

Mariusz Dąbrowski
Arkadiusz Ignierowicz
Michał Oleksik
Patrik Kucharski
Michał A. Glinicki

Stabilność charakterystyki porów i przepuszczalność betonu nawierzchniowego z cementami z dodatkami mineralnymi

THE STABILITY OF AIR VOIDS CHARACTERISTICS AND PERMEABILITY
OF CONCRETE PAVEMENT WITH MINERAL ADDITIVES

Streszczenie

Stabilność właściwości mieszanki betonowej od momentu wymieszania do wbudowania wpływa na trwałość wykonanej konstrukcji. W przypadku betonu klasy projektowanego na agresję środowiska XF4 szczególnie istotna jest stabilność pęcherzyków powietrza wprowadzanych za pomocą domieszki napowietrzającej. Przedstawione badania rozważają wpływ stosowania cementów z dodatkami mineralnymi CEM II/A-V 42,5R, CEM II/B-S 42,5N i CEM III/A 42,5N na dystrybucję porów w mieszance betonowej przeznaczonej na górną warstwę nawierzchni betonowej. Przeanalizowano zmiany charakterystyki porów w betonie od wykonania do wbudowania. Próbkę pobrano bezpośrednio po wykonaniu mieszanki, po godzinie bezruchu i po wysokoenergetycznym mieszaniu po godzinie bezruchu. Określono właściwości mieszanki betonowej, charakterystykę porów, właściwości mechaniczne, szybkość absorpcji wody i rezystywność betonu.

Przeprowadzone badania wykazały utratę do 0,55% całkowitej zawartości powietrza w betonie po godzinie bezruchu. Wysokoenergetyczne mieszanie zwiększyło całkowitą zawartość powietrza o 1,57%, 1,02%, 0,92% odpowiednio w betonie z cementem CEM I, CEM II/A-V i CEM II/B-S. W betonie z CEM III/A zawartość powietrza zmniejszyła się o 0,69%. Wysokoenergetyczne mieszanie zwiększyło udział mikroporów – A_{300} w całkowitej zawartości powietrza w betonie z cementami żuźlowymi przyczyniając się do zwiększenia o 8-12% tak wytrzymałości na ściskanie, jak i rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach dojrzewania. Pomiar rezystywności pozwolił zaobserwować zwiększenie przepuszczalności próbek po dodatkowym mieszaniu.

dr inż. Mariusz Dąbrowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

mgr. inż. Arkadiusz Ignierowicz – Atlas Sp. z o.o.

mgr. inż. Michał Oleksik – Atlas Sp. z o.o.

mgr. inż. Patrik Kucharski – Atlas Sp. z o.o.

prof. dr hab. inż. Michał A. Glinicki – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Abstract

The stability of air bubbles in concrete mixture from homogenization to final embedding in pavement is necessary. The presented paper examine effect of using cements with supplementary cementitious materials, as CEM II / A-V 42.5R, CEM II / B-S 42.5N and CEM III / A 42.5N, on the air void distribution in the concrete mix intended for the upper layer of the concrete pavement. The fluctuation of air voids characteristics in concrete from homogenization to casting were analyzed. The specimens after mixing, one hours of inactivity and high-energy mixing after inactivity were taken. The concrete mix properties, air voids characteristics, mechanical properties, water absorption and hardened concrete resistivity were determined.

The investigation revealed a loss up to 0,55% of total air content in concrete after one hour of inactivity. The high-energy mixing increased the total air content by 1.57%, 1.02%, 0.92% in concrete with CEM I, CEM II/A-V and CEM II/B-S respectively. The air content in CEM III/A concrete decreased by 0.69%. The high-energy mixing increased the share of micropores – A_{300} in the total air content in concrete with slag cements, contributing to 8-12% increase in both compressive and splitting strength after 28 days of curing. The resistivity measurements shown an increase in sample permeability after additional mixing.

