CZASOPISMO TECHNICZNE B
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 1-B/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-628X

LUCYNA DOMAGAŁA*

SKURCZ I PĘCZNIENIE LEKKICH BETONÓW KRUSZYWOWYCH MODYFIKOWANYCH FAZĄ WŁÓKNISTĄ

SHRINKAGE AND EXPANSION OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE MODIFIED WITH FIBRES

Streszczenie

Ze względu na niższy moduł sprężystości kruszyw porowatych oraz większe zawartości cementu betony lekkie charakteryzują się z reguły wyższym poziomem skurczu w porównaniu z betonami zwykłymi tej samej klasy. W artykule omówiono wpływ zastosowania wilgotnej pielęgnacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz zbrojenia rozproszonego na pęcznienie i skurcz konstrukcyjnych betonów lekkich z uwzględnieniem ich zróżnicowanych poziomów wytrzymałości. Wykazano, że efektywność zastosowania dodatku włókien na skurcz betonów lekkich silnie zależy od czasu badania, rodzaju włókien i ich zawartości oraz potencjalnego skurczu betonu niezbrojonego, zdeterminowanego zarówno jego strukturą, jak również procedurami wykonywania i pielęgnacji.

Słowa kluczowe: *lekki beton kruszywowy*, *skurcz*, *pęcznienie*, *włókna stalowe*, *włókna polipropylenowe*

Abstract

Owing to lower modulus of elasticity of porous aggregate and higher cement content, lightweight concrete is generally characterized by higher shrinkage in comparison with normal-weight one of the same strength class. In this paper the influence of water internal and external curing as well as fibres reinforcement on swelling and shrinkage of structural lightweight aggregate concrete, considering its various strength, is discussed. It was proved that efficiency of fibres application in shrinkage reduction is strongly dependent on research time, fibres type and content as well as on potential shrinkage of plain concrete, determined by both its structure and curing procedures.

Keywords: *lightweight aggregate concrete*, *shrinkage*, *swelling*, *steel fibres*, *polypropylene fibres*

* Dr inż. Lucyna Domagała, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Oznaczenia

LWA – kruszywo lekkie
LWAC – lekki beton kruszywowy
SLWAC – konstrukcyjny lekki beton kruszywowy
NWAC – beton na kruszywie zwykłym
SNWAC – konstrukcyjny beton na kruszywie zwykłym
$h_{0\,t}$ – miarodajny wymiar przekroju elementu [mm]
$\varepsilon_{lcs,\infty t}$ – końcowe odkształcenie skurczowe betonu lekkiego [‰ (mm/m)]
ρ – gęstość objętościowa kruszywa [kg/m^3]
$f_{cm,\,t}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie określana po t dniach dojrzewania [MPa]
$f_{fm,\,t}$ – średnia wytrzymałość na zginanie określana po t dniach dojrzewania [MPa]

1. Wstęp

Skurcz stanowi jedną z mniej pożądanych cech betonu, która w istotny sposób może wpłynąć na powstanie deformacji elementów konstrukcyjnych (zmniejszenie wymiarów, zmianę kształtu, a w szczególności wyboczenie), ich zarysowanie, a tym samym spadek trwałości, obniżenie efektywnej wytrzymałości na rozciąganie czy spadek naprężeń wstępnych w przypadku sprężania. Znajomość rozmiaru zjawiska skurczu oraz jego przebiegu w czasie stanowi zatem podstawę przy projektowaniu, wykonywaniu oraz pielęgnacji elementów i konstrukcji betonowych.

W ogólnym przypadku skurcz betonów lekkich (LWAC), w związku ze specyficznymi właściwościami stosowanych kruszyw porowatych, kształtuje się na wyższym poziomie w porównaniu z betonami na kruszywach zwykłych (NWAC) tej samej klasy. Pomimo tego, ze względu na wiele innych zalet [1, 2] betony te, w szczególności jako materiał konstrukcyjny, znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie. Często jednak w tych przypadkach istnieje konieczność zminimalizowania skurczu stosowanych betonów lekkich. Jedną z takich metod może być wprowadzenie dodatku fazy włóknistej, podobnie jak ma to miejsce w betonach zwykłych. W przeciwieństwie jednak do tych ostatnich, stosowanie zbrojenia rozproszonego jako dodatku do betonów lekkich jest niewielkie i dotyczy głównie kilku zagranicznych prac badawczych.

2. Istota skurczu i pęcznienia betonów

Zmiany objętościowe betonu mogą być wywołane wieloma przyczynami związanymi zarówno ze strukturą wewnętrzną samego betonu i zachodzącymi w nim procesami fizykochemicznymi (np. skurcz i pęcznienie autogeniczne), jak i oddziaływaniem środowiska zewnętrznego (np. skurcz i pęcznienie spowodowane zmianami wilgotnościowymi, skurcz karbonatyzacyjny, skurcz i ekspansja wywołane zmianami temperatury czy zmiany objętościowe związane z odkształceniami od obciążenia zewnętrznego). Zatem wartość badanych zmian objętościowych betonu stanowi najczęściej wypadkową zmian wywołanych równocześnie różnymi przytoczonymi powyżej przyczynami. Po wyeliminowaniu obciążenia i gradientów temperatury zmiany objętościowe betonu wynikają głównie ze skurczu

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

autogenicznego, skurczu od wysychania lub pęcznienia w wodzie oraz skurczu karbonatyzacyjnego. W bardzo wielu przypadkach, ze względów praktycznych, nie dokonuje się niezależnych pomiarów tych wielkości, chociaż przyczyny ich powstania mają zupełnie odmienną naturę.

2.1. Skurcz autogeniczny

Skurcz autogeniczny, zwany również skurczem chemicznym, samoczynnym, wewnętrznym czy strukturalnym wynika z reakcji hydratacji cementu, której produkty zajmują mniejszą objętość niż minerały biorące w niej udział. Dodatkowo, w przypadku braku dostępu do wody z zewnątrz, skurczowi chemicznemu towarzyszy skurcz spowodowany zjawiskiem tzw. samoosuszenia betonu, polegającego na konsumpcji wody wewnętrznej do kontynuacji procesów hydratacji. Udział skurczu od samoosuszenia w zmianach autogenicznych jest istotny, a jego bezpośrednią przyczyną jest powstawanie napięć kapilarnych w porach matrycy cementowej, tym większych, im większy jest deficyt wody do hydratacji. Napięcia te, będące bezpośrednią przyczyną zwężania się kapilar (skurczu), zasadniczo zależą od dwóch parametrów: napięcia powierzchniowego roztworu wypełniającego pory oraz od promienia meniskowego porów [3]. Im woda zasysana jest z porów o mniejszych średnicach, tym bardziej wzrasta napięcie kapilarne. Istnieją również przesłanki [4] przemawiające za tym, że skurcz betonu może być skutkiem nie tylko usuwania wody międzykrystalicznej, ale i wewnątrzkrystalicznej, powodując przebudowywanie struktury sieciowej.

Ryzyko nadmiernego skurczu autogenicznego istnieje zatem szczególnie w przypadku betonów konstrukcyjnych, zwłaszcza betonów wysokiej wytrzymałości (BWW), charakteryzujących się niskim wskaźnikiem wodno-cementowym ($< 0{,}4$), wysoką zawartością cementu oraz materiałów pucolanowych (mikrokrzemionka, popiół lotny). Matryce takich betonów już we wczesnym okresie dojrzewania (nawet w 4–5 dniu [5]) mają ukształtowaną na tyle zwartą strukturę, że ogranicza ona ich pielęgnację jedynie do zewnętrznych powierzchni, z jednej strony – hamując hydratację, z drugiej natomiast – zwiększając prawdopodobieństwo zarysowania. Chociaż wartości końcowe odkształceń od skurczu autogenicznego są mniejsze w porównaniu z innymi zmianami objętościowymi, to jednak ryzyko zarysowania w tym przypadku jest istotnie większe. Przebieg skurczu samoczynnego ma bowiem charakter dynamiczny we wczesnym okresie dojrzewania, gdy właściwości mechaniczne młodego zaczynu w betonie (moduł sprężystości, wytrzymałość na rozciąganie, energia pękania) nie są jeszcze na tyle rozwinięte, by skutecznie przeciwstawić się powstającym w betonie naprężeniom rozciągającym.

2.2. Pęcznienie autogeniczne

We wczesnym okresie dojrzewania (do kilku pierwszych godzin) większość betonów ulega krótkotrwałemu pęcznieniu autogenicznemu wynikającemu z rozszerzalności termicznej składników w podwyższonej temperaturze wywołanej ciepłem hydratacji. Wzrost odkształceń jest w tym przypadku tak niewielki, że z praktycznego punktu widzenia zjawisko to można pominąć.

Do pęcznienia autogenicznego może również dojść wskutek zastosowania pęczniejących kruszyw, kruszyw reaktywnych zawierających krzemionkę wchodzącą w reakcje z alkaliami pochodzącymi z cementu lub cementu zawierającego nadmiar CaO i/lub MgO.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Pęcznienie takie, chociaż może prowadzić do istotnych zmian objętościowych niebezpiecznych ze względu na potencjalne zarysowanie betonu, w praktyce jest niezwykle rzadko spotykane w związku z coraz bardziej rygorystycznymi kontrolami jakości składników stosowanych do betonu, eliminującymi tego typu niekontrolowane przypadki.

2.3. Skurcz od wysychania

Skurcz ten, zwany również skurczem zewnętrznym, powstaje wskutek odparowywania wody z betonu do otoczenia. Uzależniony jest zatem nie tylko od struktury betonu, ale i od warunków wilgotnościowo-temperaturowych środowiska zewnętrznego. Mechanizm skurczu od wysychania jest podobny jak dla skurczu autogenicznego wywołanego samoosuszeniem. Różnice mają natomiast charakter ilościowy.

W przeciwieństwie do skurczu autogenicznego skurcz od wysychania jest zjawiskiem częściowo odwracalnym. Ponowne dostarczenie wody zewnętrznej do betonu minimalizuje zmiany skurczowe zaistniałe wskutek wysychania, ale nie jest w stanie ich całkowicie wyeliminować ze względu na ciągły proces hydratacji przyczyniający się do doszczelnienia struktury matrycy cementowej i mniejszą jej zdolność do absorpcji wody oraz powstanie dodatkowych wiązań międzycząsteczkowych w żelu podczas wysychania. Stąd tak istotna okazuje się pielęgnacja wilgotna we wczesnym okresie dojrzewania betonu zapewniająca obniżenie końcowej wartości skurczu od wysychania.

2.4. Pęcznienie wilgotnościowe

Pęcznienie wilgotnościowe dotyczy głównie betonów pielęgnowanych i/lub eksploatowanych w wodzie. Dochodzi do niego w wyniku naprężeń rozklinowujących powstających w żelu cementowym wskutek absorpcji wody z otoczenia o bardzo wysokiej wilgotności (powyżej 95%). Zmiany objętościowe wywołane pęcznieniem są jednak nieporównywalnie mniejsze (ok. 6–8-krotnie [4]) w odniesieniu do zmian spowodowanych skurczem od wysychania i w zasadzie nie są w stanie doprowadzić do zarysowania elementu. Dodatkowo ryzyko takie zmniejsza proces hydratacji kontynuowany w środowisku wilgotnym, którego produkty doszczelniają strukturę betonu oraz przyczyniają się do przyrostu wytrzymałości betonu.

Analogicznie do skurczu od wysychania pęcznienie wilgotnościowe jest zjawiskiem częściowo odwracalnym.

2.5. Skurcz karbonatyzacyjny

Przyczyną skurczu karbonatyzacyjnego jest reakcja rozpuszczającego się pod wpływem naprężeń ściskających $Ca(OH)_2$ oraz C-S-H, stanowiących elementy strukturalne betonu, z dwutlenkiem węgla pochodzącym z otoczenia. W wyniku tej reakcji powstają węglan wapnia oraz woda wolna, która – odparowując – dodatkowo może powodować skurcz. Karbonatyzacja betonu, chociaż silnie uzależniona od wilgotności otoczenia, stężenia CO_2 i struktury matrycy cementowej, jest procesem wieloletnim, dodatkowo hamowanym przez powstający w jej wyniku węglan wapnia. Skurcz karbonatyzacyjny jest relatywnie niewielki i dotyczy jedynie zewnętrznych powierzchni elementów. Zatem w jego konsekwencji dochodzi nie tyle do deformacji elementu, co do ewentualnego mikrozarysowania powierzchniowego i spadku trwałości.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2.6. Czynniki determinujące wielkość skurczu

Do najistotniejszych czynników determinujących wielkość skurczu należy zaliczyć skład betonu, a w szczególności skład matrycy, warunki środowiska zewnętrznego oraz geometrię elementu.

Wzrost zawartości cementu oraz dodatków hydraulicznych i pucolanowych w betonie w oczywisty sposób przyczynia się do wzrostu jego skurczu wynikającego z procesów autogenicznych. Na wielkość skurczu istotny wpływ mają również skład chemiczny oraz miałkość spoiwa. Ocena wpływu wskaźnika wodno-spoiwowego W/S nie jest tak jednoznaczna jak w przypadku zawartości spoiwa. Z jednej bowiem strony, jego obniżenie prowadzi do wzrostu skurczu samoczynnego, z drugiej jednak, przyczyniając się do spadku porowatości matrycy, ogranicza skurcz od wysychania. Zatem wpływ W/S na skurcz będzie silnie sprzężony z pozostałymi parametrami betonu, środowiska zewnętrznego (jego wilgotności i temperatury) oraz czasu badania. Niemniej jednak w przeważającej większości przypadków betony o wyższym wskaźniku wodno-spoiwowym będą charakteryzować się wyższymi wartościami końcowych odkształceń skurczowych ze względu na dominujący wpływ wysychania.

Kruszywo, podobnie jak i dodatki inertne (np. mączki skalne), a nawet nieshydratowane ziarna cementu, same – nie ulęgając zmianom objętościowym – hamują skurcz betonu. Zatem kompozyty cementowe o większej zawartości fazy wypełniającej w stosunku do matrycy charakteryzują się niższym skurczem. Efekt ograniczający skurcz proporcjonalnie zależy od modułu sprężystości kruszywa oraz jego nasiąkliwości.

Wpływ warunków otoczenia, w których dojrzewa beton, częściowo omówiono w podrozdz. 2.3. i 2.4. Spadek wilgotności w oczywisty sposób przyczynia się do wzrostu skurczu od wysychania. Z analizy wytycznych normowych [1] wynika, że zmiana wilgotności względnej otoczenia z 80 do 50% powoduje wzrost końcowych odkształceń skurczowych od wysychania betonu, bez względu na jego klasę, o ok. 80%. Natomiast na przebieg skurczu w czasie wpływają również w sposób istotny temperatura oraz prędkość ewentualnego wiatru, których wzrost przyspiesza proces odparowywania wody z betonu.

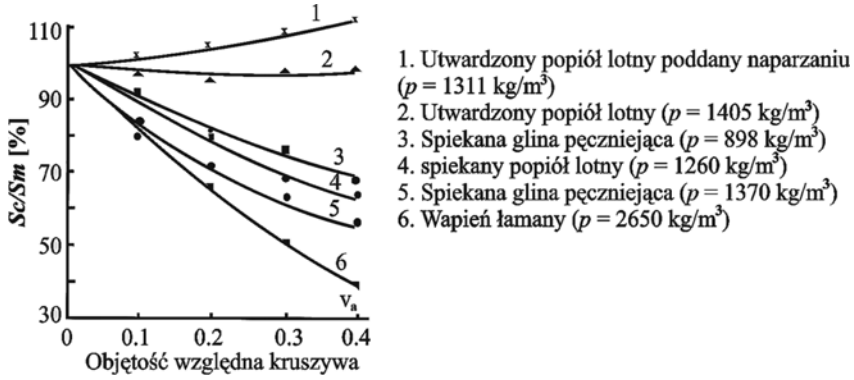
Jednym z czynników, które w pewnych przypadkach w największym stopniu oddziaływują na wartość pomiaru zmian objętościowych betonu jest wielkość ciała próbnego. Im element jest mniejszy (mniejsze wymiary jego przekroju poprzecznego), tym wyższa wartość pomierzonego skurczu. Przykładowo [1], pomiar skurczu wysychania prowadzony na elementach o miarodajnym wymiarze przekroju h_0 = 50 mm w początkowym okresie (do 7 dni), w którym skurcz ma najistotniejsze znaczenie ze względu na potencjalne spękanie, daje wynik trzykrotnie wyższy w stosunku do mierzonego na elementach o h_0 = 150 mm i ponad 13-krotny w odniesieniu do elementów o h_0 = 600 mm. Z upływem czasu różnice te stopniowo zmniejszają się i skurcz końcowy elementu o h_0 = 50 mm jest wyższy zaledwie o 4 i 65% – odpowiednio – dla h_0 = 150 i 600 mm. Efekt skali w badaniach skurczu okazuje się mieć istotne znaczenie w analizie ilościowej wyników podawanych w różnych opracowaniach naukowych. Przy braku sprecyzowania rodzaju próbek, na których realizowano badania, analiza porównawcza może prowadzić do błędnych wniosków. W Polsce najczęściej stosowanym typem próbek do badań skurczu są beleczki 100 × 100 × 500 mm, podczas gdy za granicą oprócz tego typu używane są również inne próbki, np. beleczki 40 × 40 × 160 mm, 50 × 50 × 250 mm, 50 × 50 × 300 mm, 50 × 50 × 285 mm, 75 × 75 × × 285 mm, 100 × 100 × 400 mm, 127 × 127 × 500 mm, czy nawet walce 76/270 mm.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Specyfika zmian objętościowych betonów lekkich

Wysoka porowatość stosowanych kruszyw lekkich (LWA), dochodząca nawet do 70%, implikuje ich relatywnie niski moduł sprężystości (ca 12–20 GPa) w porównaniu z kruszywami zwykłymi, charakteryzującymi się modułem z zakresu 20–100 GPa. W rezultacie skurcz betonów lekkich kształtuje się na wyższym poziomie (nawet o 50%) w porównaniu z betonami na kruszywach zwykłych tej samej klasy. W przypadku lekkich betonów konstrukcyjnych (SLWAC) dodatkowym czynnikiem powodującym wzrost skurczu jest stosowanie matryc o niższym wskaźniku wodno-cementowym i wyższej zawartości cementu w porównaniu z betonami konstrukcyjnymi na kruszywach zwykłych (SNWAC). Stosowanie takich matryc jest konieczne w celu zapewnienia danego poziomu wytrzymałości betonu lekkiego przez zrównoważenie niskiej wytrzymałości kruszyw porowatych.

Wyższy skurcz betonów lekkich potwierdzają liczne wyniki badań, np. [7–9]. Fakt ten znalazł również swoje odbicie w wytycznych normowych [10, 11] zakładających wzrost odkształceń skurczowych $\varepsilon_{lcs,\infty}$ o 50% przy klasach do LC 20/22 oraz o 20% powyżej tej klasy w stosunku do odkształceń NWAC o tej samej wytrzymałości, wyznaczonych na podstawie [6]. Oszacowana w ten sposób wartość skurczu obarczona jest jednak większym błędem niż zdarza się to w przypadku betonów zwykłych. Zjawisko skurczu betonów lekkich ma bowiem charakter bardziej złożony, a ze względu na specyficzną strukturę tych betonów wpływ niektórych czynników determinujących jego wielkość i rozwój w czasie okazuje się być zdecydowanie silniejszy. Do najważniejszych czynników, których oddziaływanie na skurcz w przypadku LWAC i NWAC różni się istotnie, należy zaliczyć strukturę kruszyw lekkich oraz procedury wykonywania betonu.



Rys. 1. Zależność skurczu względnego betonu S_c (w odniesieniu do skurczu matrycy S_m) od zawartości objętościowej kruszywa lekkiego. Na podstawie [9]
Fig. 1. Relationships among the relative shrinkage of concretes S_c (related to matrix shrinkage S_m) and volume fraction of aggregates. On the basis of [9]

Struktura stosowanych kruszyw lekkich zależy od surowców użytych do ich produkcji oraz od technologii ich produkcji. Przy tej samej technologii wytwarzania kruszyw, podobnie jak dla NWAC, LWA o wyższych gęstościach pozornych, a zatem i wyższym module sprężystości, dają możliwość redukcji skurczu. Niemniej jednak moduł sprężystości kruszywa w przypadku LWA zdeterminowany jest nie tylko ich gęstością pozorną,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

ale również wiązaniami strukturalnymi pomiędzy cząsteczkami tworzącymi szkielet kruszywa. Przykładowo, technologia spiekania w wysokich temperaturach, zapewniająca tworzenie się wiązań ceramicznych w strukturze kruszywa, gwarantuje istotnie niższy skurcz w porównaniu z kruszywami lekkimi produkowanymi w technologii utwardzenia z tych samych surowców przy tej samej ich gęstości pozornej [9, 13]. W rezultacie kruszywa spiekane (np. popiołoporyt, keramzyt), charakteryzując się z reguły wyższym modułem sprężystości w porównaniu z matrycą cementową, pod względem jakościowym wykazują podobny jak kruszywa zwykłe hamujący wpływ na skurcz betonu. Natomiast w przypadku kruszyw utwardzanych, charakteryzujących się niższym modułem sprężystości niż matryca i wykazujących czasami zdolności do samoskurczu, obserwuje się całkowicie odwrotne tendencje, co przedstawiono na rys. 1.

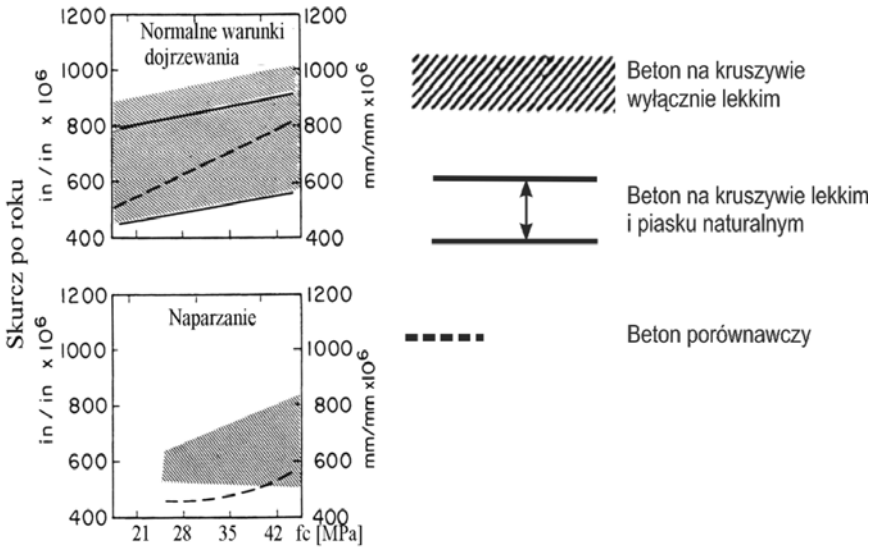
Jakościowy wpływ zawartości LWA na skurcz betonu zależy zatem od struktury kruszywa, przy czym pod względem ilościowym, w związku z większą kompatybilnością modułów sprężystości kruszywa lekkiego i matrycy, okazuje się on mniej istotny niż w przypadku NWAC. Należy tu jednak zaznaczyć, że o ile w przypadku betonów zwykłych, ze względu na wytrzymałość i aspekt ekonomiczny, dąży się do stosowania najmniejszych, zapewniających szczelność struktury ilości matrycy w odniesieniu do kruszywa, o tyle betony lekkie charakteryzują się zdecydowanie szerszym zakresem proporcji matrycy do kruszywa. W przeciwieństwie do NWAC obniżenie zawartości kruszywa lekkiego w betonie konstrukcyjnym może znacząco wpływać na wzrost jego wytrzymałości [1].

Nieporównywalnie wyższa nasiąkliwość kruszyw lekkich (wahająca się od 2 do 30%, a nawet do 40%) w stosunku do kruszyw zwykłych wywiera istotnie większy, bardziej korzystny wpływ na skurcz betonu. Porowate kruszywa lekkie zdolne do absorpcji wody stanowią jej wewnętrzne rezerwuary do dalszej hydratacji cementu. W rezultacie zastosowanie LWA może przynieść redukcję skurczu autogenicznego poprzez eliminowanie samoosuszania. Fakt ten ma ogromne znaczenie w przypadku betonów na matrycach o niskich wskaźnikach wodno-cementowych, w których zwarta struktura uniemożliwia skuteczną pielęgnację zewnętrzną. Efektywność redukcji skurczu autogenicznego jest wprost proporcjonalna do nasiąkliwości LWA i jego wilgotności przed zastosowaniem. Przy wprowadzeniu kruszyw o odpowiednio wyższej nasiąkliwości, wstępnie nawilżonych, istnieje możliwość całkowitej redukcji skurczu autogenicznego [14, 16]. Stąd we wczesnym okresie betony te mogą nawet wykazywać pęcznienie, wcale nie dojrzewając w środowisku o wysokiej wilgotności. Przy stosowaniu kruszyw nawilżonych dochodzi również do pewnego ograniczenia skurczu od wysychania poprzez zapewnienie kontynuacji procesów hydratacji. Okazuje się, że nawet używanie LWA w stanie suchym, ale o znacznej nasiąkliwości, może korzystnie wpłynąć na redukcję skurczu. Kruszywo, absorbując wodę z zaczynu, chroni ją przed początkowym odparowaniem i w miarę upływu czasu i postępu hydratacji stopniowo uwalnia ją wskutek działania sił kapilarnych wywołanych gradientem wilgotności pomiędzy kruszywem i matrycą. Z czasem migracja wilgoci z kruszywa do matrycy ulega spowolnieniu wskutek deperkolacji, czyli przerwania sieci porów kapilarnych nowo powstałymi produktami hydratacji hamującymi wewnętrzny transport wody.

Zjawisko wewnętrznej pielęgnacji wykorzystuje się w konstrukcyjnych betonach zwykłych, w szczególności tych o wysokiej wytrzymałości. W tym przypadku zastosowanie dodatku nasączonego kruszywa lekkiego, w ilości gwarantującej dostarczenie objętości wody odpowiadającej objętości zmian autogenicznych, również eliminuje skurcz autogeniczny, co potwierdzają badania [16, 17].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Stosując niskoprężną obróbkę termiczną, można zredukować skurcz betonu lekkiego o 10 do 40% [7], co przedstawiono na rys. 2. Generalnie jednak skurcz lekkich betonów kruszywowych, ze względu na ich zdolność do pielęgnacji wewnętrznej, wykazuje mniejszą, w porównaniu do NWAC, zależność od czasu i warunków pielęgnacji zewnętrznej oraz od warunków temperaturowo-wilgotnościowych środowiska, w którym dojrzewa.



Rys. 2. Wpływ poziomu wytrzymałości betonu oraz warunków dojrzewania na skurcz [7]
Fig. 2. Influence of concrete strength and curing conditions on shrinkage [7]

4. Wpływ fazy włóknistej na zmiany objętościowe

Dodatek zbrojenia rozproszonego wpływa na redukcję skurczu betonu, w szczególności w jego wczesnym stadium, gdy istnieje największe ryzyko zarysowania betonu. Na tym etapie, gdy wytrzymałość na rozciąganie betonu nie jest jeszcze odpowiednio rozwinięta, włókna – z jednej strony – przeciwdziałają kurczeniu się betonu, redukując tym samym naprężenia rozciągające wywołane skurczem, z drugiej strony natomiast – przejmują część powstałych naprężeń, minimalizując ryzyko pojawienia się rys skurczowych oraz ograniczając ich zdolność do propagacji i poszerzania.

Ogólna ocena ilościowego wpływu zbrojenia rozproszonego na redukcję skurczu jest w zasadzie niemożliwa, gdyż istotne tu są nie tylko czynniki determinujące skurcz betonu, omówione w podrozdziale 2.6, ale dodatkowo parametry charakteryzujące fazę włóknistą, a mianowicie: rodzaj włókien, ich geometrię i zawartość. Ocenę efektywności dodatkowo komplikuje nakładanie się efektu skali związanego ze skurczem od wysychania oraz efektu skali związanego z zastosowaniem dodatku włókien. Efektywność zbrojenia rozproszonego w poprawie właściwości mechanicznych, a w szczególności wytrzymałości na rozciąganie, mającej tak istotne znaczenie w przebiegu skurczu betonu, jest tym większa, im mniejsze są wymiary elementu/próbek do badania. Stsoując jako ciała próbne beleczki

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

o niewielkich przekrojach, a zatem charakteryzujące się wyższym potencjalnym skurczem, wpływ fazy włóknistej na jego redukcję może się okazać zdecydowanie silniejszy. W rezultacie efektywność stosowania dodatku włókien na redukcję skurczu oceniana jest rozmaicie przez różnych badaczy, przez niektórych jako minimalna (np. [3]), przez innych jako znacząca: rzędu 10 do 20% (np. [18]), a w skrajnych przypadkach (np. przy zawartości włókien stalowych do 8% [19]) bardzo istotna – dochodząca do 40%. Na podstawie badań zapraw [20, 21] można sądzić, że przy ustalonych proporcjach matrycy do kruszywa grubego oraz przy umiarkowanych zawartościach fazy włóknistej (polipropylenowej do 0,3%, stalowej do 2%) skurcz betonu w większym stopniu zdeterminowany będzie stosunkiem cementu do piasku niż zawartością włókien czy wskaźnikiem wodno-cementowym.

W przypadku lekkich betonów kruszywowych, charakteryzujących się z reguły wyższym poziomem skurczu, można wnioskować, że dodatek zbrojenia rozproszonego wpłynie bardziej efektywnie na redukcję skurczu w porównaniu z betonami zwykłymi. Nieliczne prace badawcze dotyczące tego zagadnienia, ze względu na zróżnicowane warunki badań, nie dają jednoznacznej odpowiedzi. W [22] wykazano prawie dwukrotną redukcję skurczu betonu z kruszywem polistyrenowym z zastosowaniem 1% włókien stalowych, ograniczając go tym samym do poziomu skurczu betonu zwykłego, charakteryzującego się tą samą zawartością cementu i tym samym wskaźnikiem wodno-cementowym. Jednak przy bardziej sztywnych kruszywach efektywność redukcji skurczu okazała się istotnie niższa: przykładowo w [23] osiągnięto 20% redukcję skurczu betonu ze spiekanych glin pęczniejących, a w [24] redukcja skurczu betonu z kruszywem popiołoporytowym okazała się minimalna. Pomimo tak znacznych rozbieżności uzyskanych rezultatów, spowodowanych głównie różnicami w składach betonów, z badań [23, 24] wynika zaskakujący wniosek, że rodzaj zastosowanych włókien (stalowe, polipropylenowe, węglowe oraz hybrydowe w różnych kombinacjach) ma minimalny wpływ na redukcję skurczu, podobnie jak również ich zawartość (w zakresie 0,28–1,0% dla włókien polipropylenowych oraz 0,56–1,7% dla włókien stalowych) nie ma istotnego znaczenia.

Dodatkowymi czynnikami, które zaburzają ocenę efektywności wpływu fazy włóknistej na skurcz betonów lekkich są warunki i czas pielęgnacji betonu oraz długość okresu badania, pomijane w analizach. Tymczasem zmiany objętościowe zachodzące w LWAC w czasie pielęgnacji, zatem w okresie przed badaniem skurczu, mogą stanowić klucz do wyjaśnienia znacznych rozbieżności w ocenie wpływu fazy rozproszonej na skurcz betonów lekkich. Wpływ ten w zależności od okresu prowadzenia obserwacji może mieć różny charakter, nie tylko pod względem ilościowym, ale nawet jakościowym.

5. Badania własne

Celem podjętych badań była ocena zmian objętościowych konstrukcyjnych betonów lekkich z kruszywem popiołoporytowym modyfikowanych fazą włóknistą, z włączeniem do obserwacji okresu pielęgnacji poprzedzającej okres wysychania. W założeniach podjętego programu badawczego było wykonanie LWAC z krajowych składników przy umiarkowanych, racjonalnych pod względem ekonomicznym zawartościach cementu oraz zbrojenia rozproszonego, a zatem takich, które znalazłyby zastosowanie w praktyce.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

5.1. Program badawczy

W ramach zrealizowanego programu badawczego wykonano dwie serie betonów o zróżnicowanych poziomach gęstości, zakładanych jako 1600 oraz 1700 kg/m^3, oraz wytrzymałości w zakresie 35–40 i 45–50 MPa.

Do badań wytypowano kruszywo popiołoporytowe Pollytag frakcji 4–8 mm, które spośród krajowych kruszyw lekkich dostępnych na rynku stwarza największe możliwości kształtowania wysokich poziomów wytrzymałości betonu. W celu zminimalizowania ryzyka segregacji składników oraz absorpcji zaczynu/wody z mieszanki kruszywo (o maksymalnej nasiąkliwości wynoszącej 22%) przed zmieszaniem z pozostałymi składnikami było nawilżane do wilgotności 15%, co odpowiadało poziomowi jego nasiąkliwości w wodzie po 30 min. Dodatkowo zabieg taki gwarantuje bardziej korzystne warunki pielęgnacji betonów lekkich i ma istotne znaczenie w kształtowaniu późniejszych właściwości betonu [1].

Jako zbrojenie rozproszone zastosowano dwa typy włókien: włókna polipropylenowe Baucon o długości 12 mm w ilościach 0; 0,6; 1,2; 1,8 kg/m^3, odpowiadających zawartościom objętościowym na poziomie 0; 0,07 (dawka zalecana przez producenta); 0,13 oraz 0,20%, oraz włókna stalowe Dramix o haczykowatych zakończeniach, o długości 50 mm i średnicy 0,75 mm (l/d = 67) w ilościach: 0; 30; 45 i 60 kg/m^3, odpowiadających zawartościom objętościowym na poziomie 0; 0,4; 0,6 oraz 0,8%.

Tabela 1

Skład i parametry wykonanych betonów lekkich

Seria	Oznaczenia	Składniki [kg/m^3]						Parametry		
		PF*	SF*	C*	LWA*	P*	W*	W/C*	P/C*	lwa/m*
IP	I0	0	0	345	765	414	190	0,55	1,20	1,34
	IP1	0,6	0							
	IP2	1,2	0							
	IP3	1,8	0							
IIP	II0	0	0	446	700	458	164	0,37	1,03	1,16
	IIP1	0,6	0							
	IIP2	1,2	0							
	IIP3	1,8	0							
IS	I0	0	0	345	765	414	190	0,55	1,20	1,34
	IS1	0	30							
	IS2	0	45							
	IS3	0	60							
IIS	II0	0	0	446	700	458	164	0,37	1,03	1,16
	IIS1	0	30							
	IIS2	0	45							
	IIS3	0	60							

* PF – włókna polipropylenowe, SF – włókna stalowe, C – cement, LWA – Pollytag 4–8 mm, P – piasek naturalny, W – woda, lwa/m – proporcje objętościowe kruszywa lekkiego do matrycy.

Pozostałe składniki wykonanych betonów to: cement CEM I 42,5 R, piasek naturalny, woda oraz superplastyfikator. Dobór dawki domieszki upłynniającej (od 0 do 1,2% masy cementu) zdeterminowany był zapewnieniem odpowiedniej urabialności, weryfikowanej doświadczalnie w ramach zarobów próbnych.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Skład oraz parametry charakteryzujące poszczególne mieszanki betonowe przedstawiono w tab. 1.

Łącznie wykonano 8 mieszanek betonowych, z których zaformowano po 6 próbek sześciennych o boku 150 mm, przewidzianych do badań gęstości i wytrzymałości na ściskanie, oraz po 6 belek o wymiarach 100 × 100 × 500 mm do badań wytrzymałości na zginanie i zmian objętościowych (liniowego pęcznienia i skurczu). Badania zmian objętościowych dzięki reperom osadzonym na zabetonowanych trzpieniach rozpoczęto już po ok. 5 h od wykonania beleczek. Po ich rozformowaniu w dniu następnym badania były kontynuowane. Przy czym przez pierwszych 28 dni beleczki, podobnie jak próbki do pozostałych badań, przechowywano w temperaturze 20 ± 2ºC oraz wilgotności 95 ± 5%. Następnie przez kolejnych 11 miesięcy badania skurczu realizowano w warunkach o tej samej temperaturze, ale zdecydowanie niższej wilgotności 50 ± 5%. Łączny okres prowadzenia obserwacji był zatem 3,5-krotnie dłuższy niż w przypadku badań omówionych w [22, 23].

5.2. Właściwości wytrzymałościowe

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawione w tab. 2 wskazują na istotnie zróżnicowany poziom gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie betonów obu serii, co odpowiada przyjętym w programie badawczym założeniom. Charakterystyki te dla betonu kontrolnego serii I (I0) osiągnęły następujące wartości średnie po 28 dniach dojrzewania: gęstość betonu w stanie suchym 1580 kg/m^3, co odpowiada klasie gęstości D1,6; wytrzymałość na ściskanie 39,0 MPa. Te same parametry dla betonu kontrolnego serii II (II0) wyniosły: gęstość betonu w stanie suchym 1710 kg/m^3, co odpowiada klasie gęstości D1,8; wytrzymałość na ściskanie 47,5 MPa. Przyrost wytrzymałości betonu serii II w stosunku do betonu serii I o 22% jest efektem nie tylko obniżenia wskaźnika wodno-cementowego z 0,55 do 0,37, co wiąże się ze wzrostem zawartości cementu o 101 kg/m^3, ale również ze zmniejszeniem proporcji kruszywa lekkiego w stosunku do bardziej wytrzymałej matrycy (lwa/m) z wartości 1,34 do 1,16.

Analiza uzyskanych wyników badań wytrzymałościowych po 28 dniach dojrzewania wykazała, że dodatek zarówno włókien stalowych, jak i polipropylenowych w zasadzie nie wywiera żadnego wpływu na wytrzymałość na ściskanie badanych betonów lekkich bez względu na jej poziom. Należy tu zaznaczyć, że różnice pomiędzy wartościami średnimi wytrzymałości na ściskanie dla betonów poszczególnych serii są mniejsze niż różnice pomiędzy wynikami dla danego betonu serii. Istotny natomiast okazał się przyrost wytrzymałości na zginanie betonów lekkich modyfikowanych fazą rozproszoną. Efektywność wzrostu wytrzymałości na zginanie była większa w przypadku betonów o wyższej wytrzymałości i zawierających włókna stalowe. W rezultacie przy stosowaniu włókien stalowych w ilości do 0,8% uzyskano wzrost wytrzymałości na zginanie do 61%, podczas gdy dla włókien polipropylenowych w ilości do 0,20% wzrost ten wynosił jedynie 25%.

Oceniając rozwój właściwości wytrzymałościowych w okresie od 28 do 365 dni dojrzewania, należy stwierdzić, że dwukrotnie wyższy przyrost wytrzymałości na ściskanie wykazywały betony serii I (średnio o 18%) w porównaniu z betonami serii II (średnio o 9%). Fakt ten należy tłumaczyć ograniczającym wpływem niskiej wytrzymałości kruszywa lekkiego, która uniemożliwia bardziej efektywny przyrost wytrzymałości betonu z zastosowaniem mocniejszej matrycy. Praktycznie nie obserwuje się przyrostów wytrzymałości na zginanie w czasie. W przypadku betonu IIP3 wyższa wytrzymałość po

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

365 dniach świadczy nie tyle o jej znacznym przyroście, co o zaniżonym wyniku w okresie 28 dni.

Tabela 2

Wyniki badań gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie wykonanych betonów lekkich

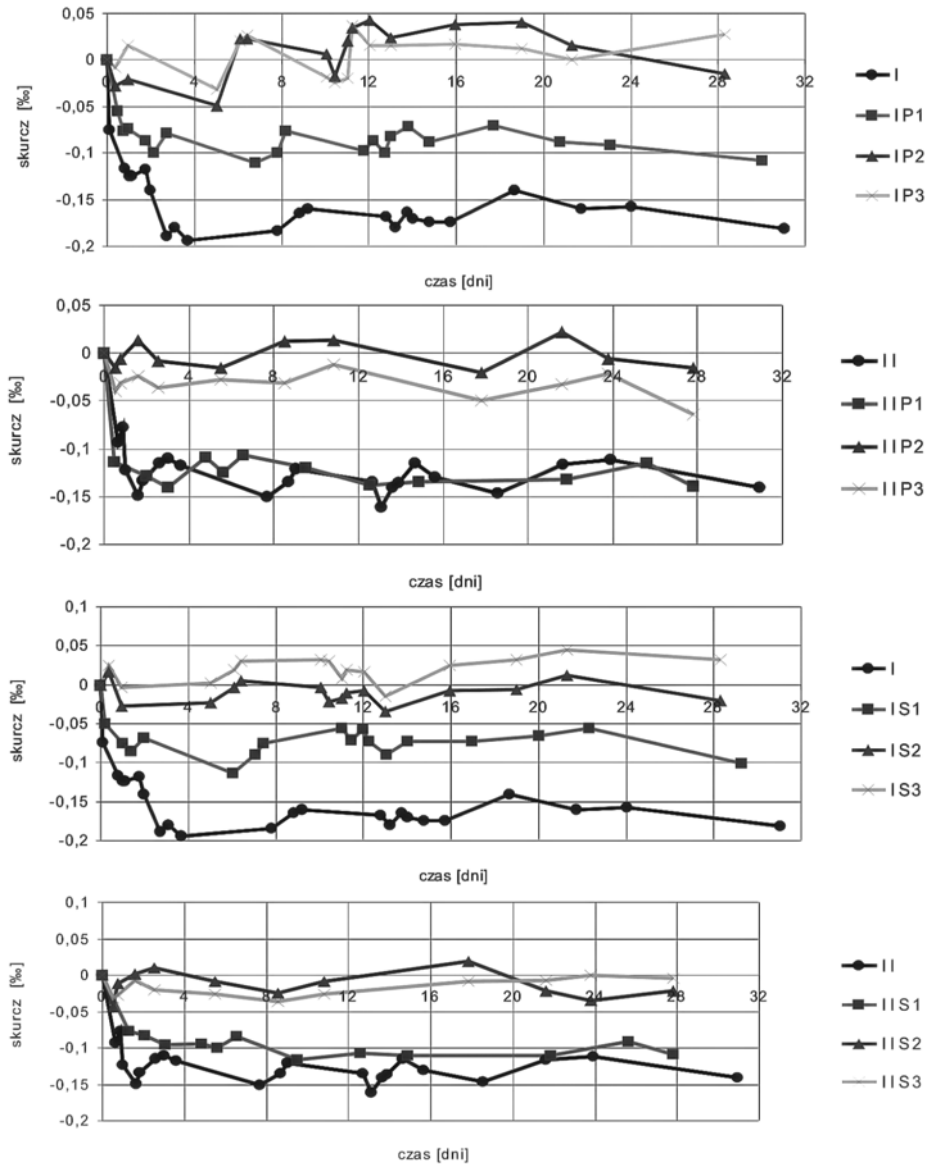
Seria	Oznczenia	Gęstość [kg/m^3]	$f_{cm,\,28}$ * [MPa]	$f_{cm\,365}$ * [MPa]	$f_{fm,\,28}$ * [MPa]	$f_{fm,\,365}$ * [MPa]
IP	I0	1580	39,0	45,5	5,1	5,1
	IP1	1590	39,5	46,5	5,5	5,2
	IP2	1580	37,5	47,5	5,9	5,7
	IP3	1580	38,5	47,0	6,4	5,6
IIP	II0	1710	47,5	53,0	6,2	6,0
	IIP1	1710	47,0	51,0	6,5	6,6
	IIP2	1700	48,0	49,0	6,5	7,3
	IIP3	1700	47,5	49,5	6,8	7,2
IS	I0	1580	39,0	45,5	5,1	5,1
	IS1	1610	38,0	44,0	5,4	5,9
	IS2	1620	38,5	41,5	7,2	7,0
	IS3	1640	39,0	46,0	7,6	7,6
IIS	II0	1710	47,5	53,0	6,2	6,0
	IIS1	1740	47,5	49,5	6,5	6,5
	IIS2	1750	49,0	55,5	6,5	6,8
	IIS3	1770	48,0	54,0	10,0	9,6

* $f_{cm,\,cube\,28}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie określana po 28 dniach dojrzewania,
$f_{cm,\,cube\,365}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie określana na po 365 dniach dojrzewania,
$f_{fm,\,28}$ – średnia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określana po 28 dniach dojrzewania,
$f_{fm,\,365}$ – średnia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określana po 365 dniach dojrzewania.

5.3. Pęcznienie

Dojrzewanie badanych betonów lekkich w warunkach podwyższonej wilgotności (95 ± 5%) zaowocowało nie tyle ograniczeniem skurczu, co jego całkowitą eliminacją. W rezultacie betony te przez okres pierwszych 28 dni wykazywały pęcznienie, które nie miałoby miejsca w przypadku betonów zwykłych przechowywanych w podobnych warunkach. Pęcznienie to bowiem jest rezultatem zarówno absorpcji wody z otoczenia, jak i wody wewnętrznej zgromadzonej w porach kruszywa lekkiego. Pęcznienie okazało się być wyższe dla betonu kontrolnego serii I (osiągając wartość do 0,20‰) w porównaniu z serią II (do 0,15‰). Należy uznać, że przy znacznych ilościach wody zawartej w kruszywie lekkim (105 i 115 kg/m^3) jej większa ilość w przypadku betonu I0 nie ma tu istotniejszego znaczenia. Decydujące są natomiast zawartość matrycy oraz jej wskaźnik wodno-cementowy. Jego wyższa wartość dla betonu I0 determinowała jego bardziej porowatą strukturę, której kapilary w mniejszym stopniu uległy deperkolacji. W rezultacie absorpcja wody

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Wpływ pielęgnacji w warunkach wilgotności 95 ± 5% na zmiany objętościowe badanych betonów lekkich
Fig. 3. Influence of curing in 95 ± 5% humidity conditions on volume changes of researched lightweight concretes

przez matrycę cementową była większa i możliwa w dłuższym czasie, powodując stabilizację pęcznienia w późniejszym terminie (po ok. 4 dniach, a nie 2 jak dla betonu II0). Późniejsze zaobserwowane nieznaczne wahania zmian objętościowych (±0,05‰) wynikają z zaistniałych zmian warunków przechowywania próbek oraz błędów pomiarowych.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że rozpoczęcie obserwacji zmian objętościowych we wczesnym okresie dojrzewania przyczyniło się do oszacowania bardziej miarodajnej wartości pęcznienia w porównaniu do standardowych badań realizowanych po 24 h. Po takim bowiem okresie w przypadku obu betonów kontrolnych wartość pęcznienia wyniosła 0,12‰, co dla betonu I0 i II0 stanowiło – odpowiednio – aż 60 i 80% jej wartości maksymalnej. Zatem pominięcie tak znaczącej części zmian objętościowych zaowocuje radykalnym zaniżeniem wyniku pomiarów.

Wpływ włókien na zmiany objętościowe badanych betonów lekkich uwidocznił się już we wczesnym okresie badania. Jak można zaobserwować na wykresach (rys. 3), dodatek włókien zarówno stalowych, jak i polipropylenowych istotnie wpływał na redukcję zmian objętościowych, okazując się nieznacznie istotniejszy dla betonów serii I. W tym przypadku nawet najmniejsza zastosowana zawartość fazy włóknistej wyraźnie obniżała pęcznienie betonu (o ok. połowę), podczas gdy dla betonów serii II, z zastosowaniem analogicznych zawartości włókien stalowych, redukcja ta jest wyraźnie mniej efektywna i zupełnie niezauważalna dla włókien polipropylenowych. Przy większych zawartościach zbrojenia rozproszonego w przypadku obu serii betonów dochodzi praktycznie do całkowitej eliminacji zmian objętościowych. Interpretując uzyskane wyniki, należy stwierdzić, że rola fazy włóknistej w ograniczeniu pęcznienia betonu jest podobna jak przy hamowaniu rozwoju rys poprzez ich mostkowanie. W tym przypadku włókno, „spinając" strukturę żelu cementowego, uniemożliwia rozsunięcie się jego cząsteczek wskutek działania ciśnienia rozklinowującego absorbowanej wody.

5.4. Skurcz

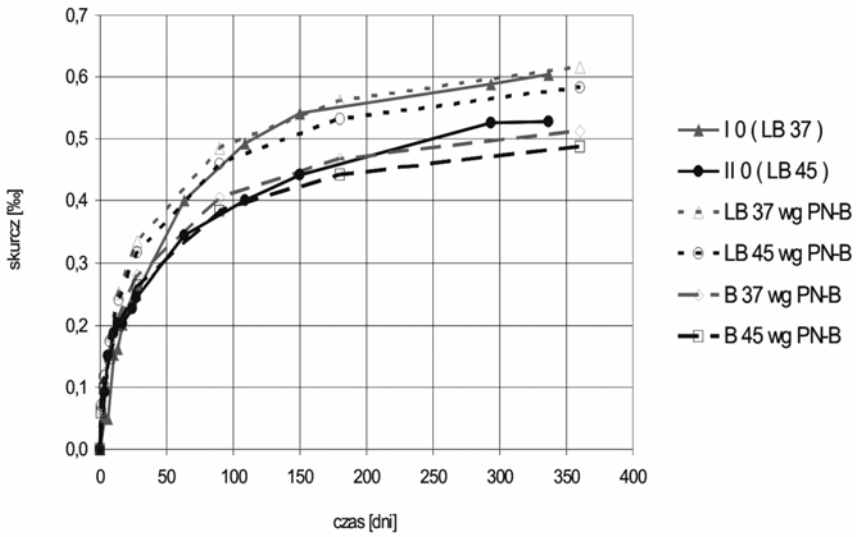
Skurcz badanych betonów lekkich I0 i II0 po upływie roku kształtował się – odpowiednio – na poziomie 0,60 oraz 0,53 ‰. Wyraźnie zatem zaznaczył się tu wpływ wskaźnika wodno-cementowego. Pomimo bowiem większej o 101 kg/m^3 zawartości cementu dla betonu I, obniżenie w tym przypadku W/C z wartości 0,55 do 0,37 przyniosło redukcję skurczu o 12%.

Porównując uzyskane wyniki z wartościami obliczonymi na podstawie norm krajowych [6, 12] dla betonów o analogicznych wytrzymałościach (rys. 4), należy stwierdzić, że w przypadku betonu LB37 oszacowanie skurczu po upływie roku jest praktycznie identyczne jak pomierzone wartości dla betonu I0, co oznacza wartości wyższe o 20% w odniesieniu do betonu na kruszywie zwykłym tej samej klasy. Natomiast w przypadku betonu II0 uzyskany wynik jest niższy o 9% od szacowanego dla LB45 i w rezultacie wyższy jedynie o 8%, a nie, jak zakłada [10], o 20% od skurczu obliczonego dla B45. Należy również zaznaczyć istotnie mniejsze zróżnicowanie szacowanych na podstawie norm wartości skurczu dla betonów różnych klas w odniesieniu do uzyskanych wyników.

Ocena skurczu badanych betonów lekkich nie może jednak ograniczać się jedynie do końcowych jego wartości. Ze względu bowiem na ewentualne zarysowanie istotniejszy jest przebieg skurczu w czasie. W tym przypadku pielęgnacja wilgotnościowa (zarówno wewnętrzna, jak i zewnętrzna) badanych betonów lekkich, wynikająca z istotnych zdolności absorpcyjnych i akumulacyjnych kruszywa, wpłynęła znacząco na redukcję skurczu we wczesnym okresie. W rezultacie badane betony przez ok. 50 pierwszych dni wysychania charakteryzowały się skurczem nie tylko niższym w odniesieniu do wartości normowo szacowanych dla analogicznych betonów lekkich, ale nawet niższym w porównaniu z betonami zwykłymi tych samych klas. W przypadku betonu II, ze względu na jego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

mniejszą porowatość, a zatem wolniejszy proces wysychania, taka tendencja utrzymywała się nawet dłużej i w okresie do 100 dni jego skurcz był praktycznie taki jak dla betonów zwykłych. Za znamienne należy również uznać, że przez pierwszych ok. 20 dni beton I0, ze względu na większe ilości zakumulowanej wody, wykazywał zdecydowanie niższy skurcz niż beton II0.



Rys. 4. Skurcz badanych betonów lekkich na tle wartości normowych (wg [6, 10]) dla LWAC i NWAC o podobnych wytrzymałościach

Fig. 4. Shrinkage of researched lightweight concretes in comparison with standard values (acc. to 6, 10) for LWAC and NWAC of analogical strength

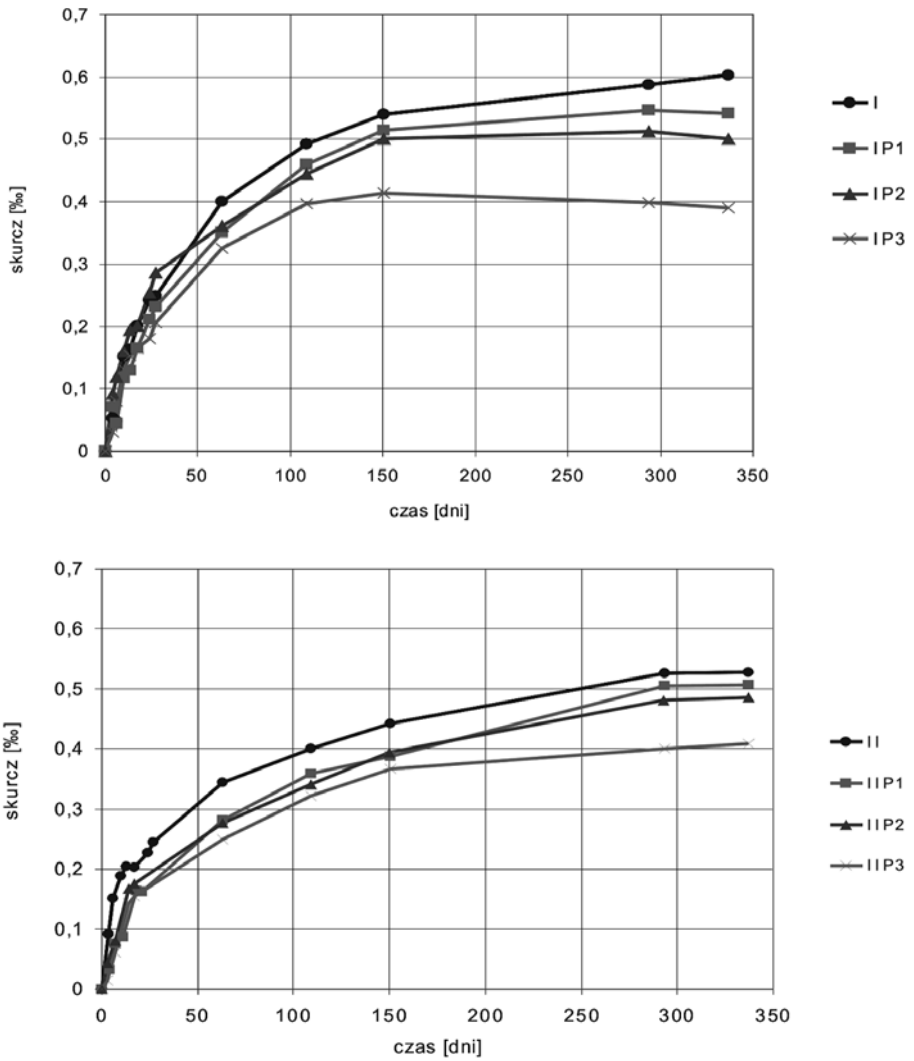
Analizując wpływ fazy włóknistej na skurcz badanych betonów lekkich (rys. 5 i 6), należy stwierdzić istotną jego redukcję wskutek zastosowania zbrojenia rozproszonego.

Przy wprowadzonych ilościach włókien redukcja ta okazała się bardziej efektywna w przypadku polipropylenu, osiągając po roku wartość do 35 i 23%, odpowiednio, dla betonów serii I i II. Osiągnięte po tym czasie wartości skurczu wynoszące 0,39‰ dla IP3 oraz 0,41‰ dla IIP3 są zatem znacząco niższe nawet w porównaniu z betonami zwykłymi tej samej klasy.

W przypadku betonów lekkich z włóknami stalowymi wartości skurczu wynoszą 0,50‰ dla IS3 oraz 0,44‰ dla IIS3, co oznacza jego redukcję w stosunku do betonów niezbrojonych o ok. 17% dla obu betonów. Mniejsza efektywność włókien stalowych w obniżeniu skurczu wynika głównie z nieporównywalnie ich mniejszej liczby przypadającej na jednostkę objętości betonu (od 84 do 168 tys. sztuk/m^3) w odniesieniu do włókien polipropylenowych (od 200 do 600 mln sztuk/m^3). W przypadku betonów z włóknami stalowymi wpływ ich zawartości na skurcz okazał się też mniej istotny. Różnic w wartościach skurczu nie należy tu jednak interpretować ani ilościowo, ani nawet jakościowo, ze względu na ich rząd wielkości porównywalny z rozrzutem wyników dla poszczególnych betonów. Za większy rozrzut wyników betonów z włóknami stalowymi odpowiada nierównomierna ich dystrybucja w objętości betonu, a w szczególności w jego górnej warstwie, na

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

której realizowany był pomiar skurczu. W przypadku betonów o największej zawartości włókien mogło nawet dojść do segregacji składników, w rezultacie której skurcz mierzony na górnej powierzchni belek będzie większy niż na dolnej. Być może tak należy tłumaczyć wyższą wartość skurczu dla betonu IIS3 w porównaniu z betonem IIS1, co dodatkowo potwierdza największy zaobserwowany rozrzut wyników dla tego betonu.

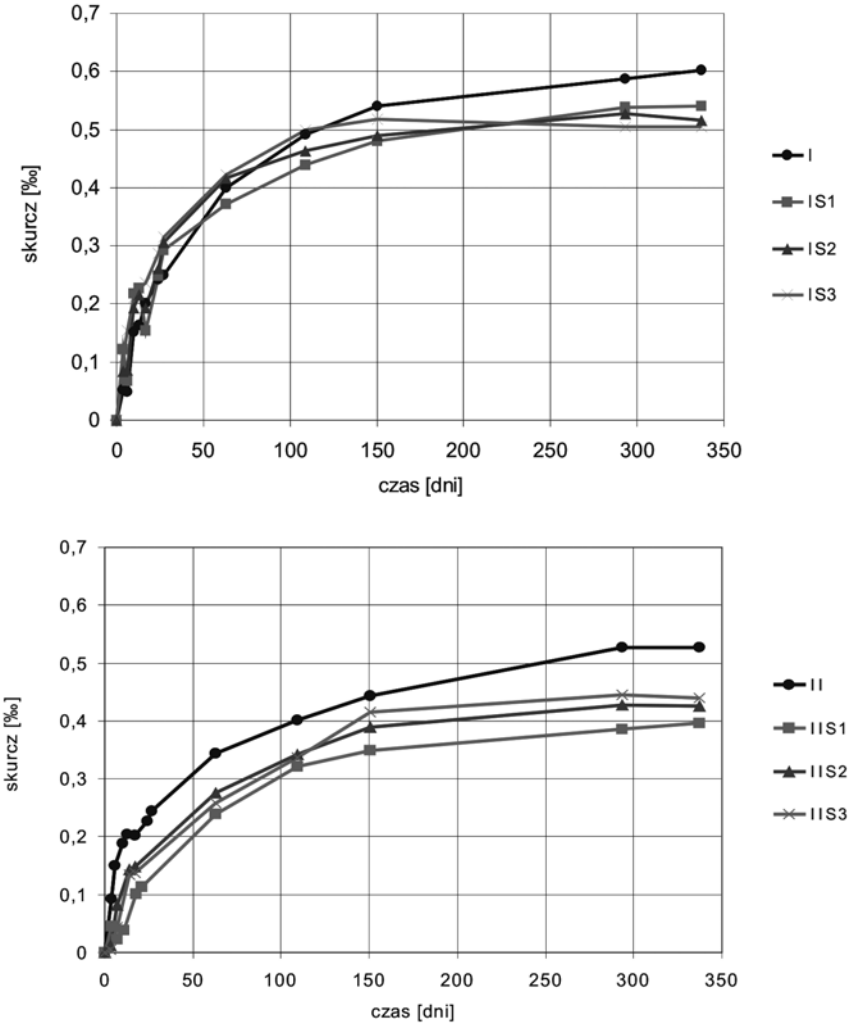


Rys. 5. Wpływ włókien polipropylenowych na skurcz badanych betonów lekkich
Fig. 5. The influence of polypropylene fibres on shrinkage of researched lightweight concretes

Przy ocenie wpływu fazy włóknistej na skurcz badanych betonów lekkich należy zwrócić uwagę na to, że we wczesnym okresie wysychania różnice w skurczu pomiędzy be-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

tonami niezbrojonymi a zbrojonymi były nieznaczne, w szczególności w betonach serii I. Początkowo również nie uwidaczniał się wpływ różnej ilości zastosowanych włókien. Prawdopodobnie w tym czasie woda zmagazynowana przez beton skutecznie redukowała skurcz, a w miarę jej ubywania swoją rolę zaczynały odgrywać włókna, różnicując



Rys. 6. Wpływ włókien stalowych na skurcz badanych betonów lekkich
Fig. 6. The influence of steel fibres on shrinkage of researched lightweight concretes

poziom skurczu. Przy czym zarówno stopień tej redukcji, jak i jej zróżnicowanie uzależnione są nie tylko od zawartości i rodzaju włókien, ale i od potencjalnego skurczu betonu niezbrojonego. Taką hipotezę potwierdzają uzyskane wyniki badań. W przypadku betonów serii I ilość wody dodatkowo zmagazynowanej w matrycy, wskutek nieograniczonego zbrojeniem rozproszonym pęcznienia, okazała się wystarczająca do zrekompensowania redukcji

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

skurczu wynikającej z zastosowania włókien polipropylenowych. W przypadku użycia mniej efektywnych pod względem redukcji skurczu, włókien stalowych ilość ta okazała się być czynnikiem nawet bardziej ograniczającym skurcz niż faza włóknista. Stąd skurcz niezbrojonego betonu I0 w okresie początkowym był niższy niż dla betonów tej serii zbrojonych włóknem stalowym. Natomiast w przypadku serii II bardziej zwarta struktura betonu uniemożliwiła zmagazynowanie w okresie wilgotnej pielęgnacji wystarczającej ilości wody, co spowodowało, że beton II0 od samego początku charakteryzował się wyższym skurczem w porównaniu z betonami zbrojonymi zarówno włóknami stalowymi, jak i polipropylenowymi.

Krótszy okres obserwacji skurczu i/lub wyższy poziom wytrzymałości betonu może zatem stanowić przyczynę wykazanego w badaniach [23, 24] nieistotnego wpływu zawartości włókien na skurcz. Innym prawdopodobnym wytłumaczeniem tego faktu może być stosowanie w tych przypadkach zdecydowanie, nawet 5-krotnie większych zawartości włókien w porównaniu z niniejszymi badaniami. Przy tak znaczących ilościach fazy rozproszonej skurcz betonu może okazać się już niezależny od jej zawartości.

6. Podsumowanie

Pomimo tego, że skurcz badanych betonów lekkich po upływie roku kształtuje się na wyższym poziomie niż dla betonów zwykłych tej samej klasy wytrzymałości, to jednak, ze względu na zastosowanie kruszywa wstępnie nawilżonego oraz wilgotnej pielęgnacji, we wczesnym okresie, w którym istnieje największe ryzyko zarysowania od zmian objętościowych, tendencje te są odwrotne. Dodatkowo, biorąc pod uwagę większą kompatybilność modułów sprężystości matrycy i kruszyw lekkich oraz doskonałą przyczepność ich obu faz, prawdopodobieństwo zarysowania tak wykonywanych betonów lekkich należy uznać za istotnie mniejsze w porównaniu z betonami zwykłymi.

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego, w szczególności w postaci włókien polipropylenowych, znacząco ogranicza wartość skurczu końcowego, sprowadzając go do poziomu niższego od betonów zwykłych tej samej klasy. Niemniej jednak w okresie początkowym wysychania betonu wobec zastosowania wilgotnej pielęgnacji (w szczególności tej wewnętrznej) wpływ fazy włóknistej ma mniejsze znaczenie. Efektywność zastosowania dodatku włókien na redukcję skurczu betonów lekkich okazuje się być silnie uzależniona od czasu badania, rodzaju włókien i ich zawartości oraz potencjalnego skurczu betonu niezbrojonego, zdeterminowanego zarówno strukturą betonu, jak i procedurami jego wykonywania i pielęgnacji. Należy zatem przypuszczać, że w przypadku betonów lekkich wykonywanych na kruszywach suchych i/lub kruszywach o mniejszej nasiąkliwości, jak również przy braku wilgotnej pielęgnacji tych betonów, wpływ zbrojenia rozproszonego na redukcję skurczu w okresie początkowym będzie bardziej widoczny.

Literatura

[1] Domagała L., *Problemy projektowania i wykonawstwa betonów lekkich z kruszyw spiekanych*, Przegląd Budowlany 12/2005, 22-29.

[2] Domagała L., *Właściwości betonów lekkich z kruszyw ze spiekanych popiołów lotnych*, Inżynieria i Budownictwo 12/2003, 703-707.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[3] Bentz D., Jensen O., *Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking*, Cement and Concrete Composites 26/2004, 677-685.
[4] Neville A., *Właściwości betonu*, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2000.
[5] Lura P., Bentz D.P., Lange D.A., Kovler K., Bentur A., *Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste*, Proceedings, Advances in Cement and Concrete, Engineering Conferences International, Copper Mountain, 2003, 89-99.
[6] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
[7] ACI 211.2 – 98, *Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete*, ACI, Farmington Hills, 1998.
[8] Clarke J., *Structural lightweight aggregate concrete*, Blackie Academic & Professional, Glasgow 1993.
[9] Chandra S., Berntsson L., *Lightweight aggregate concrete*, Noyes Publications, New York 2003.
[10] PN-B-03263:2000 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone wykonywane z kruszywowych betonów lekkich. Obliczenia statyczne i projektowanie.
[11] EN 1992 1-4:1994 Eurocode 2: Design of concrete structures. Structural lightweight aggregate concrete.
[12] PN-EN 206-1: 2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
[13] Liu X., Yang Y., Jiang A., *The influence of lightweight aggregate on the shrinkage of concrete*, Congress on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord 1995, 555-562.
[14] Curcio F., Galeota D., Gallo A., *High-performance lightweight concrete for the precast prestressed concrete industry*, IV CANMET/ACI/JCI International Conference, Tokushima 1998, 389-406.
[15] Kohono K., Okamoto T., Isikawa Y., Siata T., Mori H., *Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete*, Cement and Concrete Research 29/1999, 611-614.
[16] Bentur A., Igarashi S., Kovler K., *Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates*, Cement and Concrete Research 31/2001, 1587-1591.
[17] Zhutovsky S., Kovler K., Bentur A., *Efficiency of lightweigth aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage*, Materials and Structures 35/2002, 97-101.
[18] Barr B., Hoseinian S., Beygi M., *Shrinkage of concrete stored in natural environments*, Cement and Concrete Composites 25/2003, 19-29.
[19] Farhat F., Nicolaides D., Kannellopoulos A., Karihaloo B., *High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFERC) – Performance and application to retrofitting*, Engineering Fracture Mechanics 74/2007, 151-167.
[20] Sanjuan M., Moragues A., *Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes*: *optimization to control plastic shrinkage*, Composite Science and Technology 57/1997, 655-660.
[21] Pueartas F., Amant T., Fernandez-Jimenez A., Vazques T., *Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres*, Cement and Concrete Research 33/2003, 2031-2036.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[22] Chen B., Liu J., *Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber*, Cement and Concrete Research 34/2004, 1259-1263.

[23] Chen B., Liu J., *Contribution of hybrid fibres on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability*, Cement and Concrete Research 35/2005, 913-917.

[24] Kayali O., Haque M., Zhu B., *Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash*, Cement and Concrete Research 29/1999, 1835-1840.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