

Skurcz betonu – cechy istotne ze względu na projektowanie konstrukcji z betonu

Dr inż. Wioletta Raczkiewicz, Politechnika Świętokrzyska, Kielce

1. Wprowadzenie [3,4,5,8]

Skurcz betonu to zjawisko polegające na samoistnych odkształceniach reologicznych, nie związanych z obciążeniami mechanicznymi. Spowodowany jest zmianami strukturalnymi zachodzącymi w zaczynie cementowym na skutek fizyko-chemicznych procesów utraty wody w wyniku wiązania, twardnienia i wysychania betonu. Kruszywo ma znacznie mniejsze znaczenie w przebiegu skurczu – jego obecność może w pewnym stopniu wpłynąć na ograniczenie i spowolnienie odkształceń skurczowych proporcjonalnie do ilości użytego kruszywa.

Na całkowite odkształcenia skurczowe ϵ_{cs} składają się odkształcenia od tzw. skurczu autogenicznego oraz od skurczu spowodowanego wysychaniem.

Skurcz autogeniczny $\epsilon_{cs,a}$, nazywany też skurczem samoczynnym (samorodnym), pojawia się już podczas wiązania oraz w początkowym okre-

sie twardnienia betonu i spowodowany jest utratą wody, która wchodzi w reakcję chemiczną z cementem (skurcz chemiczny) oraz odparowaniem wody z zewnętrznych warstw zaczynu, gdy beton jest jeszcze w stanie plastycznym. Skurcz autogeniczny występuje więc w pierwszych godzinach od zabetonowania i narasta stosunkowo szybko.

Skurcz spowodowany wysychaniem $\epsilon_{cs,d}$, nazywany skurczem fizycznym, związany jest z utratą wody przez stwardniały beton (m.in. wody zaadsorbowanej przez żel cementowy oraz wody wewnątrzkrystalicznej). Odkształcenia skurczowe w tym przypadku narastają wolniej, ale na przestrzeni długiego okresu czasu, i mogą pojawić się nawet po kilkudziesięciu latach. W większości przypadków to właśnie skurcz spowodowany wysychaniem decyduje o wielkości naprężeń skurczowych i jest miarodajny do obliczeń.

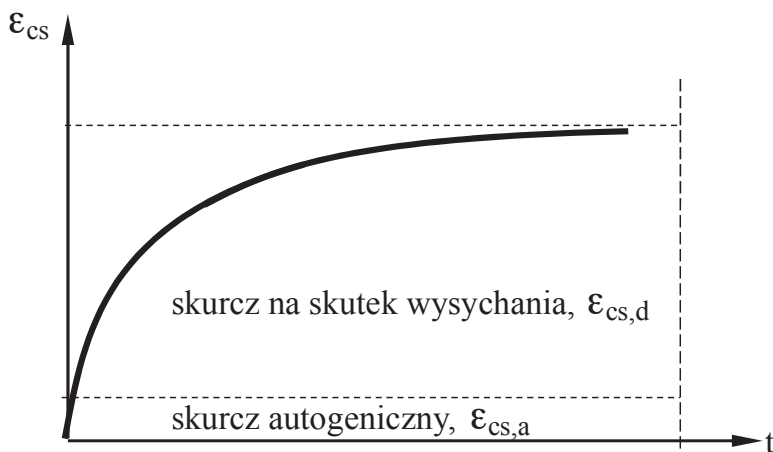
Naprężenia pojawiające się w betonie w wyniku skurczu mogą doprowadzić do powstawania mi-

kro-, a także makrozarysowań. Zarysowania są większe w przypadku, gdy ograniczony jest tzw. skurcz swobodny, tzn. jeśli wywołane skurczem naprężenia w betonie natrafiają na opór związany z występowaniem zbrojenia, dużych ziaren kruszywa lub innych więzów ograniczających swobodę odkształceń (np. opór w deskowaniu). Dlatego też odkształcenia skurczowe elementu czy całej konstrukcji żelbetowej różnią się od swobodnych odkształceń skurczowych betonu.

