

Skurcz betonów wysokowartościowych – analiza przypadku

SHRINKAGE FOR HIGH STRENGTH CONCRETES – THE CASE ANALYSIS

Streszczenie

Skurcz betonów zwykłych, w odróżnieniu od betonów wysokiej wytrzymałości, jest zjawiskiem dobrze znanym i udokumentowanym. Znajomość i uwzględnienie przebiegu odkształceń własnych betonu jest niezwykle istotna dla poprawnego zaprojektowania i wykonania konstrukcji.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza przebiegu odkształceń skurczowych drobnokruszywowych betonów wysokiej wytrzymałości. Znajomość tego zjawiska jest niezwykle ważna dla praktyki inżynierskiej, albowiem w dostępnej literaturze znajdują się sprzeczne informacje dotyczące odkształceń własnych betonów BWW.

W artykule poddano analizie wyniki badania serii betonów drobnokruszywowych o wytrzymałości od 60 do 80 MPa. Zaprezentowana została również weryfikacja modeli dotyczących się prognozowania wielkości odkształceń skurczowych tego typu betonów, zawartych w normie PN-EN 1992-1-1 i fib Model Code 2010.

Abstract

Shrinkage for normal strength concretes in comparison to high strength concretes is quite well understood and documented phenomenon. Taking into account the course of concrete self-strains constitutes very important issue in the proper design and execution of the structure.

The paper focuses on the analysis of shrinkage strains for fine-aggregate high strength concretes. Knowledge of this phenomenon is crucial for engineering practice as there may be found contradictive information in the literature concerning high strength concrete self-strains.

In the paper there are analyzed tests results for series of fine-aggregate concretes with compressive strength from 60 to 80 MPa. Verification of models for forecasting the shrinkage strain for such type of concretes according to the code PN-EN 1992-1-1 and fib Model Code 2010 was also presented.

1. Wprowadzenie

Na obecnym etapie rozwoju technologii betonu obserwuje się narastające znaczenie problemu skurczu betonu. Powodowane jest to koniecznością czynienia zadość wysokim wymaganiom stawianym przez użytkowników, w których nadmierny skurcz betonu jest istotnym ograniczeniem projektowym i wykonawczym. Szczególnie dotyczy to wykonywania bezspoinowych nawierzchni drogowych, lotniskowych i posadzek przemysłowych, gdzie skurcz ogranicza możliwości kształtowania konstrukcji, a jego minimalizacja stanowi istotny problem.

Skurcz betonu wpływa w sposób bezpośredni na możliwość pojawienia się odkształceń elementów konstrukcyjnych (zmianę wymiarów, wyboczenie, deformację), a w konsekwencji na pojawienie się zarysowań, które skutkują nieuchronnym obniżeniem trwałości konstrukcji, czy też stratą siły występną w przypadku elementów sprężanych.



Fot. 1. Zarysowana nawierzchnia płyty postojowej – Lotnisko Chopina w Warszawie 2016

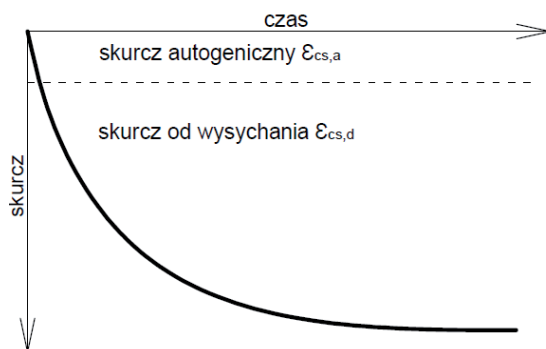
2. Zjawisko skurczu i narastania betonu

Zmiany objętościowe betonu powodowane są wieloma czynnikami związanymi zarówno z jego strukturą, jak również zmianami o naturze fizyko-chemicznej, które zachodzą w zaczynie cementowym (skurcz autogeniczny) i oddziaływaniem czynników zewnętrznych (przede wszystkim zmiany objętości spowodowane wahaniami wilgotności, zmianą temperatury czy też karbonatyzacją).

Końcowa wartość skurczu betonu stanowi wypadkową zmian spowodowanymi wymienionymi wyżej czynnikami.

