

# **Nasiąkliwość, wodoprzepuszczalność, wytrzymałość i odkształcenia długotrwałe betonów napowietrzonych**

WATER PERMEABILITY, WATER ADSORPTION, COMPRESSIVE STRENGTH  
AND LONG-TERM DEFORMATIONS OF AIR ENTRAINED CONCRETES

## **Streszczenie**

W pracy podjęto próbę wyjaśnienia relacji pomiędzy właściwościami fizycznymi a reologicznymi odkształceniami napowietrzonych betonów wykonanych z różnych cementów. Użyto cementu portlandzkiego i trzech cementów portlandzkich z dodatkami zawierającymi: wielkopiecowy żużel granulowany, żużel wielkopiecowy i popiół lotny i mączkę wapienną. Dokonano pomiarów nasiąkliwości, wodoprzepuszczalności, wytrzymałości na ściskanie oraz odkształceń skurczu betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych. Niestety, za wyjątkiem betonów z cementem żużlowym nie zauważono żadnych korelacji pomiędzy właściwościami betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych. Ogólnie, kiedy był używany cement żużłowy, to zostały zaobserwowane najlepsze właściwości fizyczne i długotrwałe odkształcenia betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych.

## **Abstract**

The studies were carried out to find a relation between physical properties and rheological deformation of air entrained concretes made of various cements. The cements used were Portland cement and three blended Portland cements containing: blast furnace granulated slag, blast furnace granulated slag-fly ash blend and limestone powder. There were measured water permeability, water adsorption, compressive strength and linear shrinkage deformations of air entrained concretes and normal ones. Unfortunately, except for bfg-slag cement concretes there was not any correlation between the properties of air

entrained concretes and normal concretes. Generally, when bfg-slag cement was used, there were stated the best physical properties and lowest long-term deformation for the air entrained concrete and normal one.

## 1. Wprowadzenie

Właściwości fizyczne betonu, takie jak nasiąkliwość, wodoprzepuszczalność i wytrzymałość na ściskanie są przede wszystkim zależne od mikrostruktury zaczynu cementowego i warstwy kontaktowej kruszywo-zaczyn, czyli od porowatości kapilarnej, rozkładu wielkości porów kapilarnych oraz składu fazowego, ściśle z kolei związanych ze stosunkiem w/c, stopniem hydratacji cementu, rodzajem cementu i zawartością dodatków mineralnych. O ile w przypadku nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności opisujących ruch wody lub jej roztworu w betonie istnieje zastrzeżenie występowania w nim ciągłych i dużych porów kapilarnych ( $d > 50 \text{ nm}$ ) [1], to mówiąc o wytrzymałości, oprócz porowatości kapilarnej, należy także uwzględnić jej zmniejszenie (o 5,5% na każdy 1% wprowadzanego powietrza) przez nieciągłe pory powietrzne wprowadzane w celu poprawy mrozoodporności [2]. Natomiast napowietrzenie powinno korzystnie dla betonu wpłynąć na obniżenie nasiąkliwości i przepuszczalności [3].

W strukturze porów powietrznych w betonie należy brać pod uwagę dwa główne czynniki: ogólną zawartością powietrza i wymiary pęcherzyków powietrznych. Natomiast odporność na zamrażanie zależy jeszcze od trzeciego czynnika: średniej odległości pomiędzy porami powietrznymi [2]. Według Giergiczego [4] zastosowanie cementu o dużej zawartości żużla powoduje zmniejszenie ogólnej ilości powietrza w stwardniałym betonie, a według Wawrzeńczyka [2] obecność żużla powoduje także zaburzenia w rozmieszczeniu pęcherzyków powietrza, tzn. zmniejszenie zawartości porów mniejszych niż  $300 \mu\text{m}$  oraz wzrost średniej odległości między porami powietrznymi L.