1. Wprowadzenie

Stosowanie betonu w warunkach silnego nasycenia wodą ze środkami odladzającymi wymusza ograniczenia recepturowe i stosowanie domieszek napowietrzających w celu zapewnienia trwałości w środowisku cyklicznego zamrażania i rozmrażania. W przypadku płyty nawierzchniowej układanej metodą ślizgową, zwłaszcza dwuwarstwowej z ekspozycją kruszywem, technologia ogranicza urabialność mieszanki [1] i w konsekwencji wymaga niewielkiej konsystencji (V1-V2, S1), co utrudnia utrzymanie właściwego poziomu napowietrzenia przed wbudowaniem, w granicach 4,5-6,5%. Niejednokrotnie prowadzi to do zmiany finalnej mikrostruktury porów w stwardniałym betonie [2]. Efekty są widoczne w postaci znacznie mniejszej całkowitej zawartości powietrza (A) w porównaniu do pomiarów metodą ciśnieniową oraz zmian w proporcji porów mniejszych od 300 μm do całkowitej zawartości powietrza (A_{300}/A) [3]. Możliwa jest sytuacja odwrotna, gdy w warunkach podwyższonej temperatury (powyżej 30°C) oraz zbyt krótkiej homogenizacji składników i/lub przedozowania domieszki napowietrzającej następuje wtórne napowietrzenie podczas wbudowywania betonu przez maszynę układającą nawierzchnię [4]. Dodatkową kwestią pozostaje zmiana parametrów technologicznych takich jak zmiana urabialności, czasu od zarobienia do wbudowania, sposobu transportu, kompatybilności domieszki napowietrzającej z układem mineralnym spoiwa i domieszką uplastyczniającą, jednakże nie będzie poruszana w niniejszej pracy.

Zastosowanie dodatków mineralnych w układzie mineralnym spoiwa sprawia, że charakterystyka porów jest jeszcze bardziej podatna na fluktuacje w czasie od zarobienia do wbudowania w nawierzchnię. W zależności od ilości i rodzaju dodatku może następować 1-2% spadek zawartości powietrza – dodatek popiołu lotnego [5] i żużla wielkopieczowego [6] lub powstanie pęcherzyków powietrza o mniejszych średnicach – mikrokrzemionka [7]. Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych [8] umożliwiają stosowanie cementów z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego (S), jednak ogranicza się do nawierzchni jednowarstwowych oraz technologii dwuwarstwowej, gdy górna i dolna warstwa nawierzchni jest wykonana z tej samej mieszanki. Liczne prace [9], [10], [11] wskazują możliwość coraz powszechniejszego stosowania cementów z dodatkami w nawierzchniach betonowych. Dodatkowo, koncepcja zrównoważonego rozwoju przedstawiona w raporcie technicznym [12] zakłada powszechne stosowanie dodatków mineralnych, jak i kruszyw z recyklingu w dolnej warstwie nawierzchni dwuwarstwowych. Wdrażanie powyższych trendów potwierdzają badania Rudnickiego i Jurczaka [13] przeprowadzone na podstawie polskich nawierzchni betonowych.

Zmianom jakościowym charakterystyki porów w betonie zazwyczaj nie towarzyszą zmiany w przepuszczalności [14]. Niemniej zmiany ilościowe wpływają na szybkość transportu cieczy do wnętrza matrycy cementowej [15]. Dodatkowo zwiększeniu całkowitej zawartości powietrza sprzyja tworzeniu rezerwuarów cieczy porowej, która ma istotny wpływ na trwałość betonu w przypadku dostępu do alkaliów pochodzących ze środków odladzających.

Zważywszy na ważność kwestii stosowania w nawierzchniach betonowych cementów z dodatkami mineralnymi podjęcie tematu zmian ilościowych i jakościowych charakterystyki porów klasie środowiskowej XF4 jest zasadne. Celem referatu jest rozpoznanie zmian charakterystyki porów powietrznych mieszanek betonowych z cementami z dodatkami mineralnymi na trzech etapach technologicznych: zaraz po wykonaniu, po godzinie od wykonania i następnie po dodatkowym wysokoenergetycznym mieszaniu. Zmiany

ilościowe i jakościowe rozkładu wielkości porów oceniono w odniesieniu do szybkości podciągania kapilarnego i rezystywności stwardniałego betonu.