Na końcową wielkość odkształceń skurczowych betonu ϵ_{cs} składają się zarówno odkształcenia autogeniczne oraz spowodowane jego wysychaniem [4].

Skurcz autogeniczny (zwany inaczej chemicznym, samoczynnym) pojawia się w pierwszych godzinach od zaformowania elementu i powodowany jest reakcją hydratacji cementu, której produkty mają mniejszą objętość aniżeli materiały biorące w niej udział [5].



Rys. 1. Typowy przebieg odkształceń skurczowych betonu [4]

Co ważne, w przypadku braku dostępu wody z zewnątrz, skurczowi chemicznemu towarzyszy skurcz spowodowany utratą wody niezbędnej do przebiegu reakcji hydratacji cementu (tzw. samoosuszanie betonu). Jest to szczególnie widoczne w przypadku betonów wykonanych z dużą ilością spoiwa (powyżej 380 kg/m^3). W takim przypadku obserwuje się we wczesnym okresie dojrzewania (pierwsze 24 h) zjawisko krótkotrwałego narastania autogenicznego, które spowodowane jest rozszerzalnością termiczną składników, wywołaną ciepłem hydratacji.

O ile zjawisko to w przypadku betonów zwykłych jest w praktyce pomijalne, to w zakresie stosowania betonów wysokiej wytrzymałości (powyżej klasy C50/60) i mieszanek samozagęszczalnych SCC ze względu na ilość stosowanego cementu i ograniczenia odnośnie maksymalnego wymiaru kruszywa, które działa na skurcz łagodząco i tym samym winno zostać uwzględnione na etapie projektowania i wykonania konstrukcji.

Skurcz autogeniczny stanowi niewielki udział w całkowitych odkształceniach skurczowych (rys. 1), ale w wielu przypadkach winien on być uwzględniany w projektowaniu konstrukcji, szczególnie tych które wykonywane są w technologii betonu SCC i z wykorzystaniem betonu drobnokruszywowego ($D_{max} \leq 8 \text{ mm}$). Odgrywa on kluczową rolę w przypadku projektowania konstrukcji zespolonych typu beton-beton, a także przy planowaniu długich przerw w betonowaniu elementów [3].

Skurcz powodowany wysychaniem (nazywany również skurczem fizycznym) powodowany jest utratą wody przez stwardniały beton na skutek odparowania. Odkształcenia spowodowane zmianą wilgotności przebiegają znacznie wolniej, aniżeli skurcz chemiczny a ich efekty widoczne mogą być nawet na przestrzeni kilkudziesięciu lat.

Mechanizm skurczu wysychania jest analogiczny jak dla skurczu autogenicznego, powodowanego samowysychaniem [5, 3]. Jednak w przeciwieństwie do skurczu autogenicznego, zmiany objętości betonu (skurcz lub narastanie), powodowane wysychaniem są zjawiskiem częściowo odwracalnym [6]. Ponowne nawilżenie betonu redukuje skurcz powodowany wysychaniem, ale nie jest w stanie całkowicie go skompensować ze względu na postępujący proces hydratacji, przyczyniający się do doszczelnienia struktury matrycy, a tym samym zmniejszenia możliwości absorpcji wody. Z tego też względu niezwykle istotna z uwagi na minimalizację skurczu wysychania, a tym samym ryzyko zarysowania elementu, jest staranna pielęgnacja betonu we wczesnym okresie dojrzewania.

Do najważniejszych czynników, które wpływają na wielkość skurczu należy zaliczyć ilość i rodzaj składników mieszanki betonowej, warunki otoczenia, właściwą pielęgnację betonu oraz geometrię (szczególnie tzw. moduł powierzchniowy) elementu.

Pośród czynników materiałowych dla oceny wielkości odkształceń skurczowych, niezbędne jest uwzględnienie:

- stosunku w/c ,
- rodzaju i ilości cementu,
- ilości i rodzaju kruszywa,
- wilgotności i temperatury otoczenia,
- wymiarów elementu i ewentualnie ograniczeń swobody odkształceń (zbrojenie, tarcie o podłoże, więzy konstrukcji).

