

REOLOGIA BETONÓW NAPOWIETRZONYCH A CEMENTY Z DODATKAMI MINERALNYMI

Hubert SIKORA*, Wojciech PIASTA

Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Budynek A, 25-314 Kielce

Streszczenie: W pracy podjęto próbę wyjaśnienia wpływu napowietrzenia oraz cementów zawierających dodatki mineralne na odkształcenia reologiczne betonów. Betony wykonano z następujących cementów: cement portlandzki i dwa cementy portlandzkie z dodatkami zawierającymi żużel wielkopieczowy, krzemionkowy popioł lotny oraz mielony kamień wapienny. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że napowietrzenie betonów powoduje spadek skurczu i pęcznienia betonów zawierających cementy portlandzki i żużlowo-popiołowy, natomiast zwiększa skurcz betonów z cementów zawierających mączkę wapienną. Badania odkształceń prowadzono za pomocą aparatu Amslera, stosując po 6 próbek każdego betonu o wymiarach 10×10×50 cm.

Słowa kluczowe: odkształcenia reologiczne betonów, skurcz, pęcznienie.

1. Wprowadzenie

Celem niniejszej pracy jest próba określenia wpływu napowietrzenia i cementów zawierających dodatki mineralne na odkształcenia reologiczne betonów, to jest skurcz i pęcznienie.

Zjawisko skurczu jest skomplikowanym procesem, na który nakłada się w sposób sumaryczny szereg składników odkształcenia. Podczas postępującej hydratacji na skurcz zachodzą procesy zmian fizycznych i chemicznych poszczególnych faz cementu związane z generalną przyczyną skurczu, którą jest mniejsza objętość produktów hydratacji niż objętość substratów, to jest faz cementowych i wody. Skurcz kompozytów cementowych jest związany ze zmniejszaniem zawartości wody w mikrostrukturze zaczynu, co zachodzi z dwóch głównych przyczyn: samoosuszania podczas hydratacji cementu (skurcz samorzutny) oraz zewnętrznego wysychania kompozytu. Procesem odwrotnym do skurczu jest pęcznienie, zachodzące głównie w betonach w warunkach podwyższonej wilgotności (powyżej 95%) lub w wodzie. Mechanizm tego zjawiska najprawdopodobniej powstaje w wyniku absorbowania wody z otoczenia zewnętrznego przez żel cementowy. Według Neville'a (2012) molekuly wody działają wówczas przeciw siłom kohezji i usiłują rozsunąć cząstki żelu, co powoduje ciśnienie o charakterze rozpierającym.

Pęcznienie jest około sześć razy mniejsze niż skurcz w powietrzu o wilgotności względnej 70% lub osiem razy

mniejsze niż skurcz w powietrzu o wilgotności względnej 50% (Neville, 2012).

Zgodnie z jedną z hipotez (Bentur i in., 1980), w najdrobniejszych porach kapilarnych (2,5-30nm) podczas opuszczania ich przez wodę dochodzi do zmian ciśnienia kapilarnego, w wyniku czego pojawiają się naprężenia w twardniejącym zaczynie. Naprężenia te wywołują odkształcenia, które powodują zmniejszenie łącznej objętości zaczynu, odczytywane jako skurcz kapilarny, który częściowo jest odwracalny po ponownym nasyceniu przez wodę zaczynu. Osuszenie betonu jest tym szybsze im większa jest jego porowatość kapilarna oraz udział porów dużych, gdyż pory kapilarne są główną drogą przemieszczania się wody w stwardniałym zaczynie. Natomiast porowatość i rozkład wielkości porów w najbardziej istotny sposób zależy od współczynnika w/c. Trzeba jednak pamiętać o tym, że przy stałym stosunku w/c porowatość zaczynu i jej struktura są funkcją stopnia hydratacji, który w tych samych warunkach zależy od składu mineralnego konkretnego cementu i zastosowanych dodatków.