2. Materiały i program badań

2.1. Receptura betonu

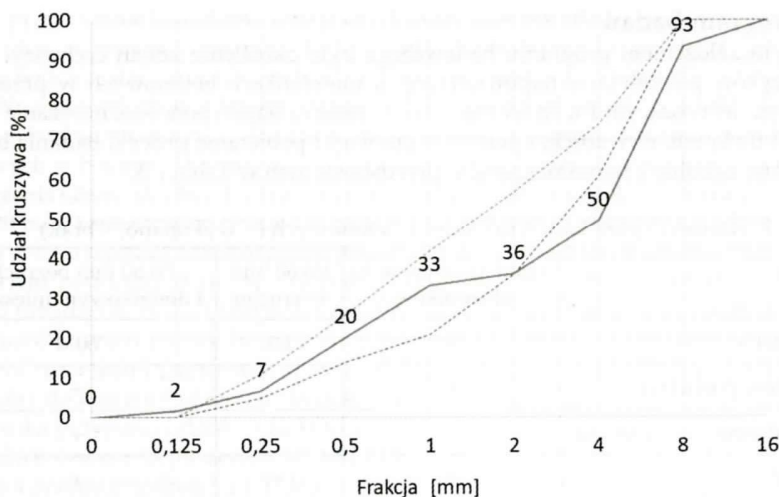
Koncepcja badań zakładała wykonanie mieszanki betonowej na górną warstwę nawierzchni dwuwarstwowej (GWN) z czterema cementami, referencyjnym – CEM I 42,5 R, oraz cementami z dodatkami mineralnymi CEM II/A-V, CEM II/B-S i CEM III/A. Wybrane cementy wykonano na bazie tego samego klinkieru portlandzkiego, stąd kwestia kompatybilności z domieszkami napowietrzającymi nie wynikała ze zmian jakościowych składu fazowego klinkieru, a jedynie zmian ilościowych, rozmielenia i rodzaju stosowanego dodatku mineralnego. Stosowane cementy stanowiły produkty handlowe o deklarowanych właściwościach przedstawionych w Tabelicy 1.

Tabelica 1. Właściwości cementów

	CEM I 42,5 R	CEM II/A-V 42,5 R	CEM II/B-S 42,5 N	CEM III/A 42,5N
Wytrzymałość i właściwości fizyczne				
Wytrzymałość na ściskanie 28 dni [MPa]	56,6	57,1	56,2	52,3
Początek wiązania [min.]	185	192	212	246
Powierzchnia właściwa (Blaine'a) [cm ² /g]	4238	4528	4692	4484
Skład chemiczny				
Strata prażenia [%]	2,63	-	-	0,81
Części nierozpuszczalne [%]	0,81	-	-	0,43
SO ₃ [%]	3,27	3,26	2,91	2,63
Na ₂ O _{eq} [%]	0,74	-	0,57	0,53

Recepturę betonu opracowano na podstawie rozwiązań materiałowych wykonawców i zastosowano w przypadku betonu referencyjnego z cementem CEM I. Zaprojektowano beton klasy C35/45 o uziarnieniu kruszywa grubego do 8 mm (Rys. 1), klasie konsystencji S1 i projektowanej zawartości powietrza 5-7%. W betonie zastosowano piasek kwarcowy 0-2 mm i grys amfibolitowy w dwóch frakcjach 2-5 i 5-8 mm. Skumulowana krzywa uziarnienia charakteryzowała się 7% udziałem nadziarna.

Do przygotowania mieszanki betonowej wykorzystano mieszalnik Zyklos ZK 50 HE firmy PEMAT o pojemności 50l. Składniki dodawano w następującej kolejności: kruszywo grube, kruszywo drobne oraz połowa wody zarobowej. Wymieszane kruszywa namaczano przez 5 minut w zamkniętym mieszalniku. Następnie dodano cement i pozostałą wodę zarobową. Przemieszano 15 sekund po czym dolano domieszki w kolejności: napowietrzacz, plastyfikator. Całkowity czas homogenizacji mieszanki wyniósł 2 minuty. Po tym czasie pobrano próbki do badań (oznaczenie: 5). Pozostałą część mieszanki pozostawiono



Rys. 1. Krzywa uziarnienia betonu przeznaczonego na nawierzchnię (linie przerywane – krzywe graniczne [8])

w bezruchu do 60 minuty od zarobienia cementu z wodą, po którym pobrano kolejną serię próbek (oznaczenie: 60). Następnie mieszankę dodatkowo wymieszano przez 2 minuty i pobrano ostatnią serię próbek (oznaczenie: 60M).