Z pośród wyżej wymienionych, najistotniejszym, wewnętrznym czynnikiem wpływającym na wielkość odkształceń skurczowych jest wielkość stosunku w/c , który wpływa bezpośrednio na strukturę i rozkład wielkości porowatości zaczynu cementowego i warstwy kontaktowej na styku kruszywo-zaczyn [4, 5, 6].

Zmniejszeniu wartości współczynnika w/c towarzyszy spadek ogólnej porowatości zaczynu i udziału porów kapilarnych w strukturze matrycy cementowej, a w konsekwencji utrudnienie ruchu wody, który jest bezpośrednią przyczyną odkształceń skurczowych.

Kolejnym istotnym czynnikiem determinującym wielkość skurczu betonu jest zawartość kruszywa, a szczególnie jego grubych frakcji. Zależność ta jest pośrednio związana z ilością zaczynu cementowego w jednostce objętości betonu. Tym samym wzrost ilości kruszywa w jednostce objętości betonu wpływa na zmniejszenie wielkości odkształceń skurczowych betonu.

O ile w dostępnej literaturze szeroko są znane i publikowane wyniki badań wpływu wielkości współczynnika w/c , rodzaju zastosowanego cementu, dodatków i domieszek chemicznych na skurcz betonów zwykłych, o tyle brak jest potwierdzonych metod oceny i prognozowania odkształceń betonów wysokiej wytrzymałości (powyżej C50/60), których znaczenie we współczesnym budownictwie rośnie.

Do prawidłowej oceny wpływu skurczu betonu na element konstrukcyjny, konieczne jest również uwzględnienie nie tylko wielkości odkształceń ale także typu i rozmiaru elementu, jego umiejscowienia i warunków środowiska eksploatacji.

3. Badania doświadczalne

Celem zrealizowanego programu doświadczalnego była ocena wielkości odkształceń skurczowych drobnokruszywowych ($D_{max}=8$ mm) betonów wysokiej wytrzymałości, klasy odpowiednio C55/67 i C60/75 wg normy [9]. Tłem dla tych mieszanek był beton zwykły klasy C25/30. Wszystkie mieszanki betonowe wyprodukowano na profesjonalnej wytwórni betonu towarowego należącej do CEMEX Polska Sp. z o.o. i dostarczono do laboratorium IMIKB Politechniki Krakowskiej.

W teoretycznej części pracy oceniano adekwatność modeli pozwalających na prognozowanie odkształceń wielkości odkształceń skurczowych, zawartych w Eurokod 2 [7] i ModelCode [1]. Wyniki przedmiotowych obliczeń skonfrontowano z rzeczywistymi, zanotowanymi wielkościami odkształceń skurczowych badanych betonów wysokiej wytrzymałości.

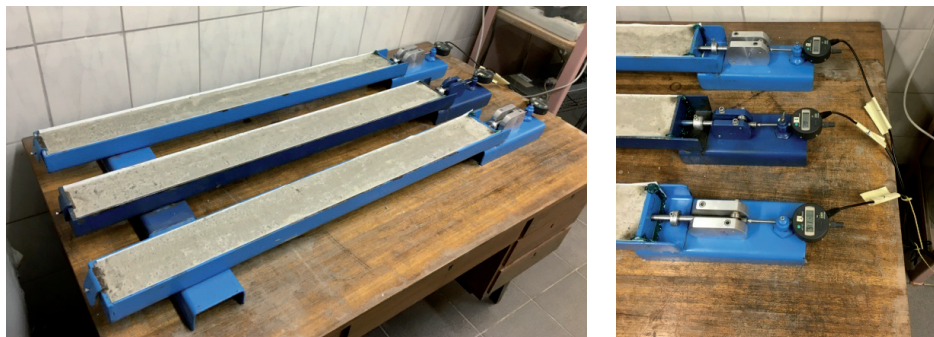
Badanie skurczu betonu przeprowadzono nienormową metodą z wykorzystaniem rygnię skurczowych systemu Schleibinger. W badaniu tym pomiar odkształceń skurczowych betonowych próbek, zaformowanych w rynnach o długości 1000 mm i przekroju 100×50 mm, dokonywany jest automatycznie, co pół godziny przez elektroniczne czujniki przemieszczenia firmy Mitutoyo, rejestrujące zmiany długości próbek i automatycznie

przesyłające wyniki do komputera, będącego częścią aparatury badawczej. Dzięki dużej precyzji otrzymywanych wyników (dokładność pomiaru $\pm 0,01$ mm) oraz ograniczeniu roli człowieka w procesie pomiarowym (brak konieczności rozformowywania próbek, pomiar dokonywany i zapisywany całkowicie automatycznie) metoda ta jest coraz częściej stosowana w praktyce inżynierskiej.