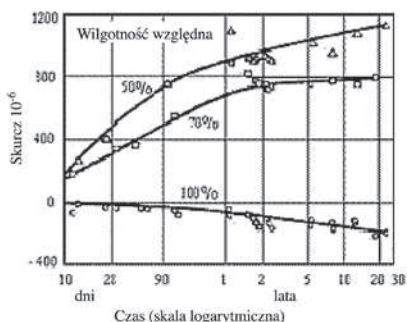
Skurcz autogeniczny ma mały udział w całkowitych odkształceniach skurczowych, ale w niektórych przypadkach jego wpływ jest kluczowy. Należy uwzględnić go w obliczeniach konstrukcji zespolonych typu beton – beton (w odniesieniu do betonu nowego układanego na warstwie betonu starego, stwardniałego), a także w przypadku planowania podczas budowy długich przerw roboczych między betonowaniem kolejnych elementów konstrukcji, gdyż różnice w naprężeniach skurczowych przylegających warstw betonu mogą powodować zarysowanie.

2. Przebieg skurczu [3,4]

Ustalono zostało, że skurcz rozpoczyna się dopiero przy ubywaniu wody fizyko-chemicznej, czyli włączonej w strukturę zaczynu cementowego. Odparowywanie około 20% wody wolnej, zajmującej duże pory, nie ma wpływu na skurcz. W związku z tym przyjęto, że od momentu wykonania mieszanki betonowej, przez pierwsze 24 godziny, gdy elementy lub



Rys. 1. Wykres wzrostu odkształceń skurczowych w czasie [3]



Rys. 2. Wpływ wilgotności otoczenia na przebieg skurczu [4]

próbki betonowe muszą przebywać w otoczeniu o wilgotności względnej powyżej 90%, skurcz nie występuje. Jeśli w kolejnych godzinach czy dniach utrzymywana jest tak wysoka wilgotność otoczenia, elementy w dalszym ciągu nie ulegają skurczowi. Przechowywanie próbek kontrolnych w wodzie zaraz po związaniu betonu powoduje wręcz występowanie zjawiska odwrotnego do skurczu – pęcznienia. Może ono osiągać wartość około 0,1 ÷ 0,2 mm/m (rys. 2).

Ponieważ skurcz związany jest z utratą wody, właściwa pielęgnacja betonu już od momentu zagęszczenia – utrzymywanie wilgotności względnej otoczenia powyżej 90% – w dużym stopniu ogranicza odkształcenia skurczowe. Właściwe jest, ze względu na ograniczenie skurczu, utrzymanie wilgotnej pielęgnacji do 7 dni dla elementów krępych oraz do 14 dni dla elementów płaskich i rozległych.

Skurcz jest zjawiskiem częściowo odwracalnym – nawilgacanie wy-

sychającego betonu może redukować odkształcenia skurczowe. Nie jest jednak możliwa całkowita redukcja skurczu w stwardniałym betonie – w dużej mierze odkształcenia skurczowe są wówczas nieodwracalne i ponowne nasycenie betonu wodą nie eliminuje ich.

3. Czynniki wpływające na wielkość skurczu [3,4,5,6]

Zarówno ilość i rodzaj składników mieszanki betonowej, jak również warunki otoczenia oraz właściwa pielęgnacja betonu mają wpływ na przebieg i wielkość skurczu. Do podstawowych czynników mających wpływ na skurcz betonu należą:

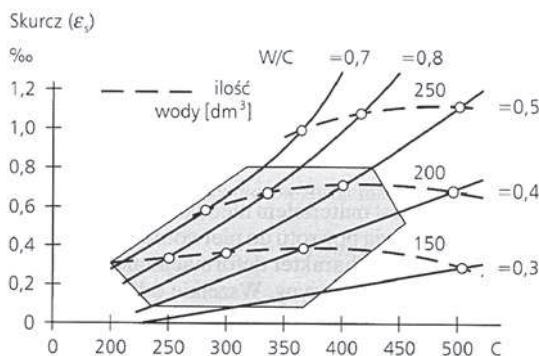
- ilość zaczynu cementowego,
- stosunek w/c,
- rodzaj cementu,
- ilość i rodzaj kruszywa,
- klasa betonu,
- wiek betonu,
- wilgotność i temperatura otoczenia,
- wymiary elementu,

– ograniczenie swobody skurczu, np. zbrojeniem, tarciami o podłoże, zamocowaniem na końcach.

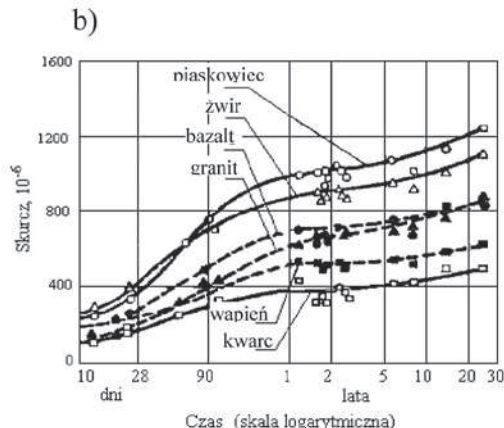
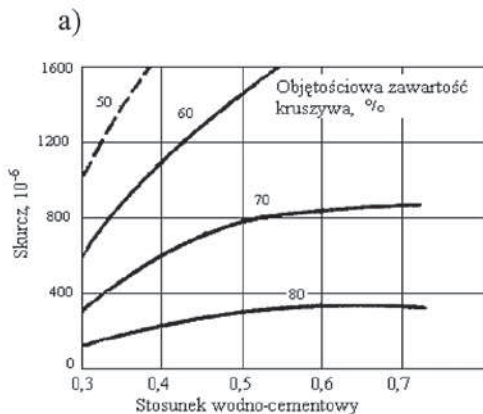
Na rysunku 3, zaczerpniętym z [3], pokazane zostały różnice w wielkości odkształceń skurczowych w zależności od ilości użytego cementu oraz stosunku wodno-cementowego.

Także ilość i rodzaj użytego do betonu kruszywa mają wpływ na wielkość odkształceń skurczowych, choć w porównaniu z innymi czynnikami, wpływ ten jest mniejszy. Wykresy na rysunku 4 pokazują różnice w przebiegu skurczu uzależnione od objętościowej zawartości kruszywa (rys. 4a) oraz rodzaju kruszywa (rys. 4b).

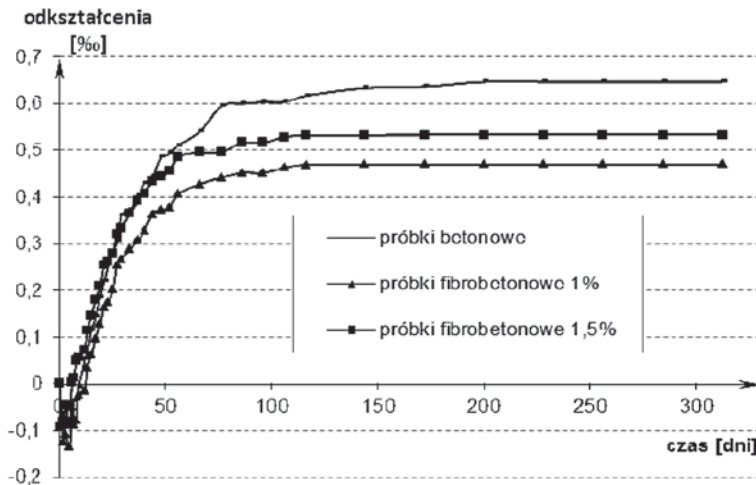
Wyraźny wpływ na ograniczenie odkształceń skurczowych mają dodane do betonu włókna mikro-zbrojenia. Rysunek 5 przedstawia wykresy przebiegu skurczu wykonane na podstawie badań przeprowadzonych przez autora. Badania skurczu wykonane były na próbkach betonowych i fibrobetonowych z betonu klasy C25/30,



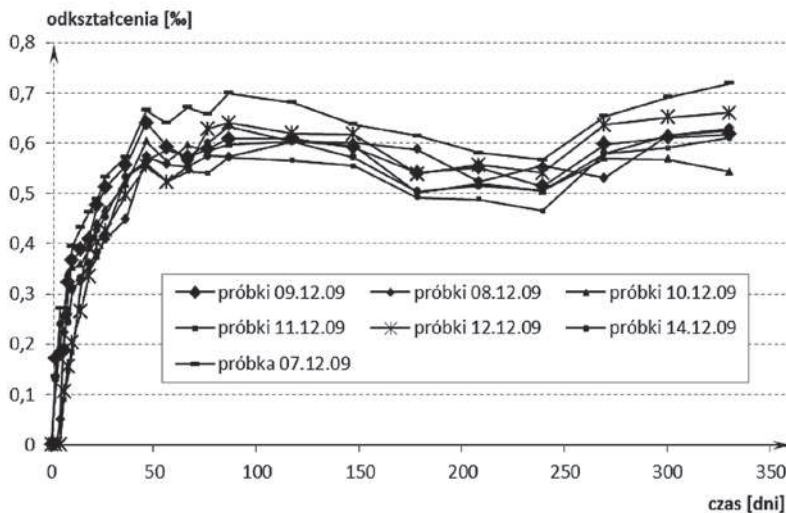
Rys. 3. Skurcz betonu w ‰ w zależności od wskaźnika w/c i zawartości cementu, a zatem także od zawartości zaczynu; wg [3]



Rys. 4. Wpływ zawartości i rodzaju kruszywa na wielkość skurczu [4]



Rys. 5. Średnie odkształcenia skurczowe w próbkach betonowych i fibrobetonowych [6]



Rys. 6. Wykres uśrednionych przyrostów odkształceń skurczowych w czasie dla wszystkich badanych próbek [6]

zgodnie z wytycznymi zawartymi w Instrukcji 194/98. Badanie cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. Warszawa 1998. Jako mikrozbrojenie zastosowano cięte włókna stalowe typu Dramix o smukłości $l/d = 80$ z odgiętymi końcówkami.

Badania te wykazały, że w dwóch typach próbek fibrobetonowych, w których zastosowano włókna stalowe w ilości odpowiednio 1,5% i 1,0% (w stosunku do objętości betonu), odkształcenia skurczowe były mniejsze o około 16÷26% niż w próbkach betonowych. Średnie odkształcenia skurczowe w próbkach betonowych sięgały ϵ

$\approx 0,65\text{‰}$, gdy tymczasem w próbkach fibrobetonowych, odpowiednio: $\epsilon \approx 0,52\text{‰}$, $\epsilon \approx 0,48\text{‰}$. Należy dodać, że lepsze rezultaty uzyskano dla próbek z 1,0% zawartością włókien. Chociaż włókien w tym przypadku było mniej, to prawdopodobnie bardziej równomiernie rozproszone efektywniej przeciwdziałały odkształceniom skurczowym.

Również na podstawie tych badań można zauważyć wyraźny wpływ wilgotności otoczenia oraz sposobu pielęgnacji betonu na wielkość skurczu. Pomiar wykonywane w pierwszych dwóch tygodniach od zabetonowania, kiedy to prób-

ki przechowywane były w wodzie, wykazały nie tylko brak odkształceń skurczowych w tym okresie, ale nawet wystąpienie zjawiska odwrotnego – pęcznienia, które osiągało wartość do 0,15‰.

Jak warunki otoczenia mogą wpłynąć na przebieg skurczu nawet w stwardniałym betonie, pokazano na rysunku 6. Rysunek przedstawia uśrednione wykresy przebiegu skurczu dla 7 grup próbek (w każdej grupie badano po 6 próbek). Badania zostały wykonane według tych samych wytycznych, co badania próbek omówionych wyżej, przy użyciu tej samej aparatury pomiarowej oraz w tej samej hali laboratoryjnej. Z analizy wykresów wynika, że w pierwszych trzech miesiącach od zabetonowania przyrost odkształceń skurczowych był dość typowy – w pierwszych 40 dniach szybki, potem (na poziomie $\epsilon \approx 0,55 \div 0,65\text{‰}$) – wyraźnie wolniejszy. Jednak po około 130 dniach od zabetonowania zaobserwowano spadek odkształceń skurczowych. Taki nieznaczny spadek (maksymalnie do poziomu 0,48‰) rejestrowano do około 250 dnia badania. Po tym okresie znowu nastąpił przyrost odkształceń skurczowych, który ustabilizował się na poziomie 0,55÷0,7‰.

Przyczyną zaobserwowanych zmian w wielkościach skurczu był najprawdopodobniej przeprowadzany remont hali laboratoryjnej, który początkowo nie rzutował na prowadzone pomiary, jednak, w miarę nasilenia robót, wymusił konieczność przenoszenia próbek, a tym samym zmiany warunków cieplno-wilgotnościowych otoczenia.

4. Sposób wyznaczania wartości odkształceń skurczowych [1,2,8]

Na przestrzeni lat w kolejnych polskich normach dotyczących projektowania konstrukcji betonowych, żelbetonowych czy sprężonych nie było wzorów uwzględnia-

jących w obliczeniach wpływ odkształceń skurczowych. Pojawiały się tylko zalecenia konstrukcyjne, których przestrzeganie miało zabezpieczyć konstrukcję przed zarysowaniem spowodowanym naprężeniami skurczowymi.

Dopiero w wyniku nowelizacji polskiej normy PN-B-03264 w oparciu o Eurokod 2, pojawiły się wzory pozwalające obliczyć odkształcenia skurczowe w elementach z betonu.

Zgodnie z [8] wielkość całkowitego odkształcenia skurczowego ϵ_{cs} zapisywana jest równaniem (1):

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{ca} + \epsilon_{cd} \quad (1)$$

gdzie:

ϵ_{cs} – całkowite odkształcenie skurczowe,

ϵ_{ca} – odkształcenie skurczu autogenicznego,

ϵ_{cd} – odkształcenie skurczu spowodowane wysychaniem.