Wyjściowa receptura betonu zakładała 420 kg/m³ cementu i zawartość powietrza w mieszance 5,5%. Receptury przedstawione Tablicy 2 zostały przeliczone do jednostki objętości po określeniu rzeczywistej zawartości powietrza mierzonej metodą ciśnieniową bezpośrednio po wykonaniu mieszanki. Właściwości mieszanki przedstawia Tablica 4.

Tablica 2. Receptury betonu górnej warstwy nawierzchni

Składnik	Pochodzenie	Oznaczenie betonu			
		P	V	S	H
CEM I 42,5R	Ożarów	416	-	-	-
CEM II/A-V 42,5 R	Ożarów		415	-	-
CEM II/B-S 42,5 N	Ożarów	-	-	414	-
CEM III/A 42,5N	Ożarów	-	-	-	417
Woda	-	150	149	149	150
Piasek 0-2 mm	Pawłów	598	593	590	595
Grys 2-5 mm	Ogorzelec	310	307	305	308
Grys 5-8 mm	Ogorzelec	910	903	898	907
Primo LM-131	ATLAS	3,12	2,90	3,10	3,13
Fortiair OS-300	ATLAS	2,23	2,69	5,38	5,01

2.2. Program badań

Głównym założeniem programu badawczego było określenie zmian cech fizycznych pęcherzyków powietrza w napowietrzonych mieszankach betonowych w przedziale czasowym wynoszącym 1h. Po wyznaczonym czasie nastąpiło ponowne mieszanie składników z dużą intensywnością i ponowne pomiary i pobieranie próbek. Badania betonu wykonano zgodnie z harmonogramem przedstawionym w Tablicy 3.

Tablica 3. Harmonogram badań mieszanek betonowych (+ wykonano, – brak)

	5 min. po mieszanii składników	Po 60 min bezruchu	Po 60 min bezruchu i dodatkowym mieszanii
Oznaczenie	5	60	60M
Zawartość powietrza	+	-	+
Konsystencja – opad stożka	+	-	+
Gęstość	+	-	+
Pobranie próbek – charakterystyka porów	+	+	+
Pozostałe próbki	+	-	+

2.3. Metody badawcze

Badania mieszanki betonowej

Charakterystykę mieszanki betonowej wykonano określając konsystencję mieszanki metodą opadu stożka [16], zawartość powietrza metodą ciśnieniową [17] oraz gęstość [18].

Właściwości mechaniczne

Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3 [19]. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przeprowadzono zgodnie z PN-EN 12390-6 [20] Badania przeprowadzono na trzech próbkach sześciennych 150 mm dla każdej serii pobrań i betonu po 28 dniach dojrzewania.

Charakterystyka porów w stwardniałym betonie

Pomiar dystrybucji porów powietrznych wykonano zgodnie z normą PN-EN 480-11:2008 [21]. Pomiary cięciw porów powietrznych wykonano za pomocą komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu. Użyto mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ800, kamery cyfrowej QICAM Fast 1394 (1 pixel – 1,54 μm); stolika skaningowego Marzhäuser SCAN 150x150; oprogramowania Image Pro Plus 7.0. Badanie wykonano na dwóch próbkach z każdej serii pobrań i rodzaju betonu, wyciętych z próbek sześciennych 100 mm, tak aby łączna długość linii trawersującej na powierzchni próbki była większa niż 1200 mm. Linia trasującą naniesiono równomiernie na cały przekrój próbki. Wyznaczono całkowitą zawartość powietrza (A), powierzchnię właściwą porów (α), wskaźnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) i zawartość mikroporów (A_{300}).

Rezystywność betonu

Przy pomiarach wykorzystywana jest zdolność cieczy porowej betonu do przewodzenia prądu elektrycznego. Opór właściwy betonu może być opisany jako zdolność do ograni-