Procedura badawcza obejmowała następujące czynności:

- wyłożenie powierzchni rynny folią teflonową,
- zamocowanie na krańcach rynny końcówek z trzpieniami, z których jedna jest przesuwna, co umożliwi pomiar wartości zmian długości próbki,
- wypełnienie formy mieszanką betonową w dwóch warstwach oraz ich zagęszczenie,
- zainstalowanie czujnika mierzącego zmianę długości próbki do ruchomej końcówki rynny oraz podłączenie go do zestawu komputerowego z aplikacją automatycznie zapisującą wyniki pomiarów,
- przechowywanie próbek w pomieszczeniu o stałej temperaturze powietrza wynoszącej $18 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 28 dni od momentu zaformowania,
- pomiar wartości skurczu próbek dokonywany był automatycznie co pół godziny przez 28 dni dojrzewania betonu.

Na fotografii 2 pokazano widok aparatury i próbek betonu podczas badania wielkości odkształceń skurczowych.



Fot. 2. Rynny skurczowe wraz z czujnikami przemieszczenia do pomiaru odkształceń betonu

4. Analizy numeryczne

Wartość skurczu można również wyznaczyć drogą analityczną, korzystając z wzorów zawartych w normach. W niniejszym artykule zostanie obliczona wartość skurczu wg wytycznych zawartych w Eurokod 2 [7] i ModelCode [1]. Poniżej znajdują się obydwie procedury obliczeniowe.

Całkowite odkształcenie skurczowe składa się z dwóch składników, odkształcenia skurczowego spowodowanego wysychaniem ε_{sd} i autogenicznego odkształcenia skurczowego ε_{ca} . Odkształcenie spowodowane wysychaniem rozwija się powoli, ponieważ zależy od migracji wody przez stwardniały beton. Autogeniczne odkształcenia skurczu rozwijają się w czasie twardnienia betonu, dlatego główna jego część powstaje w pierwszych dniach po ułożeniu betonu. Skurcz autogeniczny jest liniową funkcją wytrzymałości betonu na ściskanie.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cs} &= \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \\ \varepsilon_{cd}(t) &= \beta_{ds}(t, t_s) k_h \varepsilon_{cd,0} \\ \varepsilon_{cd,0} &= 0,85(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm,0}}\right) \beta_{RH} \cdot 10^{-6} \\ \beta_{RH} &= 1,55 \left(1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right) \\ \beta_{ds}(t, t_s) &= \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,04\sqrt{h_0^3}} \\ h_0 &= \frac{2A_c}{u} \\ \varepsilon_{ca}(t) &= \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty) \\ \varepsilon_{ca}(\infty) &= 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \\ \beta_{as}(t) &= 1 - \exp(-0,2t^{0,5})\end{aligned}$$

Współczynniki α_{ds1} i α_{ds2} zależne są od klasy cementu. Wartość $f_{cm,0}$ należy przyjąć 10 MPa. RH to względna wilgotność otoczenia w [%], wartość RH_0 należy przyjąć 100%. Współczynnik k_h zależny jest od wartości h_0 i dobiera się go z tablicy 3.3 znajdującej się w Eurokod 2 [7]. Współczynnik t oraz t_s to odpowiednio wiek betonu w dniach w rozważanej chwili i na początku wysychania (lub pęcznienia). f_{cm} i f_{ck} to wytrzymałość średnia i charakterystyczna betonu na ściskanie.

