rheological properties of steel fibre high-strength reinforced concrete. *Arch. Civ. Mech. Eng*. 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.05.013>
- [17] PN-EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [18] Knauff M. Obliczanie konstrukcji żelbetonowych według Eurokodu 2. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2013.
- [19] Jasiczak J, Wdowska A, Rudnicki T. *Betony ultrawysokowartościowe*. Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu; 2008.

Przyjęto do druku: 23.10.2023 r.