czania przenoszenia ładunków elektrycznych przez jony zawarte w cieczy porowej betonu pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. W tym kontekście pomiar rezystywności można wykorzystać do oceny wielkości i stopnia wzajemnego połączenia układu porów [22]. Wyznaczono doświadczalnie zależności łączące rezystywność z współczynnikiem migracji jonów chlorkowych, absorpcją wody i szybkością korozji stalowych prętów zbrojeniowych w betonie. Pomiary rezystywności elektrycznej przeprowadzono za pomocą urządzenia Giatec RCON2 dla częstotliwości 1 kHz. Walcową próbkę betonu ($\Phi=100\text{mm}$ i $h=120\text{ mm}$) umieszczono pomiędzy dwiema równoległymi płytkami urządzenia (elektrody) połączonymi ze źródłem prądu przemiennego. Na podstawie zmierzonego spadku potencjału pomiędzy dwiema elektrodami oraz wprowadzonych wymiarów badanej próbki urządzenie oblicza rezystywność betonu. Rezystywność betonu stanowi średnią z pomiarów trzech próbek bezpośrednio po wyjęciu z wody i wysuszeniu powierzchniowym ręcznikami papierowymi po 28 dniach dojrzewania. Możliwe jest odniesienie wyników do kategorii przepuszczalności jonów chlorkowych:

- wysoka przepuszczalność: $<12\text{ k}\Omega\text{cm}$,
- umiarkowana przepuszczalność: $12\text{-}21\text{ k}\Omega\text{cm}$,
- niska przepuszczalność: $21\text{-}37\text{ k}\Omega\text{cm}$,
- bardzo niska przepuszczalność: $37\text{-}254\text{ k}\Omega\text{cm}$,
- pomijalna przepuszczalność: $>254\text{ k}\Omega\text{cm}$.

Absorpcja wody

Określenie współczynnika absorpcji wody (I) w stwardniałym betonie przeprowadzono metodą bazującą na metodzie zaczerpniętej z normy ASTM C1585-1 [23]. Po dwie próbki badawcze o wymiarach $\Phi=100\text{ mm}$ i wysokości 50 mm wycięto z walców $\Phi=100\text{ mm}$ i $h=120\text{ mm}$ po 28 dniach dojrzewania. Zmiany w procedurze dotyczyły kondycjonowania próbek przed badaniem. Wycięte próbki wysuszono do stałej masy (zmiana nie większa niż $0,1\%$ między pomiarami odbywającymi się co 24h) w temperaturze 50°C . Na podstawie zmiany masy próbek w funkcji czasu wywołanej zanurzeniem badanej powierzchni próbki w wodzie wyznaczono współczynnik początkowej szybkości absorpcji (S_1) oraz wtórnej szybkości absorpcji wody (S_2).

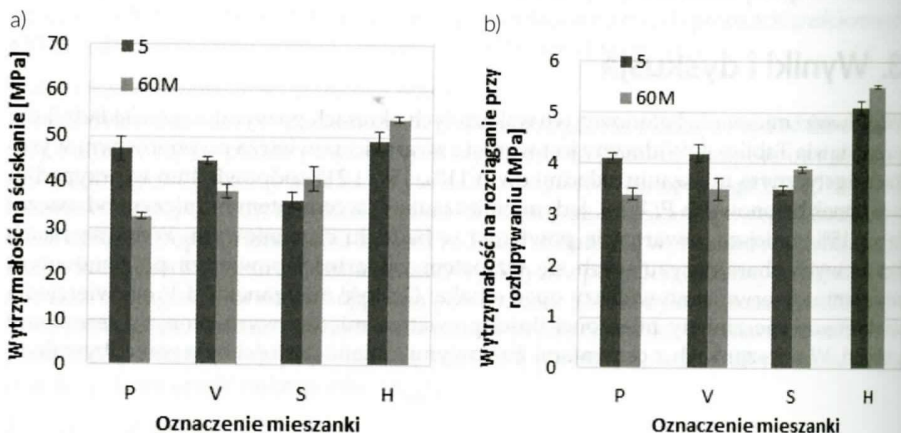
3. Wyniki i dyskusja

Właściwości mieszanki betonowej we wskazanych okresach po wymieszaniu składników przedstawia Tablica 4. Widoczny jest wzrost zawartości powietrza po ponownym wysokoenergetycznym mieszaniu składników o 11% , 15% i 21% odpowiednio w przypadku mieszanek betonowych P , V i S . Jedynie mieszanka H z cementem hutniczym odznaczała się 15% mniejszą zawartością powietrza w badaniu ciśnieniowym. W mieszankach betonowych charakteryzujących się wzrostem zawartości powietrza po ponownym mieszaniu obserwowano większy opad stożka. Gęstość mieszanek P i V odzwierciedla zaobserwowane zmiany mierzonej ilości powietrza między wyróżnionymi terminami pobrań. W mieszankach z cementami żuźłowymi zmiana gęstości była zaniedbywalna.