Thomas i Jennings (2006) interpretują mechanizm skurczu, ale tylko nieodwracalnego, opierając się na założeniu, że w zaczynie cementowym faza C-S-H występuje w postaci żelu, który jest agregacją wytrąconych cząstek wielkości koloidalnej. Podczas chemicznego procesu „starzenia” (dojrzwania) wielkości koloidalnej cząstki fazy C-S-H tworzą w czasie ze sobą wiązania, zwiększając stopień polimeryzacji łańcuchów

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: hubert.sikora@gmail.com

krzemianowych w żelu, dzięki czemu wzrasta wytrzymałość i sztywność zaczynu, a także jego gęstość. Sprzyja to zmniejszaniu objętości zaczynu, które szczególnie łatwo w sposób trwały występuje przy odbieraniu wody z żelu C-S-H (Thomas i Jennings, 2006). Utrata wody z porowatego żelu powoduje kondensację łańcuchów krzemianów w ich sieci z możliwością dalszego wiązania powodując, że powstające odkształcenie jest nieodwracalne.

Zastąpienie w cemencie portlandzkim części klinkieru żużlem wielkopieczowym i/lub lotnym popiołem krzemionkowym przyczynia się do szerokiego zakresu zmian mikrostruktury stwardniałego zaczynu (betonu), a w tym między innymi do: większej ilości fazy C-S-H, innej struktury porów w zaczynie oraz niższego stopnia hydratacji (szczególnie w pierwszych jej dniach, gdy zachodzi największy skurcz). Należy zwrócić uwagę, że przytoczone hipotezy mechanizmu skurczu dotyczą właśnie tego samego zakresu mikrostruktury, w którym pochodzą zmiany pod wpływem dodania żużla i/lub popiołu lotnego. Wskazuje to, że dodatki te w sposób pośredni (poprzez zmiany mikrostruktury) mają także wpływ na skurcz stwardniałego zaczynu (betonu). Natomiast bezpośredni wpływ (prawdopodobnie ograniczenie – czego nie można odróżnić, gdyż skurcz jest odkształceniem sumarycznym) żużla i popiołu na skurcz polega na tym, że ich ziarna (z powodu wolniejszej hydratacji jego minerałów niż minerałów klinkieru) pełnią rolę dobrze przyczepnego mikrowypełniacza w zaczynie (Kurdowski i Trybalska, 2004).

Ponadto skurcz samorzutny zależy od składu cementu i można założyć, że będzie mniejszy w przypadku cementów zawierających dodatki, a w szczególności te najmniej reaktywne, np. mielony kamień wapienny.

Znacznie mniej poznany jest wpływ napowietrzenia na skurcz betonu. Jedynie Neville (2012) przytacza za Keene, że napowietrzenie nie powinno mieć wpływu na skurcz betonu. Stąd też przedstawiana praca jest próbą wyjaśnienia tego wpływu w nawiązaniu do struktury porów powietrznych i podstawowych właściwości fizycznych betonu – nasiąkliwości, wodoprzepuszczalności i wytrzymałości.

2. Materiały i metody badań

W związku z określeniem wpływu napowietrzenia i rodzaju cementów zawierających dodatki mineralne wykonano badania skurczu i pęcznienia na stwardniałych betonach napowietrzonych i nienapowietrzonych. Ponadto wykonano oznaczenia właściwości fizycznych świeżych mieszanek betonowych. Dla potrzeb wykonania mieszanek betonowych i betonów użyto tradycyjny cement portlandzki oraz dwa cementy portlandzkie wieloskładnikowe zawierające dodatki mineralne w postaci żużla wielkopieczowego, krzemionkowego popiołu lotnego i mielonego kamienia wapiennego.

Do wykonania betonów użyto następujące rodzaje cementów: portlandzki CEM I 42,5R, portlandzki

żużlowo-popiołowy CEM II/B-M (S-V) 32,5 R (zwany dalej żużlowo-popiołowym) oraz portlandzki wapienny CEM II/A-LL 42,5 R (zwany dalej wapiennym). Do badań mieszanki betonowej i stwardniałych betonów zastosowano dwie serie betonów: nienapowietrzony i napowietrzony o współczynniku wodno-cementowym $w/c = 0,50$.

Wszystkie cementy zostały wykonane na bazie tego samego klinkieru portlandzkiego, pochodzącego z tej samej partii wykonanej w tej samej cementowni. Z każdym z powyższych cementów wykonano po dwa betony: bez domieszki napowietrzającej oraz z domieszką napowietrzającą na bazie modyfikowanych żywic korzennych SIKA LPS V, która została dodana w ilości 0,20-0,28% masy cementu. Jako kruszywo drobne zastosowano naturalny piasek kwarcowy (Dziergowice 0,0-2,0 mm), a jako kruszywo grube naturalne kruszywo otoczkowe (Dziergowice 2-8 mm oraz Wójcice 8-16 mm). Skład mieszanek betonowych został przedstawiony w tabeli 1.

Tab. 1. Skład mieszanek betonowych

Składnik	Zawartość składników [kg/m ³]
Kruszywo grube (żwir), 2-8 mm	548
Kruszywo grube (żwir), 8-16 mm	681
Cement	350
Woda	175*
Piasek kwarcowy	605
Współczynnik W/C	0,50

* masa wody dla betonu nienapowietrzonego oraz masa wody wraz z domieszką napowietrzającą do betonu napowietrzonego.

Na świeżych mieszankach betonowych wykonano następujące oznaczenia mieszanek betonowych:

- konsystencji metodą opadu stożka według PN-EN 12350-2:2011,
- zawartości powietrza metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7:2011,
- gęstości objętościowej mieszanki betonowej według PN-EN 12350-6:2011.

Wyniki badań mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki badań mieszanek betonowych z naturalnym kruszywem otoczkowym

Właściwość	Rodzaj cementu					
	CEM I		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
	np	p	np	p	np	p
Opad stożka, [mm]	30	56	30	60	30	40
Zawartość powietrza, [%]	2,2	5,6	2,2	5,8	2,4	5,8
Gęstość obj. mieszanki, [kg/dm ³]	2350	2260	2360	2250	2370	2290

(np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

W celu określenia reologicznych właściwości stwardniałego betonu wykonano poniższe badania:

- badania odkształceń własnych skurczu i pęcznienia przeprowadzono aparatem Amslera, używając po 6 próbek każdego betonu o wymiarach $10 \times 10 \times 50$ cm z czopikami wbetonowanymi centralnie w czoło próbki. Pierwszy pomiar próbek wykonywano już po 24 godzinach od wykonania próbek; wyniki pomiarów odkształceń skurczu i pęcznienia podano w jednostkach bezwymiarowych; badania prowadzono według PN-84/B-06714/23;
- badania nasiąkliwości przeprowadzono po 28 i 360 dniach stosując po 3 regularne próbki o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ cm według PN-88/B-06250;
- oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono według PN-EN 12390-3:2002 pobierając do badania po 5 próbek o wymiarach $15 \times 15 \times 15$ cm każdego rodzaju betonu.

Próbki do pomiaru odkształceń formowano i przechowywano według PN-84/B-06714/23. Od chwili pierwszego pomiaru, to jest po 24 godzinach od chwili wykonania, próbki betonowe z naturalnym kruszywem otoczkowym były przechowywane w powietrzu o wilgotności względnej $70 \pm 5\%$ i temperaturze 20°C . Czas badania odkształceń własnych skurczu i pęcznienia wynosił do 390 dni.

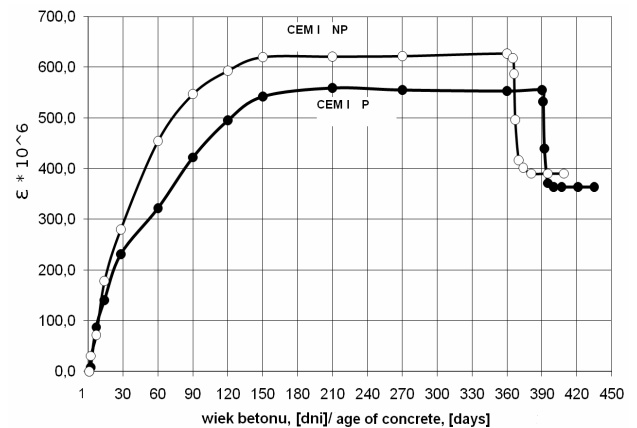
3. Omówienie wyników badań

3.1. Skurcz betonów

Wpływ napowietrzenia

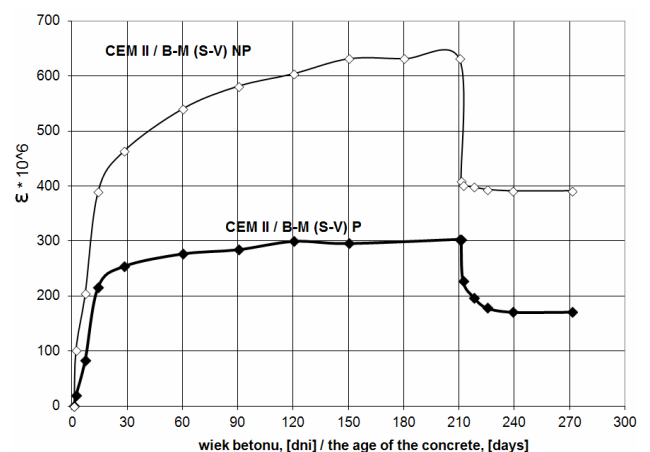
Wyniki badań skurczu i pęcznienia w wodzie w wodzie betonu z cementu portlandzkiego i naturalnego kruszywa otoczkowego, przedstawiono na rysunku 1. Wykazały one, że od 7 dnia, aż do ustabilizowania się skurczu, to znaczy od 360 do 390 dnia, beton napowietrzony posiadał mniejsze odkształcenia niż beton nienapowietrzony. Maksymalna wartość skurczu betonu nienapowietrzonego wynosiła $620 \cdot 10^{-6}$, natomiast betonu napowietrzonego $560 \cdot 10^{-6}$. Względna różnica wartości odkształceń w okresie od 150 do 360 dni wynosiła około 15% w stosunku do betonu nienapowietrzonego. Pęcznienie betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wynosiło odpowiednio $152 \cdot 10^{-6}$ i $201 \cdot 10^{-6}$, a więc i w tym przypadku beton napowietrzony wykazał mniejsze zmiany objętości niż beton nienapowietrzony.

Na podstawie uzyskanych wyników badań skurczu i pęcznienia betonów wykonanych z cementu portlandzkiego można stwierdzić, że napowietrzenie betonu zmniejsza odkształcenia betonu.



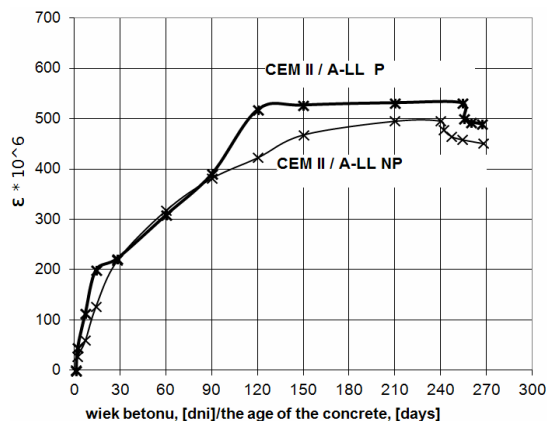
Rys. 1. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

Podobny przebieg skurczu i pęcznienia w wodzie wykazał beton wykonany z cementu żużlowo-popiołowego (rys. 2). Do 7 dnia badań odkształcenia skurczowe betonu nienapowietrzonego były o około 60% większe niż betonu napowietrzonego i wynosiły odpowiednio $204 \cdot 10^{-6}$ i $83 \cdot 10^{-6}$. W okresie od 14 do 210 dnia następował intensywniejszy wzrost odkształceń skurczowych betonu nienapowietrzonego w stosunku do betonu napowietrzonego. W 210 dniu badań wartości skurczu betonu nienapowietrzonego i napowietrzonego wynosiły odpowiednio $632 \cdot 10^{-6}$ oraz $303 \cdot 10^{-6}$, a maksymalna względna różnica odkształceń betonu napowietrzonego w stosunku do betonu nienapowietrzonego wynosiła około 52%. Pęcznienie betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wynosiło odpowiednio $133 \cdot 10^{-6}$ i $240 \cdot 10^{-6}$. W przypadku betonów z cementu żużlowo-popiołowego próbki napowietrzone wykazały prawie dwukrotnie mniejsze pęcznienie niż beton nienapowietrzony.



Rys. 2. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu żużlowo-popiołowego CEM II/B-M (S-V) 32,5 R (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

Zupełnie inny obraz zmian objętości wykazały betony wykonane z cementu portlandzkiego wapiennego (rys. 3). Napowietrzenie betonu wpłynęło na wzrost odkształceń skurczowych.



Rys. 3. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu wapiennego CEM II/A-LL 42,5 R (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że odkształcenia skurczowe betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych od 30 do 90 dnia były w przybliżeniu równe (wartości wynosiły około $390 \cdot 10^{-6}$). Od 120 do 210 dnia badań doszło do zróżnicowania wartości skurczu betonu napowietrzonego do nienapowietrzonego i wyniosło między odkształceniami betonu nienapowietrzonego do napowietrzonego od 19% do 7%. Największe wartości odkształceń skurczowych betony napowietrzone osiągnęły w 254 dniu a nienapowietrzone w 240 dniu, które wyniosły odpowiednio $532 \cdot 10^{-6}$ i $495 \cdot 10^{-6}$. Pęcznienie betonów napowietrzonego i nienapowietrzonego wyniosło odpowiednio $34 \cdot 10^{-6}$ i $45 \cdot 10^{-6}$.

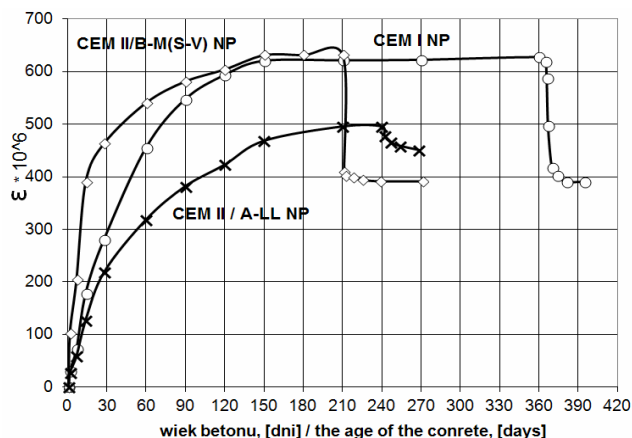
Analizując wyniki badań skurczu i pęcznienia betonów wykonanych z cementu wapiennego, można uznać, że zwiększona ilość mączki wapiennej w cemencie wapiennym (12%) wpłynęła na zmniejszenie się skurczu betonów nienapowietrzonych i napowietrzonych w porównaniu do betonów z cementem portlandzkim (rys. 1), ale wprowadzenie dodatkowej ilości powietrza do betonu z cementem wapiennym zwiększyło jego odkształcenia.

Wpływ napowietrzenia mieszanek betonowych na skurcz można podsumować następująco. Wprowadzenie do mieszanki betonowej z cementu portlandzkiego i żużłowo-popiołowego około 3% dodatkowego powietrza, spowodowało utworzenie porów powietrznych, w efekcie zmniejszając skurcz odpowiednio o 15% i 52%. Natomiast wprowadzenie dodatkowej ilości powietrza do betonu z mączką wapienną spowodowało wzrost odkształceń skurczu o 19%.

Wpływ rodzaju cementu

Wyniki badań wykazały znaczne różnice w przebiegu odkształceń betonów nienapowietrzonych w zależności

od rodzaju użytego cementu. W celu uwidocznienia powyższych różnic krzywe zmian wymiarów liniowych próbek betonów nienapowietrzonych przedstawiono na rysunku 4.



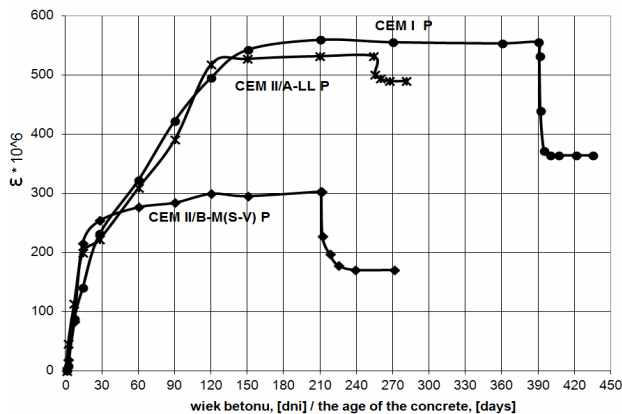
Rys. 4. Wpływ rodzaju cementu na skurcz i pęcznienie betonu nienapowietrzonego (np – beton nienapowietrzony)

Wśród betonów nienapowietrzonych największe odkształcenia skurczowe osiągnęły betony z cementu żużłowo-popiołowego a najmniejsze z cementu wapiennego, które wynosiły odpowiednio $632 \cdot 10^{-6}$ po 210 dniach i $495 \cdot 10^{-6}$ po 240 dniach.

Beton z cementu wapiennego w 120 dniu badań posiadał najniższe wartości odkształceń skurczu w porównaniu do odkształceń betonu z cementem portlandzkim, a różnica wartości wynosiła do 29% w porównaniu z cementem portlandzkim. Porównując odkształcenia skurczowe betonu z cementu żużłowo-popiołowego do betonu z cementem wapiennym największą różnicę skurczu zaobserwowano w 14 dniu badań, która wynosiła 67%, a wartości odkształceń wynosiły $127 \cdot 10^{-6}$ i $390 \cdot 10^{-6}$, odpowiednio dla betonów wapiennego i żużłowo-popiołowego. W wyniku pęcznienia zaobserwowano, że wartości odkształceń betonów z cementem portlandzkim i żużłowo-popiołowym były do 33% niższe od odkształceń pierwotnych przed pęcznieniem.

Na podstawie przeprowadzonych badań (rys. 5) stwierdzono występowanie znacznych różnic w odkształceniach betonów napowietrzonych, które są zależne od rodzaju cementu. Do wieku 28 dni skurcz betonów napowietrzonych z cementów zawierających dodatki mineralne w postaci żużła, krzemionkowego popiołu lotnego oraz mielonego kamienia wapiennego był większy niż skurcz betonu z cementu portlandzkiego. Od 45 dnia do 210 dnia badań zwiększa się na korzyść różnica odkształceń pomiędzy betonem z cementem żużłowo-popiołowym, a pozostałymi betonami. Zdecydowanie najmniejszą wartość odkształcenia skurczowego osiągnął beton napowietrzony z cementu żużłowo popiołowego i był niższy o 46% od skurczu betonu z cementem portlandzkim. Skurcz betonu z cementu wapiennego osiągnął najwyższą wartość $532 \cdot 10^{-6}$ w wieku 254 dni, która była znacznie większa niż wartość odkształcenia betonu z cementem żużłowo-

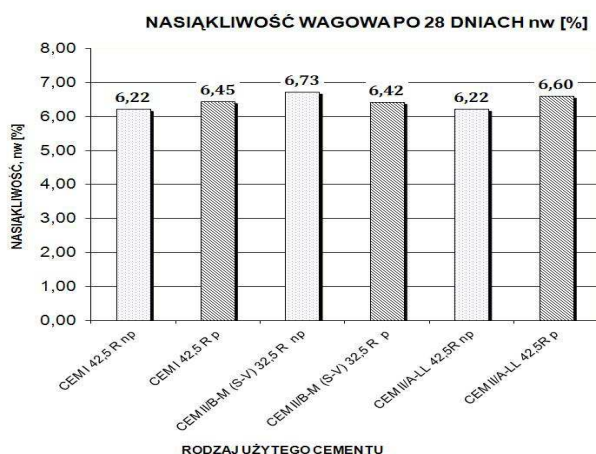
popiołowym, która wynosiła $303 \cdot 10^{-6}$ w wieku 210 dni i tylko nieznacznie niższa niż wartość skurczu cementu portlandzkiego. Ponadto stwierdzono, że przebieg odkształceń skurczu betonów z cementami portlandzkim i wapiennym był blisko podobny w czasie.



Rys. 5. Wpływ rodzaju cementu na skurcz i pęcznienie betonu napowietrzonego (p – beton napowietrzony)

3.2. Nasiąkliwość betonów

Przeprowadzono badania nasiąkliwości wagowej betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych w wieku 28 dni. Na podstawie badań stwierdzono, że największą nasiąkliwość wagową wśród betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych osiągnął beton nienapowietrzony z cementem wieloskładnikowym, która wynosiła 6,73%. Wśród betonów nienapowietrzonych najmniejszą nasiąkliwość wagową 6,2% osiągnęły betony z cementem portlandzkim oraz z cementem wapiennym. Nasiąkliwość wagowa betonów napowietrzonych wynosiła od 6,42% do 6,6% (rys. 6). Wśród betonów napowietrzonych największą nasiąkliwość wagową 6,6% osiągnął beton z cementem wapiennym, a najmniejszą beton z cementem wieloskładnikowym 6,42%.



Rys. 6. Nasiąkliwość wagowa po 28 dniach (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

W celu przeprowadzenia analizy adsorpcji wody przez betony napowietrzone i nienapowietrzone po 28 dniach, wykonano interpretację wyników badań za pomocą nasiąkliwości wagowej i objętościowej (tab. 3).

Dokonując interpretacji wyników badań za pomocą nasiąkliwości objętościowej można stwierdzić, że ich napowietrzenie nie zmieniło nasiąkliwości dla betonów z cementem portlandzkim, a więc inaczej niż przedstawiono to na podstawie nasiąkliwości wagowej. Należy też podkreślić korzystny wpływ cementu zawierającego żużel wielkopiecowy i krzemionkowy popiół lotny na nasiąkliwość betonu napowietrzonego. Z przedstawionych wyników wynika, że betony z cementami portlandzkim i wapiennym w wyniku napowietrzenia zwiększyły adsorpcję wody.

Tab. 3. Nasiąkliwość objętościowa po 28 dniach badania

Właściwość	Rodzaj cementu					
	CEM I		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
Beton	np	p	np	p	np	P
n_o (28 dni) [%]:	14,0	14,0	15,0	14,0	13,0	14,0

(np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

3.3. Wytrzymałość betonów na ściskanie

W tabeli 4 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie oraz ich klasyfikację zgodnie z PN-EN-206-1.

Tab. 4. Wytrzymałość na ściskanie w wieku 28 dni i klasy wytrzymałości

Właściwość	Rodzaj cementu					
	CEM I		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
Beton	np	p	np	p	np	p
f_{cm} [MPa]:	46,1	38,9	49,9	44,2	43,3	38,1
Klasa wytrzymałości	C30/37	C25/30	C35/45	C30/37	C30/37	C25/30

(np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że napowietrzenie betonów (z cementów: portlandzkiego, żużlowo-popiołowego i wapiennego) spowodowało obniżenie wytrzymałości betonu po 28 dniach od 11,4 do 15,6%, co stanowi od 3,17% do 4,59% spadku wytrzymałości na 1% napowietrzenia. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie wystąpił w betonie napowietrzonym z cementem portlandzkim, a najmniejszy w betonie z cementem żużlowo-popiołowym.

4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- napowietrzenie betonów powoduje spadek odkształceń reologicznych skurczu i pęcznienia betonów zawierających cementy portlandzki i żużlowo-popiołowy;

- napowietrzenie betonów powoduje wzrost odkształceń reologicznych skurczu i pęcznienia betonów zawierających mączkę wapienną;
- porównanie skurczu napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów z trzech rodzajów cementów pokazuje, że największy skurcz ma beton nienapowietrzony z cementu żużlowo-popiołowego, a najmniejszy ma beton napowietrzony także z cementu żużlowo-popiołowego;
- skurcz odwracalny (pęcznienie) stwardniałego betonu z cementu portlandzkiego jest największy spośród pozostałych betonów;
- napowietrzenie betonów z cementów zawierających dodatek żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego wpływa na zmniejszenie się adsorpcji wody w czasie;
- wyjaśnienie zagadnienia skurczu betonów z dodatkami mineralnymi oraz ich wpływu na adsorpcję wody do betonu wymagają dalszych badań rozszerzonych o inne cementy z dodatkami.

Literatura

- Bentur A., Kung J., Berger R. L., Young J. F., Milstone N. B., Mindess S., Lawrence F. V. (1980). Influence of microstructure on the creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes. *7th ICCP Paris*, t. III, VI-26-31.
- Thomas J. J., Jennings H. M. (2006). A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel and its effects on the properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 11, 30-38.
- Kurdowski W., Trybalska B. (2004). Skład fazowy zaczynu cementowego a właściwości betonu. Konferencja Dni

Betonu. *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, Wisła. 65-78.

Neville A.M. (2012). Właściwości betonu. *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, Kraków, 458-470.

RHEOLOGY OF AIR ENTRAINMENT CONCRETES AND CEMENTS WITH MINERAL ADDITIVES

Abstract: The studies were carried out to find the effect of air entrainment and blended cements on rheological deformations of concretes. The cements used were ordinary Portland cement and two blended Portland cements containing: blast furnace granulated slag-fly ash blend and limestone powder. It was stated that air entrainment results in lowering of shrinkage and swelling of concretes made of OPC and blast furnace granulated slag-fly ash blend cement. The increase in both deformations of air entrained concrete occurs when the limestone cement is used. The linear dimension changes was measured with Amsler's apparatus, according to the Polish standard PN-B-06714-23:1984, using 6 samples of each concrete with dimensions 10×10×50 cm, equipped with steel pins cemented in the both ends of the beams. The first measurement was made after 24 hours from concrete beams preparation.

Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach programu „INWENCJA – Potencjał młodych naukowców oraz transfer wiedzy i innowacji wsparciem dla kluczowych dziedzin świętokrzyskiej gospodarki”, Nr ID: WND-POKL.08.02.01-26-020/11