W ModelCode [1] skurcz podzielony jest jako skurcz podstawowy $\varepsilon_{cbs}(t)$, który zachodzi nawet gdy nie jest możliwa utrata wilgoci oraz $\varepsilon_{cds}(t)$, będący dodatkowym skurczem, gdy zachodzi utrata wilgoci.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cs}(t, t_s) &= \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \\ \varepsilon_{cbs}(t) &= \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t) \\ \varepsilon_{cds}(t, t_s) &= \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \\ \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) &= -\alpha_{bs} \left(\frac{f_{cm}/10}{6 + f_{cm}/10}\right) \cdot 10^{-6} \\ \beta_{bs}(t) &= 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \\ \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) &= [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6} \\ \beta_{RH} &= \begin{cases} -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] & \text{dla } 40 \leq RH < 99\% \cdot \beta_{s1} \\ 0,25 & \text{dla } RH \geq 99\% \cdot \beta_{s1} \end{cases} \\ \beta_{ds}(t - t_s) &= \left(\frac{t - t_s}{0,0035 \cdot h^2 + (t - t_s)}\right)^{0,5} \\ \beta_{s1} &= \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \leq 1,0\end{aligned}$$

Oznaczenia w procedurze z ModelCode są tożsame z Eurokod 2.

5. Wyniki badań doświadczalnych

5.1. Skład betonu użytego do badań

Do badań doświadczalnych zostały wybrane trzy klasy betonów, jeden zwykły (C25/30) i dwie klasy betonu BWW – odpowiednio C55/67 i C60/75. Ramowe receptury miesz-

nek zostały przedstawione w tabelach 1 do 3. Dokładny skład mieszanki betonowej jest własnością producenta, dlatego w tabelach zostały podane tylko ilości cementu oraz stosunek w/c .

Tabela 1. Receptura mieszanki betonu C25/30

C25/30		
Receptura mieszanki betonowej		Ilość [kg/m ³]
Cement	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	350
Dodatek 1	Popiół lotny	*
Kruszywo drobne	Piasek 0/2	*
Kruszywo grube 1	Żwir 2/8	*
Woda zarobowa	Woda wodociągowa	*
Domieszka 1	plastyfikator	*
w/c		0,48

Tabela 2. Receptura mieszanki betonu C55/67

C55/67		
Receptura mieszanki betonowej		Ilość [kg/m ³]
Cement 1	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	210
Cement 2	CEM I 52,5 N-SR3/NA	210
Kruszywo drobne	Piasek 0/2	*
Kruszywo grube 1	Grys bazaltowy 2/8	*
Woda zarobowa	Woda wodociągowa	*
Domieszka 1	plastyfikator	*
Domieszka 2	superplastyfikator	*
w/c		0,35

Tabela 3. Receptura mieszanki betonu C60/75

C60/75		
Receptura mieszanki betonowej		Ilość [kg/m ³]
Cement	CEM I 52,5 N-SR3/NA	600
Kruszywo drobne	Piasek 0/2	*
Kruszywo grube 1	Grys bazaltowy 2/8	*
Woda zarobowa	Woda wodociągowa	*
Domieszka 1	plastyfikator	*
Domieszka 2	superplastyfikator	*
w/c		0,29

5.2. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na podstawie wytycznych zawartych w normie [8]. Badanie wykonano na próbkach walcowych (150/300 mm) i kostkowych (o boku 150 mm). Na fotografii 3 pokazano próbki podczas badania, a w tabeli 4 wyniki badań wytrzymałości na ściskanie. Badania wykonano po 28 dniach dojrzewania. Podane wartości są wartościami średnimi.



Fot. 3. Próbką kostkowa i walcowa po zniszczeniu w próbie ściskania

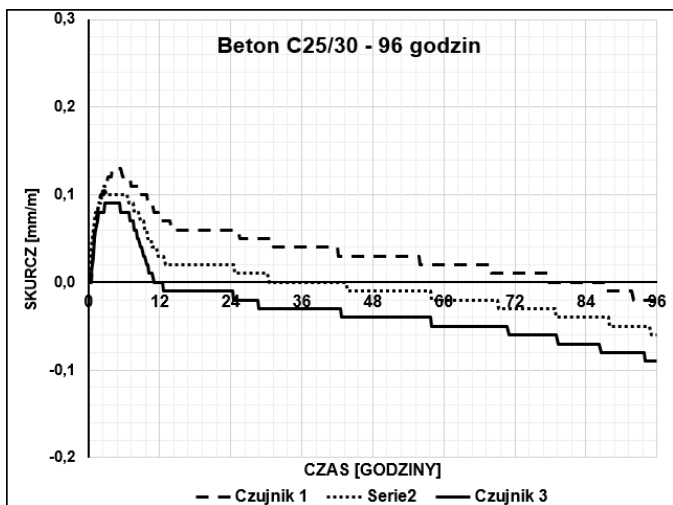
Tabela 4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie na próbkach kostkowych i walcowych wraz z przydzieleniem betonu do odpowiedniej klasy

Rodzaj próbki	C25/30	C55/67	C60/75
f_{cm} [MPa]	39,6	74,9	83,3
$f_{cm,cube}$ [MPa]	41,6	79,3	89,7

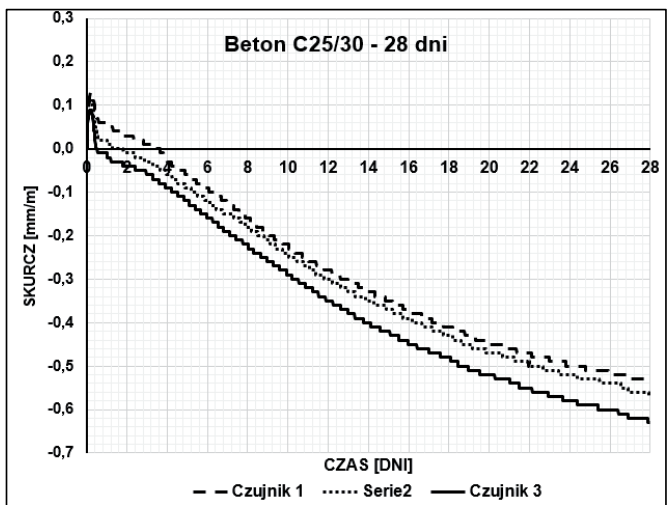
5.3. Wyniki badań skurczu

Na poniższych rysunkach pokazano przebieg skurczu betonów poddanych analizie. Dla każdego betonu przygotowano wykres reprezentujący pierwsze godziny (96 lub 24 h) skurczu oraz wykres pokazujący skurcz w ciągu 28 dni.

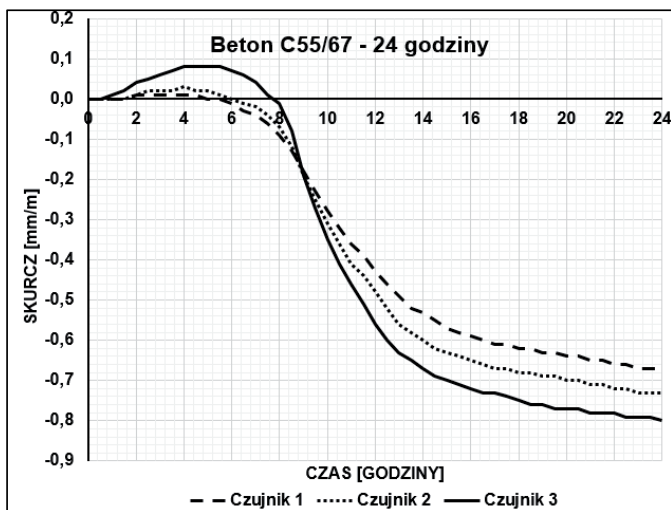
Z przeprowadzonych badań wynika, iż największy skurcz, wynoszący 1,35 mm/m, osiągnął beton o największej wytrzymałości na ściskanie, podczas gdy w przypadku betonu zwykłego C25/30 końcowa wartość odkształceń skurczowych ustabilizowała się na wartości 0,57 mm/m. Na powyższych wykresach zauważyć można również, że wszystkie trzy betony w pierwszej fazie dojrzewania pęcznią, a następnie zaczynają się kurczyć. W odróżnieniu od betonów zwykłych pęcznienie w betonach wysokich zachodziło tylko przez pierwsze kilka godzin dojrzewania, a następnie beton zaczynał się kurczyć. Obserwowany efekt powodowany był znacząco niższymi wartościami współczynnika w/c przedmiotowych betonów BWB (w porównaniu do betonu zwykłego klasy C25/30), które to skutkowało znaczącym uszczelnieniem matrycy cementowej. W betonie zwykłym zjawisko pęcznienia występowało średnio przez prawie 2,5 doby.