Wielkość skurczu autogenicznego można wyznaczyć ze wzoru (2):

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \epsilon_{ca}(\infty) \quad (2)$$

w którym:

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (2.1)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 t^{0,5}) \quad (2.2)$$

gdzie:

f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość walcowa betonu na ściskanie po 28 dniach,

t – wiek betonu wyrażony w dniach.

Natomiast wielkość skurczu spowodowanego wysychaniem w zależności od czasu wyrażona jest wzorem (3):

$$\epsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) k_h \epsilon_{cd,0} \quad (3)$$

w którym:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,04 \sqrt{h_0^3}} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{cd,0} = 0,85(220 + 110\alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}) \beta_{RH} \cdot 10^{-6} \quad (3.2)$$

$$\beta_{RH} = 1,55[1 - (\frac{RH}{RH_0})^3] \quad (3.3)$$

gdzie:

t – wiek betonu w rozważanej chwili, podawany w dniach,

t_s – wiek betonu na początku procesu wysychania (lub pęcznienia); zwykle dzień zakończenia pielęgnacji, podawany w dniach,

h_0 – miarodajny wymiar przekroju; $h_0 = 2Ac/u$,

A_c – pole przekroju betonu, u – obwód części przekroju wystawionej na wysychanie,

k_h – współczynnik zależny od miarodajnego wymiaru h_0 ; wg Tab. 3.3 [6],

α_{ds1} , α_{ds2} – współczynniki zależne od rodzaju cementu,

RH – wilgotność względna otoczenia (%),

$RH_0 = 100\%$.

Końcową wartość skurczu spowodowanego wysychaniem opisuje wzór (4):

$$\epsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \epsilon_{cd,0} \quad (4)$$

w którym wartość $\epsilon_{cd,0}$ można przyjmować z tablicy 3.2 [8] na podstawie klasy betonu i wilgotności względnej otoczenia lub dokładniej – na podstawie wzorów zawartych w załączniku B normy [8].

Powyższe wzory nie uwzględniają dodatków do betonu w postaci np. zbrojenia rozproszonego, które istotnie redukuje wielkość odkształceń skurczowych. W związku z tym, w przypadku obliczania elementów betonowych z dodatkiem włókien mikrobrojenia, można się spodziewać, że rzeczywiste odkształcenia skurczowe będą niższe niż wyliczone.

5. Uwagi końcowe

1. Podczas projektowania elementów z betonu należy brać pod uwagę odkształcenia skurczowe, a ich

wartości określać dokładnie w oparciu o wzory zawarte w [1, 2, 8].

2. Skurcz spowodowany wysychaniem jest w większości przypadków skurczem decydującym o naprężeniach skurczowych i miarodajnym do obliczeń.

3. Skurcz autogeniczny (występujący w pierwszych godzinach od zabetonowania) jest mniej istotny, jednak w obliczeniach konstrukcji zespolonych typu beton – beton lub w przypadku planowania długich przerw roboczych między betonowaniem kolejnych elementów konstrukcji, należy brać go pod uwagę.

4. Odkształcenia skurczowe elementu czy całej konstrukcji żelbetowej różnią się od swobodnych odkształceń skurczowych betonu.

5. Istotny wpływ na redukcję odkształceń skurczowych ma dodatek do betonu stalowych włókien mikrobrojenia.

6. Wielkość odkształcenia skurczowego elementu zależy od stopnia zbrojenia, miarodajnego wymiaru h_0 , wilgotności powietrza i klasy betonu, co świadczy o tym, że w całej konstrukcji odkształcenia skurczowe mogą być różne w różnych elementach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Flaga K., Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych, Monografia 295, Wydawnictwo PK, Kraków 2004
- [2] Flaga K., Skurcz betonu i jego wpływ na nośność, użyteczność i trwałość konstrukcji żelbetowych i sprężonych, Monografia, Wydawnictwo PK, Kraków 2002
- [3] Jamroży Z., Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009
- [4] Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000
- [5] Piasta W., Odkształcenia własne betonów napowietrzonych, Przegląd Budowlany, 4/2009, 28–31
- [6] Raczkiwicz W., Wyznaczenie rozkładów parametrów stochastycznego modelu fibrobetonu w procesie obciążenia zmiennych, Rozprawa doktorska, Kielce 2008
- [7] Instrukcji 194/98. Badanie cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach
- [8] PN-EN 1992-1-1, wrzesień 2008, Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków