



Samozagęszczalny beton wysokowytrzymały o zredukowanym skurczu

Artur Jakóbczak¹, Sergii Koval²

STRESZCZENIE:

Empirycznie udowodniono możliwość wykonania samozagęszczalnych betonów wysokowytrzymałych o zredukowanym skurczu poprzez wprowadzenie do mieszanki betonowej nasyconych wodą porowatych dodatków, oddających zaabsorbowaną wodę do matrycy cementowej podczas dojrzewania betonu. Wykorzystanie nasyconych dodatków pozwoliło zmniejszyć skurcz matrycy cementowej, poprawić parametry wytrzymałościowe w warunkach normalnych i podwyższonej temperaturze. W badaniach wykorzystano komputerowy model rozprzestrzeniania wilgoci w betonie, na podstawie którego zoptymalizowano zastosowaną frakcję piasku keramzytowego.

SŁOWA KLUCZOWE:

skurcz betonu; beton samozagęszczalny; beton wysokowytrzymały

1. Wprowadzenie

Według danych [1, 2], samozagęszczalny beton wysokowytrzymały (high strength self-compacting concrete, HSSCC) to beton z mieszanek modyfikowanych chemicznie, posiadających wymagane charakterystyki reologiczne o klasie wytrzymałości betonu nie mniejszej niż C50/60 i wytrzymałości średniej na ściskanie $f_{cm} > 60$ MPa.

Zachodzące, podczas dojrzewania betonu, procesy fizykochemiczne, takie jak twardnienie, odparowywanie wody oraz wiązanie, prowadzą do odkształceń własnych betonu zwanych skurczem [3]. Wielkość odkształceń jest rezultatem skurczu autogenicznego oraz skurczu od wysychania.

Skurcz autogeniczny pojawia się praktycznie w momencie wymieszania cementu z wodą. Związany jest on z reakcjami wiązania zaczynu cementowego oraz odparowywaniem wody z powierzchni betonu w jego stanie plastycznym. Skurcz od wysychania nazywany jest również skurczem wilgotnościowym lub fizycznym i jest związany z migracją wody na zewnątrz podczas dojrzewania betonu.

Większość tradycyjnych sposobów redukcji skurczu bazuje na metodach pielęgnacji zewnętrznej (pokrycie matami, błonami, mgiełką wodną itp.). Jednakże zastosowanie wyżej wymienionych zabiegów niejednokrotnie nie jest wystarczające do kontrolowania procesu, jakim jest skurcz. Szczególne znaczenie ma to w przypadku betonów HPC (high-performance concrete) lub RPC (reactive powder concrete) charakteryzujących się niskim wskaźnikiem wodno-cementowym [4–6].

Koncepcja wewnętrznej pielęgnacji betonu ma swój początek w latach 50. (P. Philleo), a rozwinęła się (P. Dale, W. Bentz) [4–6] w ostatnich latach w związku intensywnym rozwojem

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. M. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn, e-mail: artur.qbek@gmail.com, orcid id: 0000-0001-6897-5216

² Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. M. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

betonów HPC. Przez termin ten rozumie się wprowadzenie do matrycy cementowej specjalnych dodatków [4]:

- nasyconych wodą porowatych kruszyw (saturated lightweight aggregates, SLWA),
- superabsorbentów (super absorbent polymers, SAP), oddających zaabsorbowaną wodę do matrycy cementowej.

Stosowane są również domieszki chemiczne, obniżające naprężenia powierzchniowe w porach betonu i w ten sposób redukujących skurcz (shrinkage reducing admixtures, SRA).

2. Materiały i metody

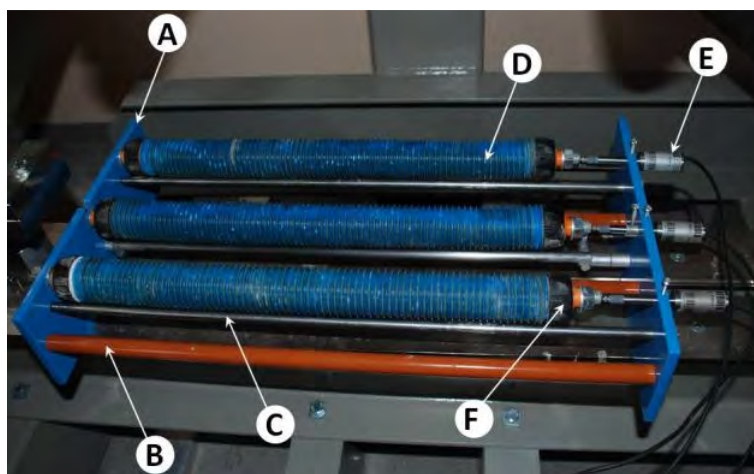
Pielęgnacja wewnętrzna z zastosowaniem SLWA, jako rezerwuaru wodny matrycy cementowej, wymagana jest, aby dany materiał posiadał pory większe niż pory w zaczynie [5, 6]. W realizowanych badaniach jako dodatki SLWA (ziarna do 5 mm) przyjęto materiały porowate: keramzyt, pumeks i perlit. W zależności od gęstości i charakteru porowatej struktury poszczególne materiały charakteryzują się absorpcją od 29 do 120% wody w stosunku do ich masy.

Intensywność procesu hydratacji oceniano na podstawie zmiany temperatury próbek w warunkach adiabatycznych, rejestrowanej przez aparat ConReg.

W celu oceny właściwości reologicznych zaczynów cementowych wykorzystano lepkościomierz Premium R Fungilab, którego działanie opiera się na analizie momentu obrotowego wrzeciona.

Badania wytrzymałościowe zaczynów przeprowadzono na beleczkach 40x40x160 mm dojrzewających w warunkach normalnych (temperatura pokojowa) i w podwyższonej temperaturze (+35°C). Do pomiaru skurczu w warunkach powietrzno suchych posłużył aparat Graf-Kaufmana, a w przypadku betonu – aparat Amslera.

Skurcz autogeniczny mierzono za pomocą dylatometru, o konstrukcji opartej na rozwiązaniu Jansen i Hansen [7], wyposażonego w tensometry 82-R0331/Z Controls o dokładności 0,15 μm (rys. 1).



Rys. 1. Aparat do pomiaru skurczu autogenicznego: A – płyta stalowa; B – pręty łączące stalowe płyty; C – prowadznica; D – karbonowa rura PCV; E – czujniki przemieszczeń; F – nasadka

W badaniach wykorzystano cement CEM I 52,5R, superplastyfikator ViscoCrete 3088 w postaci domieszki znacznie redukującej ilość wody zarobowej (high range water reducing admixture, HRWRA), a także karboksymetylocelulozę, jako domieszkę poprawiającą lepkość – zwiększającą odporność mieszanki na segregację (viscosity modifying admixture, VMA). Zastosowano również popiół lotny jako mikrowypełniacz (powdered mineral admixtures, PMA) w celu kontroli lepkości i zwiększenia gęstości betonu.

Ocenę jakości samozagęszczalnej mieszanki betonowej przeprowadzono w oparciu o specjalistyczne testy, zalecane przez Europejską Federację Producentów i Użytkowników Specjalistycznych Produktów Budowlanych (EFNARC) [8]. W trakcie badania mieszanki betonowej mierzono czas i średnicę (50 cm) rozplýwu stożka, czas wypływu z aparatu v-funnel oraz czas rozplýwu w aparacie L-box.

2. Dyskusja wyników

Dostarczenie dodatkowej ilości wody do matrycy cementowej w większości przypadków prowadzi do zmniejszenia temperatury reakcji hydratacji, przy czym stopień tego zmniejszenia zależy od struktury materiału porowatego [9].

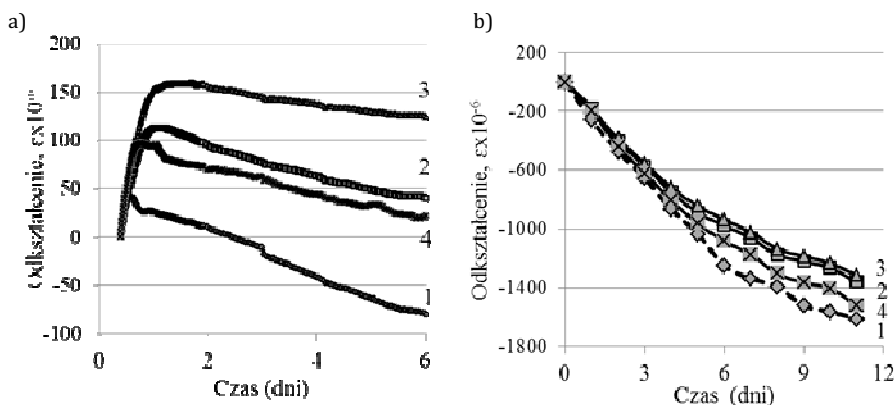
Skurcz zaczynów w warunkach izolowanych. W badaniach związanych z pomiarem skurczu autogenicznego 30% objętości zaczynu cementowego zajmowały dodatki porowate, przy czym objętość tę w próbce kontrolnej stanowił piasek kwarcowy. Wielkość odkształcenia ε została obliczona ze wzoru (1):

$$\varepsilon = (l_t - l_{t=0})/l_{t=0} \quad (1)$$

gdzie: l_t – długość próbki po czasie t pomiaru; $l_{t=0}$ – początkowa długość próbki do badania.

W przypadku próbek izolowanych, po wstępnym okresie przyrostu odkształcenia $+\varepsilon_a$, który trwał od 10 do 24 h (w zależności od składu próbek), zaobserwowano skurcz (rys. 2a). Największą deformację ujemną odnotowano w próbce kontrolnej (krzywa 1, rys. 2a), natomiast mieszanka zawierająca w swoim składzie perlit uległa najmniejszemu odkształceniu (krzywa 3, rys. 2a).

Ogólnie, wszystkie próby zawierające dodatek SLWA wykazały mniejszą podatność na odkształcenia w porównaniu z próbą kontrolną, potwierdzając tym samym możliwość redukcji skurczu autogenicznego.



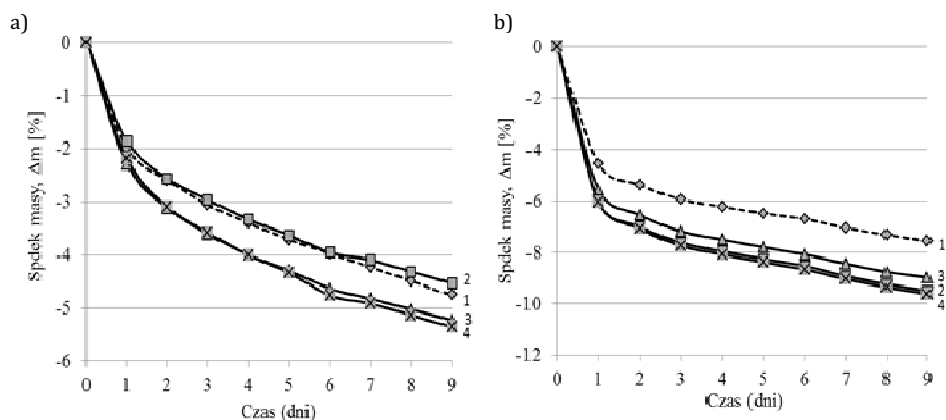
Rys. 2. Skurcz zaczynu cementowego w warunkach izolowanych (a) oraz nieizolowanych (b) z SLWA: 1 – bez dodatku; 2 – keraszyt; 3 – pumeks; 4 – perlit

Skurcz zaczynów w warunkach nieizolowanych. Wprowadzenie dodatków SLWA pozwoliło na zmniejszenie odkształceń zaczynu cementowego w porównaniu z próbką wzorcową bez dodatków porowatych (rys. 2b).

Strata wody. Za stratę wody w próbkach przyjęto zmianę masy beleczek dojrzewających w warunkach powietrzno suchych. Zmianę masy obliczono (wzór (2)) na podstawie analizy porównawczej masy próbki początkowej m_0 do masy próbki po czasie m_t :

$$\Delta m = (m_t - m_0)/m_0 \quad (2)$$

Analiza potwierdziła, że próby z SLWA wykazują większy spadek masy w porównaniu do próby kontrolnej (rys. 3). Jednakże dodatkowa ilość wody w wewnętrznych „zbiornikach wodnych” umożliwia zmniejszenie potencjalnego ryzyka powstawania nadmiernych odkształceń.



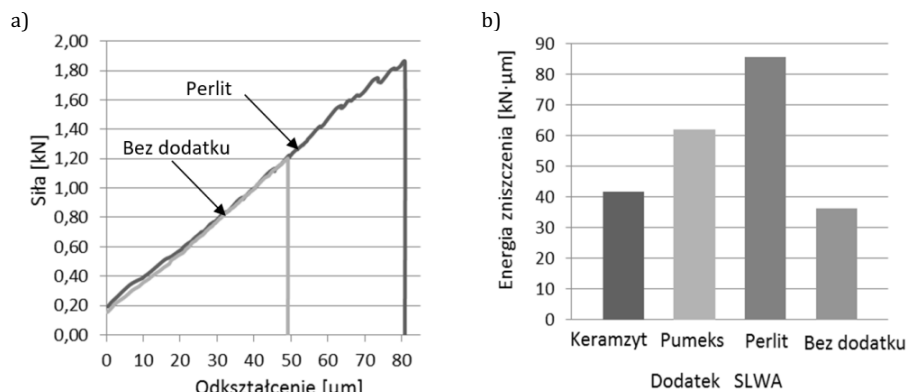
Rys. 3. Spadek w warunkach temperatury pokojowej (a) i podwyższonej (b) masy próbek zaczynu z SLWA: 1 – bez dodatku; 2 – keramzyt; 3 – pumeks; 4 – perlit

Wytrzymałość. Próby zawierające w swoim składzie SLWA wykazały nieznacznie mniejszą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do próby kontrolnej. Biorąc pod uwagę różne warunki temperaturowe, można przyjąć następujący szereg wielkości wpływu SLWA: pumeks > keramzyt > perlit.

Praktycznie wszystkie dodatki wpłynęły pozytywnie na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu badanych próbek, niezależnie od temperatury otoczenia dojrzewających próbek. W przypadku próby zawierającej perlit charakterystyka ta zwiększyła się ponad 1,5-krotnie w porównaniu do próby kontrolnej.

Podczas badania wytrzymałości na zginanie przeprowadzono również pomiar energii zniszczenia. Doświadczenie to bazuje na precyzyjnym pomiarze ugięcia próbek pod wpływem działania siły zginającej. Energię zniszczenia definiuje się jako wielkość pola pod krzywą „siła – odkształcenie” (rys. 4a).

Wskutek wprowadzenia SLWA energia zniszczenia wzrosła w porównaniu do próby kontrolnej (rys. 4b). Największą energią zniszczenia charakteryzowały się próbki zawierające w swoim składzie perlit.



Rys. 4. Przyrost odkształcenia w przypadku SLWA (a) i analiza porównawcza wpływu dodatków na energię zniszczenia (b)

Reologia. Wprowadzenie SLWA zmniejszyło (2–5-krotnie) lepkość plastyczną zaczynów cementowych posiadających jednakowy wskaźnik wodno–cementowy. W początkowej fazie badania zaobserwowano wyraźną różnicę lepkości w zależności od rodzaju dodatku SLWA. W miarę zwiększenia prędkości obrotowej wrzeczona lepkość zaczynów kształtowała się na podobnym poziomie niezależnie od typu domieszki.

Materiały absorbujące pozwoliły zmniejszyć deformacje skurczowe oraz zwiększyć odporność na niszczące działanie sił zginających przy jednoczesnym zwiększeniu energii potrzebnej do zniszczenia. Wszystkie uzyskane wyniki świadczą o tym, że materiały SLWA nadają się do wykonania betonów typu HSSCC. Z tego względu podjęto również zadanie opracowania mieszanki betonowej (HSSCC) z dodatkiem SLWA.

W pierwszym etapie zaprojektowano skład betonu samozagęszczalnego bez SLWA (skład Nr 1, tab. 1). Skład ten odpowiada wymogom mieszanki SCC, biorąc pod uwagę: rozptyw stożka (klasa SF 2), czas rozptywu (klasa VS2) i wypływu (klasa VF2), wskaźnik segregacji (klasa SR2) i samopoziomowania (klasa PA2). Osiągnięto wytrzymałość na poziomie 60,1 MPa.

W celu zwiększenia wytrzymałości gwarantowanej betonu zastosowano cement w ilości 450 kg/m³ (skład Nr 2, tab. 1). Zmiana ta doprowadziła do wzrostu wytrzymałości betonu, wywołała jednak wzrost skurczu w warunkach suchych (tab. 2).

Tabela 1

Skład mieszanki betonowej o klasie SF2/VF2/SR2/PA2

Nr	Zawartość materiałów podstawowych [kg/m ³]				Zawartość dodatków [kg/m ³]			
	Cement	Piasek	Żwir	Woda	PMA	SP	LWA	VMA
1	400	745	853	156	188,8	6,0	–	–
2	450	758	859	158	162	7,7	–	–
3	450	608	888	158	160	7,7	61,7	0,2

Tabela 2

Skład mieszanki betonowej o klasie SF2/VF2/SR2/PA2

Nr	Mieszanka betonowa					Beton stwardniały		
	D [cm]	T50 [s]	Tv [s]	H2/H1	SR [%]	f _{cm} [MPa]	ε [mm/m]	E _b [MPa]
1	400	745	487	353	156	60,1	0,20	30 000
2	450	758	496	359	158	70,7	0,25	35 000
3	450	608	398	288	158	70,2	0,15	34 000

W celu zmniejszenia podatności betonu na skurcz do mieszanki wprowadzono nasycony wodą LWA – keramzyt. Zawartość dodatków porowatych (M_k) w stanie suchym (kg/m³), które zastąpiły zwykły wypełniacz (NWA – normal weight aggregate), obliczona została na podstawie wzoru (3) zaproponowanego przez P. Dale, W. Bentz [5, 6]:

$$M_k = \frac{C_f \cdot CS \cdot a_{max}}{S \cdot \emptyset_K} \quad (3)$$

gdzie: C_f – zawartość cementu w mieszance (kg/m³); CS – skurcz chemiczny cementu (g wody/g cementu); w przypadku betonów projektowanych na zwykłym cemencie portlandzkim wartość współczynnika wynosi 0,06–0,08; a_{max} – maksymalny oczekiwany stopień hydratacji cementu (jeżeli w/c < 0,36 => a_{max} = (w/c)/0,36; w pozostałych przypadkach a_{max} = 1); S – stopień nasycenia porowatego dodatku od 0 do 1; ∅_K – absorpcja LWA (kg wody/kg suchego LWA).

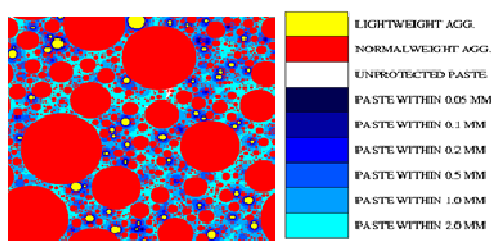
Na podstawie równania (3) w celu pełnego nasycenia wodą hydratującego zaczynu cementowego wprowadzono wypełniacz SLWA w ilości 20%, który zastąpił kruszywo (skład Nr 3, tab. 1).

W trybie online (<http://ciks.cbt.nist.gov>), za pomocą komputerowego programu Amerykańskiego Instytutu Standardów i Technologii (NIST), zaprojektowano wielkość ziarna LWA [6], co pozwoliło w sposób optymalny nasycić zaczyn cementowy wodą (rys. 5, tab. 3).

Tabela 3

Optymalizacja ziaren LWA [6]

Odległość od powierzchni LWA [mm]	Chronione frakcje pasty
0,050	0,020
0,100	0,045
0,200	0,103
0,500	0,335
1,000	0,765
2,000	0,998



Rys. 5. 2D–model transportu wilgoci w matrycę cementową i obliczanie grubości nawilżonego zaczynu w funkcji odległości od powierzchni SLWA

W celu zwiększenia odporności mieszanki na segregację wprowadzono domieszkę VMA (karboksymetylocelulozę). Domieszka tego typu przyczynia się do redukcji naprężeń powierzchniowych w porach betonu.

Wprowadzenie kombinacji domieszek i dodatków pozwoliło na otrzymanie betonu samozagęszczalnego wysokowytrzymałego ($f_{cm} = 70,2$ MPa) przy odkształceniach skurczowych mniejszych niż w betonie bez SLWA.

3. Wnioski

Doświadczalnie udowodniono możliwość uzyskania z mieszanek samozagęszczalnych (o klasie SF2/VS2/SR2/PA2) wysokowytrzymałego betonu o zredukowanym skurczu dzięki wprowadzeniu w jego skład nasyconych wodą porowatych dodatków. Wykorzystanie nasyconych wodą dodatków SLWA pozwoliło, w porównaniu z próbą kontrolną, obniżyć skurcz autogeniczny i całkowity, zwiększyć wytrzymałość na zginanie oraz energię zniszczenia.

Literatura

- [1] Sari M., Prat E., Labastire J.-F., High strength self compacting concrete: original solutions associating organic and inorganic admixtures, *Cement and Concrete Research* 1999, 29, 6, 813–818.
- [2] Szwabowski J., Gołaszewski J., *Technologia betonu samozagęszczalnego*, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2010, 160.
- [3] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2010, 728.
- [4] *Internal Curing of Concrete*, RILEM Report 41, Eds. K. Kovler, O.M. Jensen, RILEM Publications S.A.R.L., 2007.
- [5] Bentz D.P., Weiss W.J., *Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review*, National Institute of Standards and Technology; February 2011.

- [6] Bentz D.P., Lura P., Roberts, J.A., Methodology for mixture proportioning for internal curing, *Concrete International* 2005, 27, 2, 35–40.
- [7] Jensen M., Hansen P.F., A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste, *Materials and Structures* 1995, 28.
- [8] The European Guidelines for Self Compacting Concrete, EFNARC, Specification, Production and Use, 2005.
- [9] Jakóbczak A., Koval S., Abid N., Modyfikowanie kompozytów cementowych przez dodatki – kompensatory skurczu. Materiały, instalacje i technologie energooszczędne w budownictwie, Międz. konf., Biała Podlaska 2012, 184–189.

Self-compacting high-strength concrete with reduced shrinkage

ABSTRACT:

The possibility of self-compacting high-strength concretes with reduced shrinkage has been empirically proven by introducing porous additives saturated with water into the concrete mix, returning the absorbed water to the cement matrix during the maturation of the concrete. The use of saturated additives allowed to reduce the shrinkage of the cement matrix, improve the strength parameters under normal conditions and increased temperature. In the research, a computer model of spreading moisture in concrete was used, on the basis of which the applied expanded clay fraction was optimized.

KEYWORDS:

contraction of concrete; self-compacting concrete; high-strength concrete