Tablica 4. Właściwości mieszanki betonowej

	Zawartość powietrza [%]	Opad stożka [mm]	Gęstość [kg/m ³]
P-5	6,5	10	2280
P-60M	7,2	20	2170
V-5	6,8	20	2280
V-60M	7,8	30	2200
S-5	7,0	20	2200
S-60M	8,5	40	2210
H-5	6,1	10	2280
H-60M	5,2	10	2300

Właściwości mechaniczne betonu po 28 dniach dojrzewania pobranego po 5 minutach i 60 minutach wraz z dodatkowym mieszaniem przedstawia Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu oznaczonego *P*, *V* i *H* pobranych po pierwszym mieszaniu zawiera się w granicach 45-49 MPa. Znacząco odbiega beton z cementem CEM II/B-S 42,5N (oznaczony *S*), którego wytrzymałość na ściskanie jest ponad 20% mniejsza (36 MPa) i nie spełnia wymagań projektowanej klasy wytrzymałości C35/45. Zbliżona tendencja jest widoczna w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, jednakże wszystkie betony spełniają minimalne wymagania stawiane w WWiORB [8]. Stwierdzono o 25% większą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w betonie z największą ilością dodatku żużla w cemencie (oznaczenie *H*), co stanowi odmienną obserwację niż powszechnie prezentowana w literaturze [24], [25]. Widoczne jest wyraźne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu po dodatkowym mieszaniu w przypadku betonu *P* i *V*, wynoszące 45% i 20%, odpowiednio w przypadku wytrzymałości na ściskanie i rozłupywanie betonu *P* oraz po 20% w przypadku betonu *V*. Do-



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie (a) i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (b) betonu dojrzewającego 28 dni pobranego po 5 minutach (5) oraz po 60 minutach z dodatkowym mieszaniem (60M)

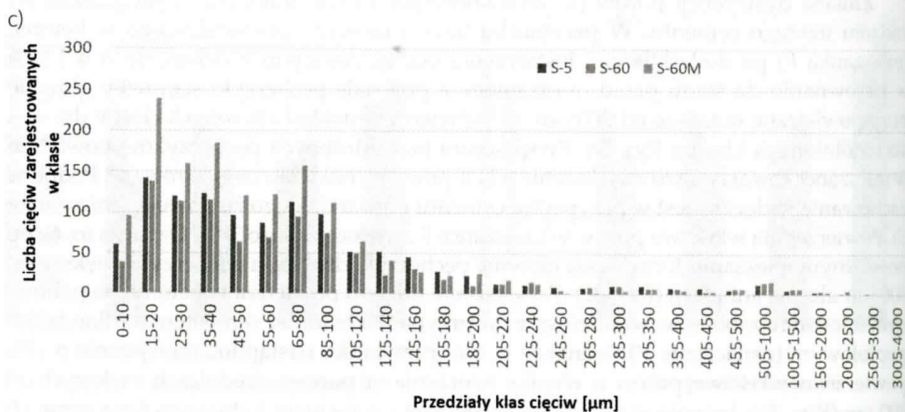
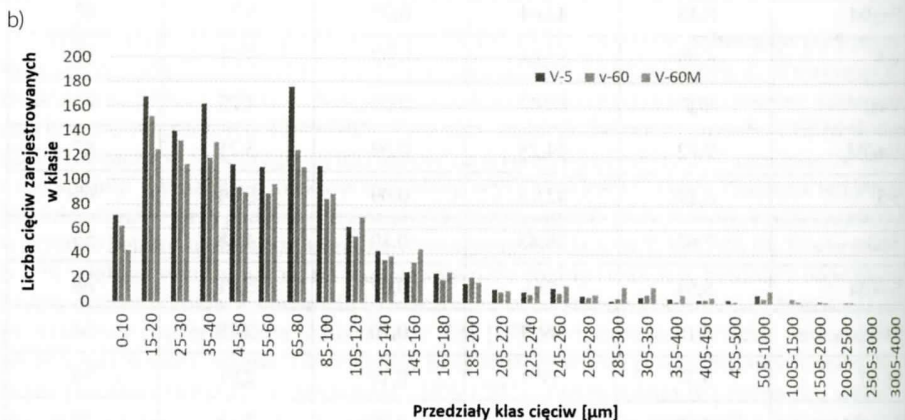
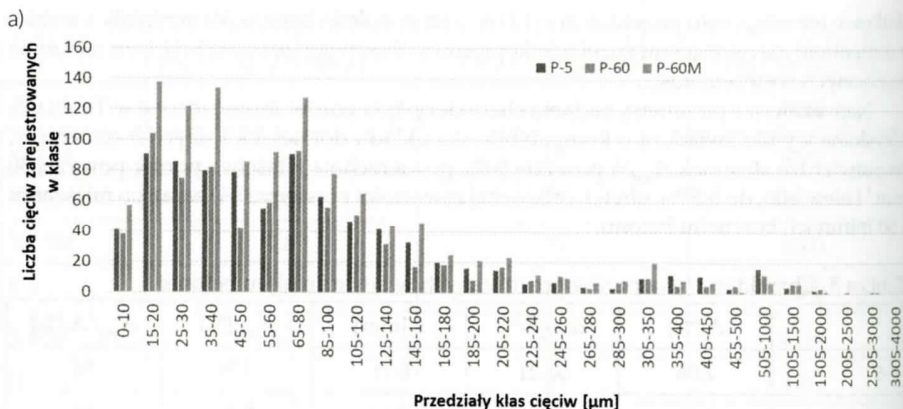
datkowo nie osiągnięto projektowanej klasy wytrzymałości betonu. W przypadku betonu z cementami zawierającymi żużel wielkopiecowy obserwuje się około 8-12% zwiększenie mierzonych wytrzymałości.

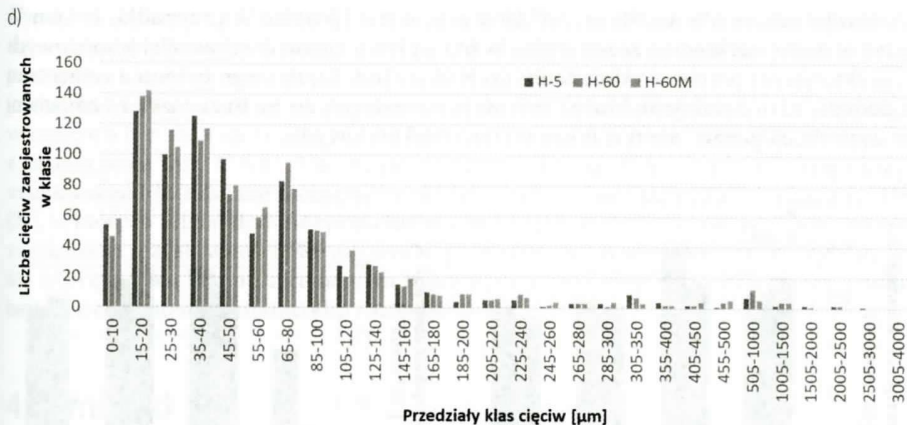
Najważniejsze parametry badania charakterystyki porów zamieszczono w Tablicy 5. Uzyskane wyniki świadczą o kompatybilności układu domieszek i użytych cementów, co potwierdza stosunek A_{300}/A powyżej 50%, powierzchnia właściwa porów powyżej 30 mm^{-1} i niewielki, do 0,55%, ubytek całkowitej zawartości powietrza (A) zaraz po mieszanii i 60 minutach bezruchu betonu.

Tablica 5. Charakterystyka porów powietrznych w stwardniałym betonie

	A [%]	α [mm^{-1}]	\bar{L} [mm]	A_{300} [%]	A_{300}/A [%]
P-5	7,06	37,21	0,11	3,79	54
P-60	6,86	35,15	0,12	3,46	50
P-60M	8,43	42,64	0,08	5,02	60
V-5	6,99	57,68	0,07	5,74	82
V-60	6,7	50,37	0,09	4,73	71
V-60M	7,72	44,25	0,09	5,21	67
S-5	8,17	42,14	0,09	5,34	65
S-60	7,62	38,43	0,10	4,18	55
S-60M	8,54	53,1	0,07	5,81	68
H-5	5,18	49,5	0,10	2,78	54
H-60	5,37	47,9	0,10	2,91	54
H-60M	4,68	56,18	0,09	3,28	70