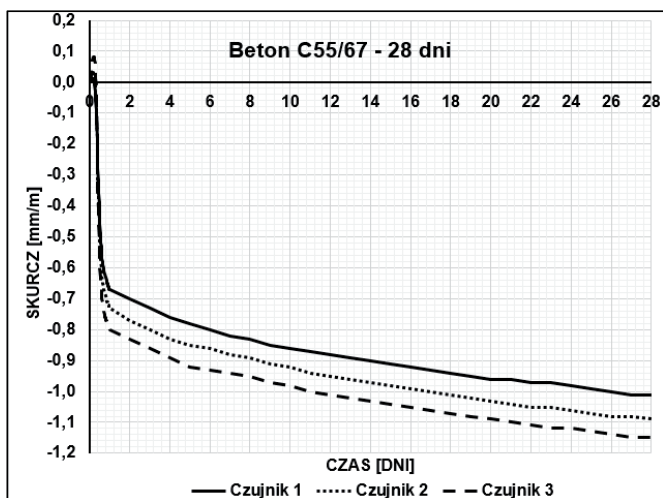
Rys. 2. Przebieg odkształceń skurczowych betonu C25/30 po pierwszych 96 godzinach



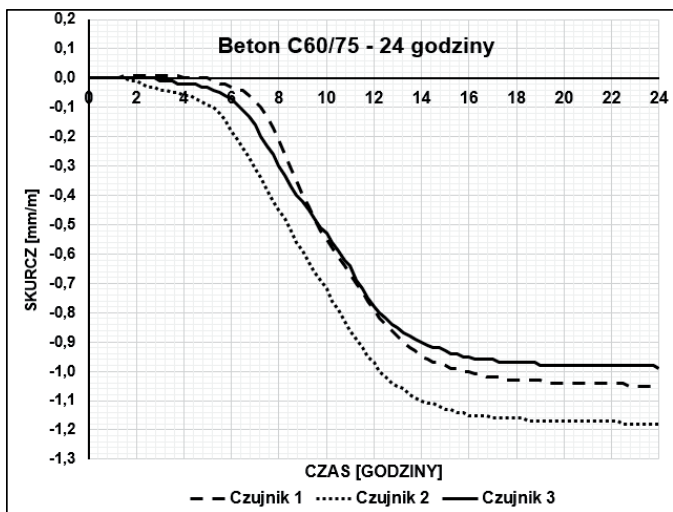
Rys. 3. Przebieg odkształceń skurczowych betonu C25/30 po 28 dniach



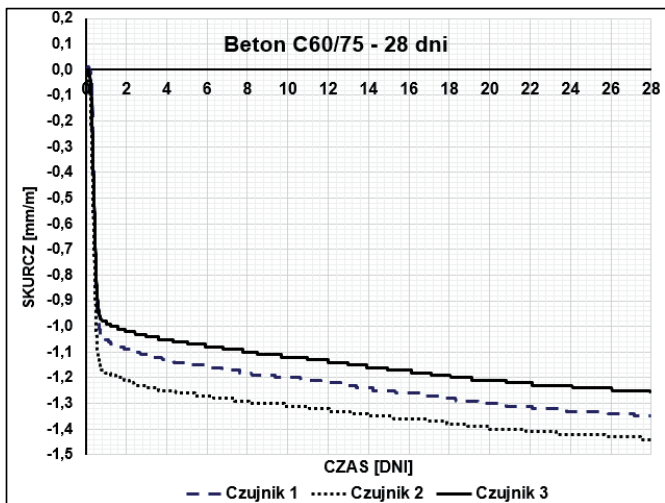
Rys. 4. Przebieg odkształceń skurczowych betonu C55/67 po pierwszych 24 godzinach



Rys. 5. Przebieg odkształceń skurczowych betonu C55/67 po 28 dniach



Rys. 6. Przebieg odkształceń skurczowych betonu C60/75 po pierwszych 24 godzinach



Rys. 7. Przebieg odkształceń skurczowych betonu C60/75 po 28 dniach

6. Analiza porównawcza

W poniższej tabeli zestawiono wyniki badań doświadczalnych z wartościami obliczonymi metodami analitycznymi wg wytycznych normowych z Eurokod 2 [7] i ModelCode [1].

Tabela 5. Zestawienie wyników badań doświadczalnych oraz wartości skurczu obliczonych metodami analitycznymi

Skurcz [mm/m]	C25/30	C55/67	C60/75
Badania	0,57	1,08	1,35
EC2 [7]	0,24	0,23	0,23
MC [1]	0,05	0,10	0,10

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż wartość skurczu wyznaczonego metodami analitycznymi jest znacznie niższa niż wartości skurczu otrzymanego z badań doświadczalnych. Wartości te są od dwóch do sześciu razy niższe dla metody z normy Eurokod 2 [7] i pięć do trzynastu razy niższe dla metody z normy ModelCode [1].

Dodatkowo zauważyć można, iż wartość skurczu obliczona wg wytycznych z normy Eurokod 2 [7] jest prawie stała niezależnie od klasy betonu. Dzieje się tak ponieważ wraz ze wzrostem klasy betonu skurcz autogeniczny jest coraz większy ale skurcz od wysychania coraz mniejszy i ostatecznie wartości skurczu są podobne.

W obliczeniach wg normy ModelCode [1] skurcz jest większy im wyższa jest klasa betonu. Dodatkowo wg wytycznych z ModelCodu wpływ na wartość skurczu ma nie tylko dynamika przyrostu wytrzymałości betonu, zależna od zastosowanego cementu (S, N, R), ale również jego wytrzymałość. Dodatkowo żadna z przedstawionych metod analitycznych nie bierze pod uwagę wpływu pozostałych składników, wykorzystanych do produkcji mieszanki betonowej, takich jak rodzaj i rozmiar zastosowanego kruszywa, dodatki i domieszki chemiczne, czy wartość wskaźnika w/c , na wielkość odkształceń skurczowych materiału.

7. Wnioski

Zrealizowany program badań własnych oraz przeprowadzone obliczenia upoważniają do sformułowania następujących wniosków ogólnych:

- zarejestrowane wartości odkształceń skurczowych drobnokruszywowych betonów wysokiej wytrzymałości (klasy C55/67 i C60/75) są 2÷2,5-krotnie większe aniżeli w przypadku betonu zwykłego klasy C25/30;
- zwiększone wartości odkształceń skurczowych drobnokruszywowych betonów wysokiej wytrzymałości powodowane są koniecznością stosowania w ich składzie dużych ilości cementu i dodatków mineralnych, przy jednoczesnym ograniczeniu wykorzystania kruszywa grubego – skutkuje to dużym udziałem w mieszance zaczynu, który decyduje o wielkości odkształceń matrycy;
- zwiększonego skurczu drobnokruszywowych betonów wysokiej wytrzymałości (w stosunku do betonów na kruszywie o klasycznym uziarnieniu) nie jest w stanie skompensować nawet relatywnie niska wartość współczynnika w/c (odpowiednio 0,29 i 0,35);
- przeprowadzone obliczenia wg Eurokod 2 i ModelCode, wykazały w sposób jednoznaczny, że ich zastosowanie do prognozowania wielkości skurczu drobnokruszywowych betonów wysokiej wytrzymałości, daje nieadekwatne, wielokrotnie zaniżone (4÷13-razy) wartości w stosunku do pomiarów wykonanych w warunkach laboratoryjnych.

Badania zostały przeprowadzone w ramach realizowanej pracy doktorskiej i dofinansowania z L-1/353/2014/DS-M.

Literatura

- [1] CEB – FIP 2010, Model Code 2010, Final Draft – Volume 1, FIB Bulletin 65, 2012;
- [2] Flaga K., Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych, Monografia 295. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004;
- [3] Flaga. K., Skurcz betonu i jego wpływ na nośność, użytkowość i trwałość konstrukcji żelbetowych i sprężonych. Monografia, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002;
- [4] Jamróży Z., Beton i jego technologie, PWN, Warszawa 2009;
- [5] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu. Wyd. Polski Cement, 2010;
- [6] Neville A.M., Właściwości betonu. Wyd. SPC, Kraków 2012;
- [7] PN – EN 1992-1-1:2004 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków;
- [8] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań;
- [9] PN-EN 206:2014-04 Beton: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność;