

mgr inż. Maciej Kalinowski^{1)*}

ORCID: 0000-0002-6729-1506

prof. nzw. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski¹⁾

ORCID: 0000-0002-8127-7559

Wpływ kinetyki desorpcji wody z polimerów superabsorbujących na kształtowanie wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych

The influence of the water desorption kinetics from superabsorbent polymers on the compressive strength of cement composites

DOI: 10.15199/33.2019.07.07

Streszczenie. Jedną z niedawno wprowadzonych grup dodatków do betonu są **polimery superabsorbcyjne (SAP)**. Ich zastosowanie, jako środka wewnętrznej pielęgnacji wodnej betonu, pozwala na znaczną redukcję zmian liniowych spowodowanych zjawiskami skurczowymi, poprawiając w ten sposób trwałość materiału. Wpływ SAP na parametry mechaniczne, takie jak wytrzymałość na ściskanie, nie jest już tak jasno określony. W związku z tym przebadano dziesięć składów mieszanki betonowych modyfikowanych dwoma rodzajami SAP. Przebadane mieszanki różniły się również metodą dozowania SAP, tj. kinetyką desorpcji wody z zastosowanego dodatku. Celem badań było określenie wpływu zmiennych, jakimi były różnice w metodzie dozowania SAP, absorpcyjności zastosowanych polimerów oraz mechanizmie absorpcji i desorpcji wody zarobowej przez SAP na wytrzymałość na ściskanie kompozytów betonowych oraz konsystencję i gęstość objętościową mieszanki betonowej. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, iż kinetyka desorpcji wody z SAP w mieszance betonowej oraz różnice we właściwościach zastosowanych polimerów superabsorbcyjnych mają duży wpływ na przebieg zmian badanych właściwości betonu.

Słowa kluczowe: kompozyty betonowe; polimery superabsorbcyjne; absorpcja; desorpcja; wytrzymałość na ściskanie.

Abstract. One of the recently introduced groups of additions to the concrete technology is group of **superabsorbent polymers (SAP)**. Their use, as a means of internal water curing agent, allows for a significant reduction of linear changes caused by shrinkage deformations, thus improving composites durability. The influence of SAP on the mechanical parameters, such as compressive strength, is not as clearly defined. As part of a research program, ten compositions of concrete mixtures modified with two types of superabsorbent polymers were tested. The tested mixtures also differed in the SAP dosing methodology, i.e. the desorption kinetics of the additive used. The aim of the study was to determine the effects of variables, such as differences in the SAP dosing method, SAP's absorption potential and its absorption and desorption mechanics on the formation of selected properties of concrete – compressive strength and consistency of the concrete mix. Based on the obtained results, it was found that the SAP desorption kinetics in the concrete mix and the differences in properties of the tested superabsorbent polymers have a significant influence on the course of changes on the tested concrete properties.

Keywords: concrete composites; superabsorbent polymers; absorption; desorption; compressive strength.

Polimery superabsorbcyjne (SAP) ze względu na swoje specyficzne właściwości, tj. zdolność do zaabsorbowania do 1500 razy więcej wody niż wynosi ich własna masa, znalazły zastosowanie przede wszystkim w produktach higienicznych [3]. Metody otrzymania tego typu polimerów zostały opracowane w latach 80. XX w. Z chemicznego punktu widzenia, do grupy polimerów superabsorbcyjnych zaliczane są usieciowane poliestry akrylowe z kwasem akrylowym charakteryzujące się pęcznieniem przy kontakcie z wodą. Zdolność SAP do absorpcji znacznej ilości wody wynika z dużego ciśnienia osmotycznego spowodowanego nagromadzeniem jonów (m.in. sodowych lub potasowych) w strukturze polimeru. Zaabsorbowana woda powoduje pęcznienie polimeru, tym samym oddalając jony od siebie, co powoduje zmniejszenie ciśnienia osmotycznego [8]. Przy założeniu takiego modelu działania polimerów superabsorbcyjnych, ich zdolność do absorpcji jest ograniczana nie tylko przez obniżanie ci-