Podstawowe odkształcenia reologiczne stwardniałego betonu nieobciążonego to odkształcenia własne zachodzące w czasie, czyli przede wszystkim skurcz i pęcznienie. Odkształcenia te mają bardzo szczególnie charakter – w całym swoim zakresie, bez względu na stopień hydratacji cementu związane są z ruchem wody w zaczynie, nawet podczas najwcześniejszych chwil, gdy zachodzi skurcz chemiczny (tzw. kontrakcja). Skurcz ten związany jest z mniejszą objętością wody w fazach uwodnionych niż w fazie ciekłej [5]. Drugim składnikiem skurczu jest skurcz samorzutny zachodzący przez autowysychanie, związane z kontynuacją hydratacji. Skurcz ten, podobnie jak zmniejszanie objętości zaczynu i betonu przy wysychaniu, zachodzi w wyniku opuszczania porów zaczynu przez wodę, jednak pochłanianą przez powstające hydraty, wywołuje naprężenia [6]. Skurcz samorzutny zależy od ilości cementu w betonie oraz od jego składu fazowego. Należy oczekiwać, że wpływ cementu jak i całkowita wartość skurczu będą się zmniejszały wraz z zawartością dodatków mineralnych [7], których hydratacja jest wolniejsza. Dodatkowym korzystnym efektem zastosowania popiołów i żużla jest zmiana mikrostruktury stwardniałego zaczynu (betonu), a w tym m.in. powstawanie większej ilości fazy C-S-H i korzystniejszej struktury porów. Skurcz betonu przy wysychaniu w powietrzu trwa przez bardzo długi czas i zależy od wilgotności powietrza. Osuszanie 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.

Znacznie gorzej znany jest wpływ napowietrzenia na skurcz betonu. Jedynie Neville [8] przytacza za Keene, że napowietrzenie nie powinno mieć wpływu na skurcz betonu. Stąd też przedstawiana praca jest próbą wyjaśniania tego wpływu w nawiązaniu do podstawowych właściwości fizycznych betonu – nasiąkliwości, wodoprzepuszczalności i wytrzymałości oraz do struktury porów powietrznych.

## 2. Materiały i metody badań

Badania odkształceń własnych, w tym skurczu, zostały przeprowadzone na betonach nienapowietrzonych i napowietrzonych o stosunku wodno-cementowym  $w/c = 0,50$ . Do wykonania betonów użyto następujące rodzaje cementów: portlandzki CEM I 42,5R, portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5N (zwany dalej w tekście żuźlowym); portlandzki żuźlowo-popiołowy CEM II/B-M (S-V) 32,5 R (zwany dalej żuźlowo-popiołowy) oraz portlandzki wapienny CEM II/A-LL 42,5 R (zwany dalej wapiennym). Wszystkie cementy zostały wykonane na bazie tego samego klinkieru portlandzkiego, pochodzącego z tej samej cementowni. Z każdym z powyższych cementów wykonano po dwa betony: bez domieszki napowietrzającej oraz z domieszką napowietrzającą, 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 tablicy 1.

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych [kg / m<sup>3</sup>]

beton z kruszywem otoczkowym naturalnym
$K_{2-8} = 548$
$K_{8-16} = 681$
$C = 350$
$W = 175^*$
$P = 605$
$W/C = 0,50$

\* całkowita masa wody dla betonu nienapowietrzonego oraz całkowita masa wody wraz z mieszką napowietrzającą do betonu np.

Od chwili pierwszego pomiaru, tj. po 24 godzinach od chwili wykonania, próbki betonowe z naturalnym kruszywem otoczkowym były przechowywane w powietrzu o wilgotności względnej  $70 \pm 5\%$  i temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Czas badania odkształceń skurczu wynosił do 390 dni.

W celu określenia właściwości stwardniałego betonu wykonano następujące badania:

- Badania odkształceń przeprowadzono aparatem Amslera, używając po 6 próbek każdego betonu o wymiarach  $10 \times 10 \times 50$  cm z czopikami wbetonowanymi centralnie w czoło. Pierwszy pomiar próbek wykonywano już po 24 godzinach od wykonania próbek.
- Oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono według PN-EN 12350-3:2001 pobierając do badania po 5 próbek  $15 \times 15 \times 15$  cm każdego betonu.
- 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 głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykonano według PN-EN 12390-8:2001 w wieku 28 i 360 dni stosując po 3 próbki o wymiarach  $15 \times 15 \times 15$  cm z każdego rodzaju betonu.

Oprócz badań stwardniałego betonu zostały wykonane następujące oznaczenia mieszanek betonowych:

- konsystencji metodą opadu stożka

- zawartości powietrza metodą ciśnieniową
- gęstości objętościowej mieszanki betonowej.

Wyniki badań mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań mieszanek betonowych z naturalnym kruszywem otoczkowym

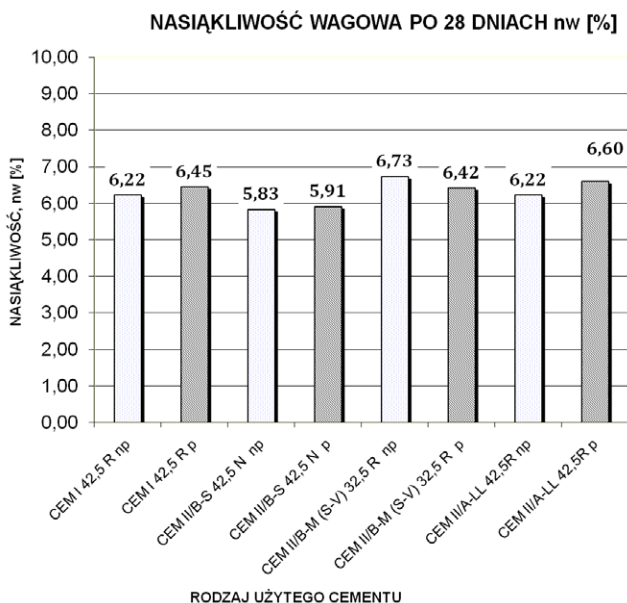
kruszywo	naturalne kruszywo otoczkowe							
	CEM I		CEM II/B-S		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
cement	np	p	np	p	np	p	np	p
opad stożka, [cm]	3,0	5,6	1,0	5,0	3,0	6,0	3,0	4,0
zawartość powietrza, [%]	2,2	5,6	2,0	5,2	2,2	5,8	2,4	5,8
gęstość obj. mieszanki, [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,35	2,26	2,36	2,29	2,36	2,25	2,37	2,29

(np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

### 3. Omówienie wyników badań

#### 3.1. Nasiąkliwość betonów

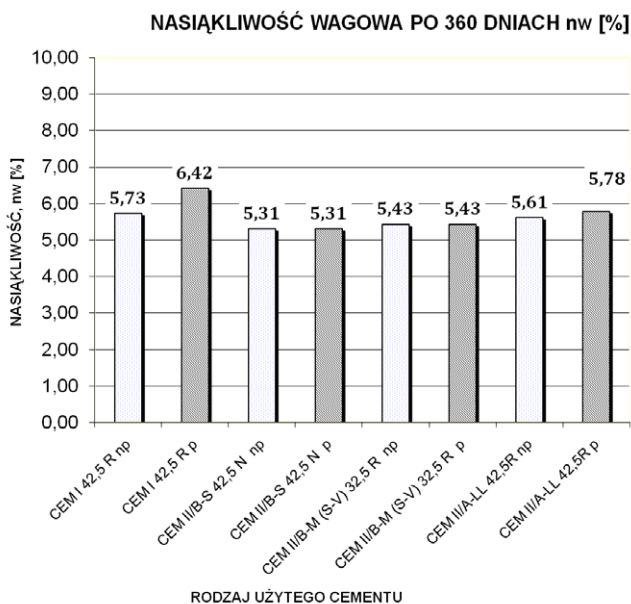
W celu dokonania analizy adsorpcji wody do betonów po 28 i 360 dniach wyniki badań zinterpretowano za pomocą nasiąkliwości wagowej i objętościowej (tabela 3). Po 28 dniach nasiąkliwość wagowa betonów napowietrzonych wynosiła od 5,9% do 6,6 % (rys. 1), a betonów nienapowietrzonych od 6,2% do 6,7% (rys. 1). W obu przypadkach



Rys. 1. Nasiąkliwość wagowa po 28 dniach (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

najmniejszą nasiąkliwość wagową miał beton z cementem portlandzkim żuźlowym. Poza betonem z cementem żuźlowo-popiołowym nasiąkliwość wagowa pozostałych betonów napowietrzonych była mniejsza niż nienapowietrzonych.

Wśród betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych największe nasiąkliwości wagowe osiągały betony odpowiednio – z cementem zawierającym mączkę wapienną oraz z cementem żuźlowo-popiołowym. Po 365 dniach twardnienia najmniejszą nasiąkliwość wagową, tj. 5,31%, miały także betony z cementu żuźlowego, a w następnej kolejności z cementu zawierającego żużel i popiół lotny – 5,43%.



Rys. 2. Nasiąkliwość wagowa po 365 dniach (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

Interpretując wyniki za pomocą nasiąkliwości objętościowej najogólniej dla wszystkich betonów można stwierdzić, że ich napowietrzenie nie zmieniło nasiąkliwości objętościowej, a więc inaczej niż przedstawiono to na podstawie nasiąkliwości wagowej. Na podstawie przeprowadzonych analiz nasiąkliwości wagowej i objętościowej należy podkreślić bardzo korzystny wpływ cementu zawierającego żużel wielkopieczowy na nasiąkliwość betonu zarówno napowietrzonego, jak i nienapowietrzonego. Z przedstawionych wyników wynika, że betony z cementem portlandzkim wykazały największą adsorpcję wody,

Tabela 3. Nasiąkliwość objętościowa po 28 i 360 dniach badania

cement	CEM I		CEM II/B-S		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
	np*	p*	np*	p*	np*	p*	np*	p*
$n_o$ (28 dni) [%]:	14,0	14,0	13,0	13,0	15,0	14,0	13,0	14,0
$n_o$ (365 dni) [%]:	13,0	14,0	12,0	12,0	12,0	12,0	14,0	12,0

\* (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

w szczególności po 365 dniach. W ocenie ogólnej wyraźnie widoczne jest zmniejszanie nasiąkliwości wszystkich betonów w czasie.

Interpretacja za pomocą nasiąkliwości objętościowej wnosi czytelniejsze informacje na temat ilości wody wnikałej do betonu.

### 3.2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Dokonano także analizy głębokości penetracji wody pod ciśnieniem po 28 i 365 dniach badania betonów nienapowietrzonych i napowietrzonych. Wyniki pomiarów głębokości penetracji wody pod ciśnieniem zestawiono w tabeli 4. Zaobserwowano, że w wyniku napowietrzenia po 28 oraz 365 dniach betony z cementem portlandzkim oraz wapiennym posiadały zwiększoną głębokość penetracji w stosunku do betonów nienapowietrzonych. Tylko w przypadku betonów zawierających żużel wielkopiecowy, tzn. CEM II B-S oraz CEM II B-M (S-V) wprowadzenie powietrza spowodowało zmniejszenie głębokości penetracji wody do 5,0 mm oraz od 1,0 mm do 10,00 mm odpowiednio po 28 dniach oraz 365 dniach badania.

Tabela 4. Wyniki pomiarów głębokości penetracji wody pod ciśnieniem po 28 i 365 dniach badania\*\*

cement	CEM I		CEM II/B-S		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
	np*	p*	np*	p*	np*	p*	np*	p*
głębokość penetracji po 28 dniach [mm]	22,0	37,0	26,0	21,0	22,0	17,0	8,0	12,0
głębokość penetracji po 360 dniach [mm]	14,0	25,0	23,0	13,0	19,0	18,0	20,0	24,0

\* (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony),

\*\* (wartości średnie z 3 próbek dla każdego betonu)

### 3.3. Wytrzymałość betonów na ściskanie

W tabelach 5 i 6 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie oraz ich klasyfikację zgodnie z PN-EN-206-1.

Tabela 5. Wytrzymałość na ściskanie w wieku 28 dni i klasy wytrzymałości

cement	CEM I		CEM II/B-S		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
	np*	p*	np*	p*	np*	p*	np*	p*
$f_{cm}$ [MPa]:	46,1	38,9	51,8	43,2	49,9	44,2	43,3	38,1
klasa wytrzymałości	C30/37	C25/30	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C25/30

\* (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

Tabela 6. Wytrzymałość na ściskanie w wieku 360 dni

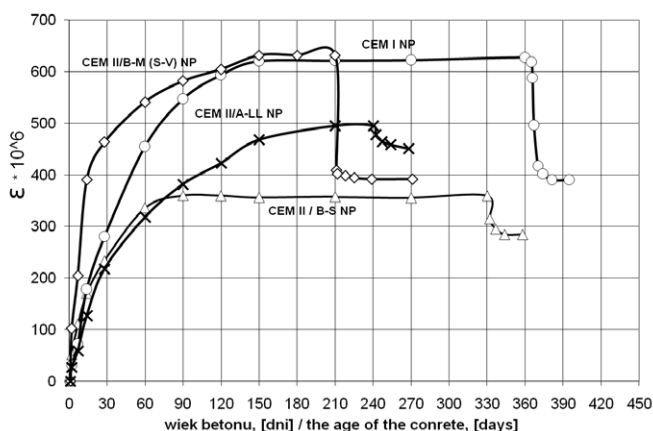
cement	CEM I		CEM II/B-S		CEM II/B-M (S-V)		CEM II/A-LL	
beton	np*	p*	np*	p*	np*	p*	np*	p*
$f_{cm}$ [MPa]:	58,4	47,4	68,8	65,0	60,9	54,4	57,1	45,3
przyrost wytrzymałości [%]	26,7	21,8	32,8	50,5	22,0	23,1	31,9	18,9

\* (np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony)

Napowietrzenie betonów (z cementów: portlandzkiego, żuźlowego, żuźlowo-popiołowego i wapiennego); spowodowało obniżenie wytrzymałości betonu po 28 dniach od 11,4 do 16,6%, co stanowi od 3,2% do 5,2% spadku wytrzymałości na 1% napowietrzenia. Po 365 dniach twardnienia wytrzymałość na ściskanie betonów napowietrzonych była od 5,5 do 20,7% niższa od betonów nienapowietrzonych, co daje od 1,7% do 6,1% spadku wytrzymałości na 1% napowietrzenia. Natomiast po 365 dniach odnotowano znaczące przyrosty wytrzymałości betonów nienapowietrzonych od 22,0 do 32,8% i napowietrzonych odpowiednio od 18,9 do 50,5%.

### 3.4. Skurcz betonów

W związku z tym, że skurcz jest typowym odkształceniem reologicznym – zachodzącym długotrwale, to właściwości fizyczne rozważano również w czasie po 28 i 360 dniach. Wyniki badań odkształceń przedstawiono na rysunkach 3 i 4, które w sposób bezpośredni pozwalają na porównanie wpływu cementów oddzielnie dla napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów. Natomiast porównanie wspólne przedstawionych wyników badań pozwala na ocenę wpływu napowietrzenia. Podając w sposób skrócony wyniki badań należy poinformować, że dwie jednoczynnikowe analizy wariancji wpływu napowietrzenia oraz wpływu rodzaju cementu, a także dwuczynnikowa analiza wariancji wpływu napowietrzenia i rodzaju cementu wykazały w każdym z rozważanych przypadków istotność wpływu obu czynników. Także analizy najmniejszych istotnych różnic potwierdziła istotność wpływu napowietrzenia.

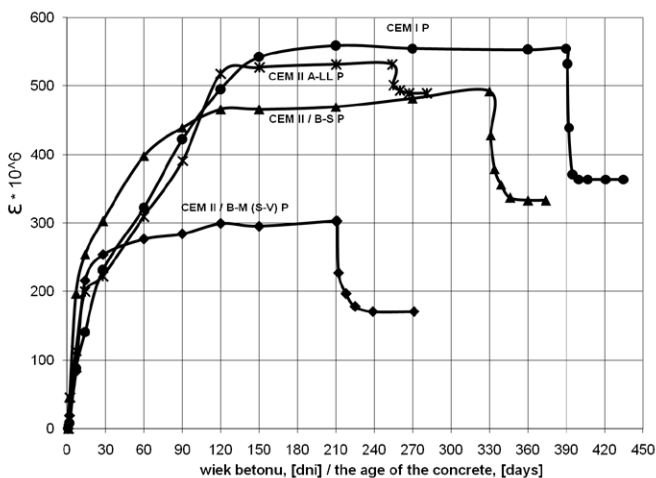


Rys. 3. Wpływ cementu na skurcz i pęcznienie betonu nienapowietrzonego z kruszywa otoczkowego (np – beton nienapowietrzony)



Wśród wszystkich związków w szczególności należy podkreślić, że największe statystyczne różnice występują między skurczem nienapowietrzonych betonów z cementów portlandzkiego i żuźlowego, a w drugiej kolejności przy zastosowaniu cementów z mączką wapienną i portlandzkiego (rys. 3)

W przypadku betonów napowietrzonych istotne różnice skurczu stwierdzono przy użyciu cementów portlandzkiego i żuźlowo-popiołowego (rys. 4)



Rys. 4. Wpływ cementu na skurcz i pęcznienie betonu napowietrzonego z kruszywa otoczkowego (p – beton napowietrzony)

## 4. Analiza wyników badań

Dokonując łącznej analizy wyników, stwierdzono że istnieje wpływ napowietrzenia. Jednak nie do końca jest on w każdym przypadku wyraźnie czytelny. Mimo napowietrzenia betonów praktycznie do takiej samej zawartości powietrza (5,2–5,8% w mieszance betonowej) nie wszystkie zmiany właściwości, poza wytrzymałością na ściskanie, która istotnie zmalała, miały te same tendencje zmian potwierdzające się dla każdego cementu. Tym samym można także mówić o wpływie samego cementu i wpływie jego interakcji z napowietrzeniem na badane właściwości. Nie można uzgodnić ścisłej reguły, że wraz ze wzrostem całkowitej porowatości poprzez napowietrzenie następuje ta sama zmiana nasiąkliwości, przepuszczalności i skurczu, jak to ma miejsce gdy zwiększamy stosunek w/c, powodując zgodne zmiany – wzrostu porowatości kapilarnej, nasiąkliwości oraz wzrostu skurczu i spadku wodoprzepuszczalności, bez względu na rodzaj stosowanego cementu.

Podobne – o tej samej tendencji, zmiany skurczu wykazywały betony z cementem portlandzkim oraz z cementem żuźlowo-popiołowym, w których poprzez napowietrzenie wystąpiło zmniejszenie odkształceń, natomiast betony z cementem zawierającym żużel oraz mączkę wapienną, wykazały ich zwiększenie.

W wyniku napowietrzenia w wieku 28 dni nasiąkliwość wagowa prawie wszystkich betonów napowietrzonych zwiększyła się, natomiast w wieku 365 dni nasiąkliwość wa-

gowa betonów z cementami CEM II B-S i CEM II B-M (S-V) była taka sama jak betonów nienapowietrzonych. Jednak porównywanie nasiąkliwości wagowej betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych nie jest właściwe, ponieważ odnosi się do masy betonów, a masa betonów napowietrzonych zawsze musi być mniejsza niż nienapowietrzonych. Najmniejszą i taką samą nasiąkliwość miały napowietrzone i nienapowietrzone betony z cementem żuźlowym

Podczas prowadzonych badań stwierdzono zróżnicowany wpływ napowietrzenia w zależności od rodzaju cementu na głębokość penetracji wody pod ciśnieniem. Można jednak zauważyć, że głębokość penetracji wody po 28 i 365 dniach w betonach z obydwoma cementami zawierającymi żużel wielkopiecowy została zmniejszona przez napowietrzenie. We wszystkich betonach napowietrzonych, bez względu na rodzaj cementu, wytrzymałość na ściskanie jest niższa niż betonów nienapowietrzonych, a zmniejszenie wytrzymałości na 1% napowietrzenia wynosi od 3,2% do 5,2% i od 1,7% do 6,1% odpowiednio po 28 i 365 dniach dojrzewania. Jak należało przewidywać, wraz z czasem od 28 do 365 dnia, nastąpił wzrost wytrzymałości, zmniejszenie penetracji i zmniejszenie nasiąkliwości oraz miał miejsce coraz wolniejszy skurcz zarówno dla betonów nienapowietrzonych i napowietrzonych.

## 5. Wnioski

- Napowietrzenie ma statystycznie istotny wpływ na skurcz betonu.
- Najmniejszy skurcz betonów nienapowietrzonych i napowietrzonych osiągnęły betony z cementem zawierającym żużel.
- Głębokość penetracji wody i nasiąkliwość objętościowa betonu napowietrzonego z cementem żuźlowym była najmniejsza.
- Niestety, poza betonami z cementem żuźlowym, nie można wykazać wyraźnej korelacji właściwości reologicznych i fizycznych napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów. W celu wyjaśnienia tego zagadnienia należy kontynuować w szerokim zakresie dalsze badania.

**Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.**

## Literatura

- [1] Kumor A., Roy D.M., Pore structure and ionic diffusion in admixture blended portland cement systems, 8th ICCS Vol.1, pp. 73–79, Rio de Janeiro 1986.
- [2] Wawrzeńczyk J., Molendowska A., „Cement Wapno Beton”, s. 278, 5/2011.
- [3] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [4] Giergiczyński Z. i in. Charakterystyka porów powietrznych a mrozoodporność betonów na cementach żuźlowych. KILiW PAN. s. 30–308, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 2008.
- [5] Buil M., Baron J., 7<sup>th</sup> ICCS Paris, III, s. VI–37, Paris 1980.
- [6] Aitcin P.C., „Cement Wapno Beton”, s. 115, 4/2003.
- [7] Piasta W., Sikora H., „Cement Wapno Beton”, s. 116, 2/2012.
- [8] Neville A.M., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.