śnienia osmotycznego w wyniku absorpcji wody, lecz również przez wpływ ciśnienia zewnętrznego, powstałego w wyniku zmiany objętości polimeru. Ta właściwość polimerów superabsorbcyjnych przesądziła o ich zastosowaniu w technologii betonu, gdyż w przypadku utraty stanu równowagi ciśnienia osmotycznego polimeru nasyconego wodą oraz naprężeń wewnętrznych betonu, SAP jest zdolny do oddawania wody. W przypadku technologii betonu jest to równoznaczne ze zdolnością polimerów SAP do wewnętrznej pielęgnacji betonu.

Cel badań

Ze względu na mechanizm działania SAP, polegający na absorpcji wody zarobowej z mieszanki betonowej przez uprzednio nieaktywowany polimer superabsorbcyjny, można się spodziewać zmian w rozkładzie fazy porowej w stwardniałym betonie [4, 11, 12] oraz zmian w przebiegu hydratacji w czasie dojrzewania betonu [2, 5]. Publikowane badania dotyczące różnych typów polimerów superabsorbcyjnych koncentrują się przede wszystkim na ocenie ich wpływu na właściwości mechaniczne i trwałość betonu oraz właściwo-

¹⁾ Politechnika Warszawska; Wydział Inżynierii Lądowej

^{*}) Adres do korespondencji: m.kalinowski@il.pw.edu.pl

ści mieszanek betonowych [7, 13, 14]. Natomiast mało badań poświęconych jest technologii wykonywania mieszanek z dodatkiem SAP, w tym problemowi wstępnej aktywacji SAP w środowisku wody wodociągowej przed dodaniem go do mieszanki. W literaturze na ogół publikowane są badania zakładające dodawanie nieaktywowanego polimeru superabsorbencyjnego do suchych składników mieszanki betonowej (spoiwa oraz kruszywa) [6]. Do tak przygotowanych materiałów następnie dodaje się wodę zarobową oraz niekiedy superplastyfikator. W przypadku takiej metody wykonywania mieszanki betonowej, gdzie aktywacja polimeru następuje na etapie mieszania wszystkich składników mieszanki, zdolność do absorpcji wody przez SAP ustala się jako absorpcyjność w środowisku silnie zasadowym, wynosząca 8 – 30 g/g [6]. Jest to ok. 10-krotnie mniej niż w środowisku wody wodociągowej.

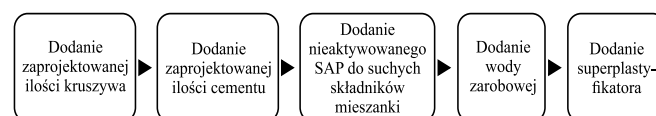
Skutkiem zaniżenia absorpcyjności w przypadku dozowania nieaktywowanego SAP do mieszanki jest zawyżanie masy zawartości SAP w stosunku do masy cementu, w celu absorpcji zaprojektowanej ilości wody zarobowej. Mimo że w niektórych przeprowadzonych badaniach zawartość SAP w mieszance betonowej wynosiła aż 1% masy cementu, procent zaabsorbowanej wody zarobowej był o rząd wielkości mniejszy niż w przypadku dodania do składników mieszanki betonowej polimeru SAP uprzednio aktywowanego w środowisku wody wodociągowej [15]. Zmiana warunków (aktywacja SAP w środowisku zaczynu cementowego lub w środowisku wody wodociągowej) wpływa na kinetykę desorpcji wody z SAP, rozumianą jako zmianę szybkości przechodzenia wody z cząstek SAP do matrycy cementowej.

W przypadku, gdy SAP dodawany jest do mieszanki betonowej jako nieaktywowany, desorpcja wody z zastosowanego dodatku zachodzi w wyniku naprężeń wewnętrznych w betonie, zapewniając z czasem coraz mniejszą intensywność pielęgnacji, ze względu na przyrost ciśnienia osmotycznego w SAP wraz z oddawaniem wody. Po dodaniu SAP wstępnie aktywowanego w środowisku wody wodociągowej, kinetyka desorpcji wody z dodatku ulega zmianie. Ze względu na osiągnięcie przez SAP ok. 10-krotnie wyższej absorpcyjności oraz dodaniu go do mieszanki betonowej w takim stanie, oprócz naprężeń wewnętrznych w betonie, wpływ na kinetykę desorpcji wody z SAP będzie miała również zmiana środowiska desorpcji z wody wodociągowej na zaczyn cementowy. Wówczas desorpcja wody z SAP zachodzi nie tylko pod wpływem zmian fizycznych w betonie, lecz dodatkowo ze względu na różnicę pomiędzy aktywnością chemiczną środowiska absorpcji i desorpcji wody. W efekcie w pierwszych godzinach od zaformowania następuje gwałtowna desorpcja, aż do momentu osiągnięcia stanu równowagi pomiędzy właściwościami środowiska zaczynu cementowego a ciśnieniem osmotycznym SAP. Następnie, desorpcja wody z dodatku przebiega wraz ze wzrostem naprężeń wewnętrznych w betonie.

Problem odpowiedniego sposobu przygotowania i wprowadzenia SAP do mieszanki betonowej jest, naszym zdaniem, kluczowy w kontekście uzyskania optymalnego efektu

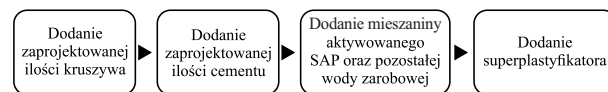
pielęgnacji wewnętrznej w odniesieniu do podstawowych cech betonu.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu różnych zmiennych na konsystencję mieszanki i wytrzymałość na ściskanie betonu, modyfikowanego dodatkiem SAP. Zastosowano dwa rodzaje SAP, różniące się uziarnieniem oraz absorpcyjnością wody. Po przeprowadzeniu badań wstępnych zastosowanych modyfikatorów, wykonano dziesięć serii próbek różniących się między sobą masową zawartością zastosowanych polimerów oraz metodą dozowania. Uwzględniono dwie metody dozowania: metodę R polegającą na dodawaniu nieaktywowanego SAP do suchych składników mieszanki betonowej (rysunek 1) oraz metodę O, w której mieszanina aktywowanego SAP oraz wody zarobowej dodawana jest do pozostałych składników mieszanki (rysunek 2). Główną różnicą pomiędzy omawianymi metodami jest odmienna kinetyka desorpcji wody przez SAP.



Rys. 1. Metoda R: kolejność dodawania poszczególnych składników do mieszanki betonowej w przypadku modyfikacji betonu nieaktywowanym SAP

Fig. 1. Method R: the order of adding components to the concrete mix when using the methodology of adding non-activated superabsorbent polymers (SAP)



Rys. 2. Metoda O: kolejność dodawania poszczególnych składników do mieszanki betonowej w przypadku modyfikacji betonu uprzednio aktywowanym SAP

Fig. 2. Method O: the order of adding components to the concrete mix when using the methodology of adding activated superabsorbent polymers (SAP)

Zakres badań

Opracowano dziesięć składów mieszanki betonowej, w których znajdował się niemodyfikowany SAP oraz dziewięć składów z modyfikowanym SAP, z czego sześć zostało zaprojektowanych jako modyfikowane polimerem SAP M, a trzy modyfikowane SAP D. Receptury różniły się również masową zawartością SAP. W ramach analiz wykonanych na podstawie wyników badań laboratoryjnych, za parametr porównawczy uznano procent wody zarobowej zaabsorbowanej przez SAP w każdej serii badanych próbek, które charakteryzowały się tym samym stosunkiem wodno-cementowym 0,3, stałym stosem okruczymym oraz ilością zastosowanego spoiwa (tabela 1). Dodatkowo, aby móc określić wpływ SAP oraz metod jego dozowania na konsystencję mieszanki betonowej, w każdej z badanych serii próbek zastosowano taką samą ilość superplastyfikatora (2,3% masy cementu). Serie próbek modyfikowane polimerami superabsorbencyjnymi różniły się jedynie ilością SAP oraz metodą dozowania do mieszanki betonowej. Zostało przygotowanych łącznie dziewięć receptur zawiera-

jących w składzie polimer SAP M lub SAP D (tabela 2).

Do wykonania badanych mieszanek betonowych zastosowano cement CEM I 42,5 R, zgodny z wymaganiami określonymi w normie PN-EN 197-1:2011 [9], kruszywo drobne (piasek wiślany) oraz kruszywo naturalne żwirowe o frak-

Tabela 1. Skład serii referencyjnej (SAP REF)

Table 1. Composition of the reference concrete mix (SAP REF)

Material	Masa na 1 m ³ [kg]
Piasek wiślany 0/2 mm	668
Żwir 2/4 mm	95
Żwir 4/8 mm	477
Żwir 8/16 mm	668
CEM I 42,5 R	450
Woda wodociągowa	135
Superplastyfikator	10,35

Tabela 2. Charakterystyka mieszanek betonowych modyfikowanych SAP. Całkowity stosunek wodno-cementowy (w/c)_{tot} = 0,3

Table 2. List of prepared superabsorbent polymer (SAP) – modified concrete mixes. Total water-cement ratio (w/c)_{tot} = 0,3

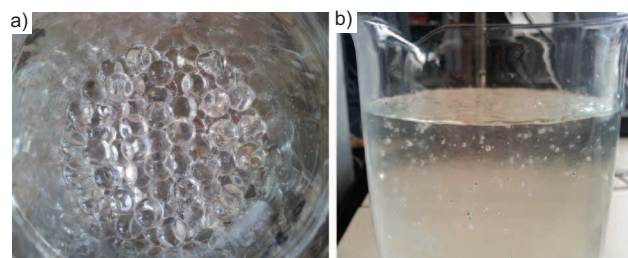
Nazwa serii	Rodzaj zastosowanego SAP	Metoda dozowania	Zawartość SAP w stosunku do masy cementu [%]	Procent wody zarobowej zaabsorbowanej przez SAP [%]
SAP MO 25	SAP M	metoda O	0,047	25
SAP MO 50	SAP M		0,094	50
SAP MO 75	SAP M		0,141	75
SAP MR 25	SAP M	metoda R	0,047	2,5
SAP MR 50	SAP M		0,094	5
SAP MR 75	SAP M		0,141	7,5
SAP DO 12,5	SAP D	metoda O	0,051	12,5
SAP DO 25	SAP D		0,102	25
SAP DO 50	SAP D		0,204	50

cyjach 2/4, 4/8 oraz 8/16, zgodne z wymaganiami normy PN-EN 12620 [10]. W celu zwiększenia płynności badanych mieszanek betonowych zastosowano superplastyfikator. Do zbadania wpływu SAP na wybrane właściwości kompozytu cementowego wykorzystano dwa polimery superabsorbcyjne o różnym uziarnieniu oraz właściwościach (tabela 3, fotografia). Zdolności do absorpcji zostały ustalone na podstawie badań wstępnych w warunkach odzwierciedlających

Tabela 3. Charakterystyka materiałowa polimerów wykorzystanych w badaniach na podstawie danych producenta

Table 3. Material characterization of the superabsorbent polymers (SAP) used in research program according to the manufacturers' data

Właściwość	Rodzaj polimerów		
	SAP M	SAP D	
Uziarnienie [%]	<150 μm	≤8	0
	150 – 850 μm	86-95	0
	>850 μm	≤6	0
	2,0 – 2,5 mm	0	100
Charakterystyka chemiczna	kopolimer akrylanu potasu i kwasu akrylowego	kopolimer kwasu 2-propionowego z 2-propionianem sodu (1:1)	
Absorpcyjność w środowisku wody wodociągowej [g/g]	160,0	73,8	
Absorpcyjność w środowisku zaczynu cementowego [g/g]	16,0	—	
Kształt ziaren polimeru	nieregularny	sferyczny	



Różnice w mechanizmie absorpcji wody przez: a) SAP D; b) SAP M

Differences in the water absorption mechanisms of two applied superabsorbent polymers (SAP): (a) SAP D; (b) SAP M

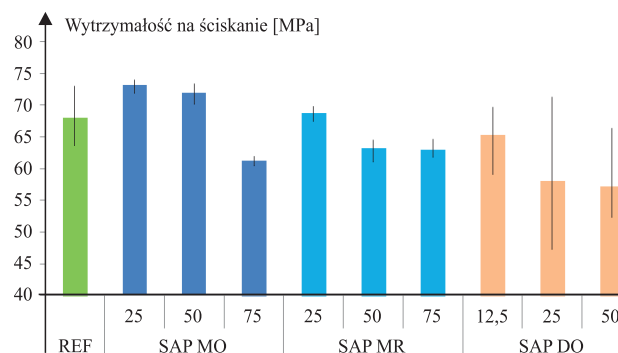
warunki dozowania dodatku do mieszanki betonowej w przypadku metod dozowania nazwanych „R” i „O”.

W przypadku metody R, absorpcja wody zarobowej przez polimer superabsorbcyjny zachodzi wraz z dodaniem wody do pozostałych składników mieszanki, czyli aktywacja SAP odbywa się w środowisku zaczynu cementowego, silnie aktywnego elektrochemicznie. Ze względu na odwracalny charakter absorpcji wody przez polimery superabsorbcyjne, ich zdolność do absorpcji wody jest silnie uwarunkowana przez środowisko, w jakim to zjawisko następuje. W środowisku zaczynu cementowego zdolność SAP do absorpcji wody zarobowej ograniczona jest do 10 – 15% absorpcyjności osiągananej w środowisku wody wodociągowej [6]. Prowadzi to finalnie do znacznie mniejszej intensywności pielęgnacji, ze względu na relatywnie małą ilość wody ulegającą desorpcji z aktywowanych cząstek SAP w trakcie procesu hydratacji.

Metoda O charakteryzuje się pominięciem etapu absorpcji wody zarobowej z mieszanki betonowej, a skupia się na maksymalizacji desorpcji wcześniej zaabsorbowanej wody wodociągowej. Dzięki uprzedniemu aktywowaniu SAP w środowisku wody wodociągowej można osiągnąć znacznie większą początkową absorpcyjność SAP, a tym samym znacznie zwiększyć potencjał desorpcyjny w środowisku silnie aktywnym elektrochemicznie.

Wyniki badań

Wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 3 oraz w tabeli 4, a wyniki badania konsystencji w tabeli 5. Na podstawie wyników



Rys. 3. Średnia wytrzymałość na ściskanie serii próbek

Fig. 3. The average compressive strength of the tested compositions of cement composites

Tabela 4. Średnia wytrzymałość na ściskanie badanych serii próbek, ich wariancja oraz porównanie zmian wytrzymałości w stosunku do serii referencyjnej

Table 4. Average compressive strength of the tested compositions of concrete composites, its variance and the difference between superabsorbent polymers (SAP) modified concrete series and reference series

Nazwa serii	Wytrzymałość na ściskanie		Zmiana wartości średniej wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z serią referencyjną [%]
	wartość średnia [MPa]	wariancja [%]	
SAP REF	68,0	5,6	0,00
SAP MO 25	73,1	1,2	7,51
SAP MO 50	71,9	1,8	5,73
SAP MO 75	61,2	1,25	-10,05
SAP MR 25	68,7	1,4	1,05
SAP MR 50	63,2	2,4	-7,08
SAP MR 75	63,0	1,9	-7,43
SAP DO 12,5	65,3	6,9	-4,06
SAP DO 25	58,1	17,1	-14,65
SAP DO 50	57,2	11,2	-15,89

Tabela 5. Wyniki badania konsystencji mieszanek betonowych wg metody opadu stożka

Table 5. The results of a slump test for concrete mixes

Nazwa serii	Badanie metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2 [cm]	Klasa konsystencji wg PN-EN 206
SAP REF	6,0	S2
SAP MO 25	6,0	S2
SAP MO 50	3,5	S1
SAP MO 75	3,0	S1
SAP MR 25	6,0	S2
SAP MR 50	4,5	S1
SAP MR 75	2,0	S1
SAP DO 12,5	3,0	S1
SAP DO 25	1,5	S1
SAP DO 50	0	S1

badan stwierdzono, że **wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału wody zaabsorbowanej przez SAP w całkowitej ilości wody** [1, 16]. Za przyczynę takiego zachowania kompozytu modyfikowanego polimerem superabsorbcyjnym uznaje się nierównomierne rozproszczenie SAP w mieszance betonowej, towarzyszące powszechnie stosowanej metodzie dozowania nieaktywowanego SAP bezpośrednio do suchych składników mieszanki betonowej [6]. Ze względu na właściwości elektrochemiczne, polimery superabsorbcyjne przyczyniają się do powstania sieci quasi-porów po spełnieniu swojej roli jako czynnika wewnętrznej pielęgnacji. Pory te, określane mianem defektów [2], przyczyniają się do zaburzenia struktury matrycy cementowej, prowadząc do obniżenia wytrzymałości kompozytu betonowego.

Na interpretację wyników badań nad wpływem SAP na wytrzymałość na ściskanie rzutuje niejednoznaczne określenie w/c. Przeważnie, w odniesieniu do mieszanek z dodatkiem

SAP, wyróżnia się trzy warianty tego współczynnika: w/c_{tot} – całkowity stosunek wodno-spoiwowy; w/c – stosunek wody zaabsorbowanej przez SAP do masy spoiwa oraz w_{eff}/c – efektywny stosunek wodno-spoiwowy, gdzie: w_{eff} – całkowita masa wody w mieszance betonowej, pomniejszona o masę wody zaabsorbowanej przez SAP. Jedynym prawidłowym sposobem porównywania wpływu SAP na wytrzymałość jest **utrzymanie stałej wartości w/c_{tot} w składach serii referencyjnej i modyfikowanych**. W innych przypadkach ocenę wpływu polimeru superabsorbcyjnego na właściwości kompozytu betonowego przeprowadzałyby się przez modyfikację nie jednego, a dwóch parametrów jednocześnie: masowej zawartości SAP w badanym składzie oraz dodatkowej wody potrzebnej do pełnej aktywacji modyfikatora [17]. Taka metoda utrudnia wyciągnięcie poprawnych wniosków dotyczących rzeczywistego wpływu SAP na właściwości kompozytów betonowych. Można argumentować, iż wraz z wprowadzeniem dodatkowej wody do mieszanki betonowej, bez zastosowania SAP, uzyskuje się zwiększenie współczynnika wodno-spoiwowego, a tym samym pogorszenie właściwości mechanicznych oraz zwiększenie porowatości betonu, prowadzące do zmniejszenia odkształceń skurczowych. Samo wprowadzenie dodatkowej wody do mieszanki betonowej będzie więc miało wpływ na te same parametry, na które badany jest wpływ polimerów superabsorbcyjnych. Przyjęcie takiej metody uniemożliwia poprawne określenie wpływu SAP na badane parametry.

Przez dozowanie wstępnie aktywowanego SAP M do mieszanki betonowej, w przypadku serii SAP MO 25, osiągnięto wzrost wytrzymałości na ściskanie o ok. 10% w porównaniu z serią referencyjną. Taki wpływ kinetyki desorpcji wody z SAP na właściwości kompozytów betonowych jest prawdopodobnie uwarunkowany kilkoma czynnikami. Pierwszym z nich jest równomierna dystrybucja cząstek SAP w mieszance betonowej, spowodowana przygotowaniem mieszaniny wody zarobowej oraz SAP przed dodaniem do pozostałych składników mieszanki. Dodatkowo, wraz z gwałtowną desorpcją wody z SAP w początkowym okresie po zaformowaniu, następuje zagęszczenie struktury matrycy cementowej (globalny stopień hydratacji kompozytu zwiększa się wraz z równomierną desorpcją wody z SAP w całej objętości betonu).

Kolejnym czynnikiem pozwalającym wytłumaczyć różnice w wynikach wytrzymałości na ściskanie w seriach próbek różniących się jedynie metodą dozowania dodatku SAP, jest mechanizm absorpcji przez zastosowany polimer w różnych środowiskach. W przypadku aktywacji SAP w środowisku wody wodociągowej, jednorodna mieszanina SAP oraz wody jest dodawana do pozostałych suchych składników mieszanki betonowej. W przypadku aktywacji SAP w środowisku mieszanki betonowej, polimer może nie być równomiernie rozproszony w objętości mieszanki, tworząc konglomeraty w wyniku wysokiej aktywności elektrochemicznej betonu. Te obszary, po desorpcji wody, przyczyniają się do wzrostu lokalnego stopnia hydratacji w bezpośredniej odległości od cząstek SAP oraz do formacji sieci quasi-porów. W przypadku dodawania nieaktywowanego SAP do mieszan-

ki betonowej, te czynniki są prawdopodobnie odpowiedzialne za spadek wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z serią referencyjną.

Wraz ze wzrostem ilości wody zarobowej zaabsorbowanej przez SAP MO (powyżej 60%) wytrzymałość na ściskanie kompozytu zaczyna spadać. Można więc wnioskować, iż wzrost wytrzymałości, w przypadku dodawania wstępnie aktywowanego SAP do mieszanki betonowej, można osiągnąć jedynie w określonym zakresie dozowania. Po przekroczeniu wartości granicznej następuje niemal liniowy spadek wytrzymałości. Dodatkowo, zmiana współczynnika woda-spoivo mogła wpłynąć na analizę wyników. W przypadku niewprowadzania do mieszanki dodatkowej objętości wody, wzrost wytrzymałości na ściskanie, w przypadku wybranych serii modyfikowanych SAP, może być spowodowany utrzymaniem porowatości kompozytu na zbliżonym poziomie jak w serii referencyjnej, przy jednoczesnym niewielkim wzroście stopnia hydratacji.

W przeprowadzonych badaniach **masowa zawartość SAP wynosiła 0,05 – 0,2% masy spoiwa**. W publikowanych [1] badaniach zawartość SAP jest przeważnie kilka razy większa. Dodatkowo, wariancja wyników badania wytrzymałości na ściskanie była najmniejsza w seriach modyfikowanych polimerem SAP M. Ten fakt sugeruje wzrost jednorodności kompozytu, tj. wzrost stopnia hydratacji bez zaburzenia sieci porowej. Przeciwny efekt można zaobserwować w przypadku serii modyfikowanych SAP D, gdzie wytrzymałość na ściskanie spada, a wariancja wyników wzrasta, wraz ze zwiększeniem zawartości SAP D w mieszance. W przypadku serii SAP MR, wyniki wpisują się w trend badań literaturowych, w których spadek wytrzymałości jest coraz większy wraz ze wzrostem ilości wody zarobowej zaabsorbowanej przez SAP.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań nad wpływem kinetyki desorpcji wody z SAP na wytrzymałość na ściskanie stwierdzono, że:

- wstępna aktywacja SAP o drobnym uziarnieniu w środowisku wody wodociągowej pozwoliła na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z taką samą masą nieaktywowanego SAP M dodanego do mieszanki;
- w przypadku serii próbek modyfikowanych wstępnie aktywowanym SAP M wzrost bądź brak spadku wytrzymałości na ściskanie zależy od ilości wody zaabsorbowanej przez SAP;
- wzrost masowej zawartości SAP w mieszance betonowej powoduje zmniejszenie płynności mieszanki, bez względu na rodzaj zastosowanego polimeru czy metodę dozowania;
- zastosowanie SAP D o uziarnieniu 2,0 – 2,5 mm, nawet w przypadku wstępnej aktywacji polimeru w wodzie, skutkowało spadkiem wytrzymałości na ściskanie oraz znacznym wzrostem zmienności wyników. Oznacza to zwiększenie niejednorodności materiału oraz wpływ uziarnienia zastosowanego SAP na zmianę właściwości mechanicznych kompozytów cementowych.

Modyfikacja betonów i zapraw polimerami superabsorbcyjnymi w celu wewnętrznej pielęgnacji jest zagadnieniem nowym i wciąż nie w pełni zbadanym. Zastosowanie polimerów

superabsorbcyjnych w technologii betonu pozwala na znaczną poprawę parametrów i trwałości kompozytów cementowych. Badania nad optymalną metodą dozowania SAP do mieszanek betonowych, przedstawione w artykule, stanowią przyczynek do opracowania zasad skutecznego korzystania z tej technologii w praktyce budowlanej.

Literatura

- [1] Farzarian Khashayar, K. Pimenta Teixeira, I. Perdiago Rocha, Leticia De Sa Carneiro, Ali Ghahremaninezhad. 2015. „The mechanical strength, degree of hydration and electrical resistivity of cement pastes modified with superabsorbent polymers”. *Constr. Build. Mater.* 109: 156 – 165.
- [2] Hasholt Marianne, Ole M. Jensen. 2015. „Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers”. *Cem. Concr. Compos.* 55: 290 – 297.
- [3] Jensen Ole M., Per F. Hansen. 2001. „Water entrained cement-based materials; I. Principles and theoretical background”. *Cem. Concr. Res.* 31: 647 – 654.
- [4] Justs Janis, Mateusz Wyrzykowski, Diana Bajare, Pietro Lura. 2015. „Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete”. *Cem. Concr. Res.* 76: 82 – 90.
- [5] Kang Sung-Hoon, Sung-Gul Hong, Juhuk Moon. 2017. „Absorption kinetics of superabsorbent polymers (SAP) in various cement-based solutions”. *Cem. Concr. Res.* 97: 73 – 83.
- [6] Mechtcherine Victor, Hans-Wolf Reinhardt. 2012. „Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction”. *State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*. Springer Science & Business Media: Berlin, Germany.
- [7] Mignon Arn, Geert-Jan Graulus, Didier Snoeck, J. Martins, Nele De Belie, Peter Dubrueel, Sandra Van Vlierberghe. 2014. „pH-sensitive superabsorbent polymers: A potential candidate material for self-healing concrete”. *J. Mater. Sci.* 50: 970 – 979.
- [8] Olawuyi Babatunde J., Willian P. Boshoff. 2017. „Influence of SAP content and curing age on air void distribution of high performance concrete using 3D volume analysis”. *Constr. Build. Mater.* 135: 580 – 589.
- [9] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku. Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2011.
- [10] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [11] Pourjavadi Ali, Seyed M. Fakoorpoor, Payam Hosseini, Alireza Khaloo. 2013. „Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles”. *Cem. Concr. Compos.* 37: 196 – 204.
- [12] Schroff Christof, Victor Mechtcherine, Michaela Gorges. 2012. „Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage”. *Cem. Concr. Res.* 42: 865 – 873.
- [13] Snoeck, Didier, Kim Van Tittelboom, Stijn Steuperaert, Peter Dubrueel, Nele De Belie. 2014. „Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers”. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 25: 13 – 24.
- [14] Snoeck Didier, Leticia F. Velasco, Arn Mignon, Sandra Van Vlierberghe, Peter Dubrueel, Peter Lodewyckx, Nele De Belie. 2015. „The effect of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by sorption experiments”. *Cem. Concr. Res.* 77: 26 – 35.
- [15] Snoeck Didier, David Schaubroeck, Peter Dubrueel, Nele De Belie. 2014. „Effect of high amounts of superabsorbent polymer and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with water-to-cement ratio of 0.50”. *Constr. Build. Mater.* 72: 148 – 157.
- [16] Song Chiwon, Young Cheol Choi, Seongcheol Choi. 2016. „Effect of internal curing by superabsorbent polymers – Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars”. *Constr. Build. Mater.* 123: 193 – 206.
- [17] Woyciechowski Piotr, Maciej Kalinowski. 2018. „The influence of Dosing Method and Material Characteristics of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Effectiveness of the Concrete Internal Curing”. *Materials* (11): 1600.

Przyjęto do druku: 16.04.2019 r.