Zmiana dystrybucji porów po wysokoenergetycznym mieszanii była zależna od rodzaju użytego cementu. W przypadku użycia cementu portlandzkiego w betonie (mieszanka P) po dodatkowym dostarczeniu energii nastąpiło zwiększenie A o 1,57% w porównaniu do stanu przed mieszanii, a powstałe pęcherzyki stanowiły głównie pory powietrzne mniejsze od 300 μm , co potwierdza rozkład zliczonych cięciw dla wyszczególnionych klas na Rys. 3a. Zwiększeniu ilości drobnych pęcherzyków powietrza w mieszance towarzyszyło zwiększenie o 21% powierzchni właściwej porów (α). Podobne zachowanie widoczne jest w przypadku cementu portlandzkiego żużlowego (mieszanka S). Powierzchnia właściwa porów w mieszance S zwiększyła się o 38%. Oznacza to, że po powtórnym mieszanii formują się głównie pęcherzyki drobne, a pęcherzyki większe od 300 μm ulegają anihilacji (Rys. 3c). Zwiększenie udziału powietrza w betonie po ponownym mieszanii zaobserwowano również w przypadku betonu z cementem portlandzkim popiołowym (oznaczenie V). Jednakże w tym przypadku nastąpiło zmniejszenie o 12% powierzchni właściwej porów w wyniku tworzenia się porów o średnicach większych od 300 μm (Rys. 3b). Jedynie w mieszance betonowej z cementem hutniczym (znaczenie H) zaobserwowano zmniejszenie całkowitej zawartości powietrza po ponownym mieszanii z 5,37% do 4,68% oraz jednocześnie niewielkie zwiększenie udziału A_{300} z 2,91% do 3,28%.



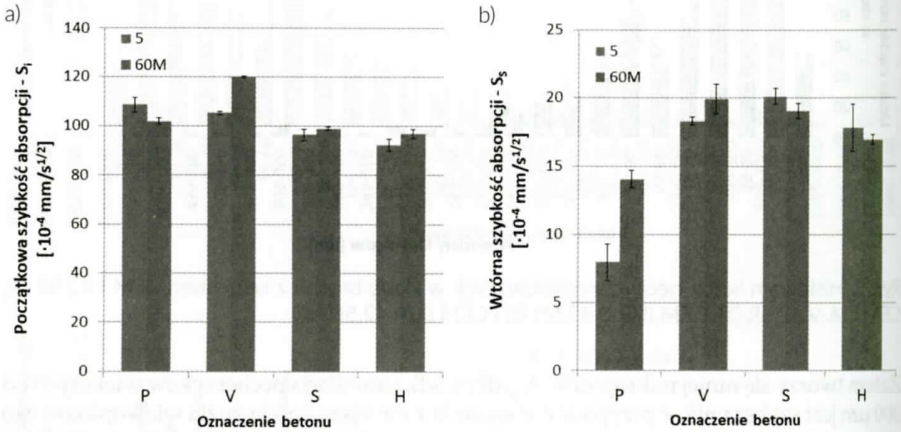


Rys. 3. Histogram liczby cięćw zarejestrowanych w klasie betonu z cementem CEM I 42,5R (a), CEM II/A-V 42,5R (b), CEM II/B-S 42,5N (c) i CEM III/A 42,5N (d)

Zatem tworzy się mniej mikroporów A_{300} (Rys. 3d), a anihilacja pęcherzyków większych od $300 \mu\text{m}$ jest szybsza niż w przypadku mieszanki z mniejszą ilością żużla wielkopieczowego (oznaczenie S). Obserwowany jest w takim przypadku wzrost powierzchni właściwej porów o 17%. W badaniach Giergiczego i innych [26], w których badano te same typy cementów żużlowych, stwierdzono mniejszą powierzchnię właściwą porów gdy w mieszankach betonowych o konsystencji S3 stosowany był cement z żużlem wielkopieczowym, a badanie wykonano na próbkach pobranych jedynie po wykonaniu mieszanki. Nie bez znaczenia na uzyskaną powierzchnię właściwą porów miała znacznie mniejsza zawartość powietrza (3,6% i 3,2% odpowiednio w betonie z CEM II/B-S i CEM III/A) niż w betonie z cementem CEM I (6,8%).

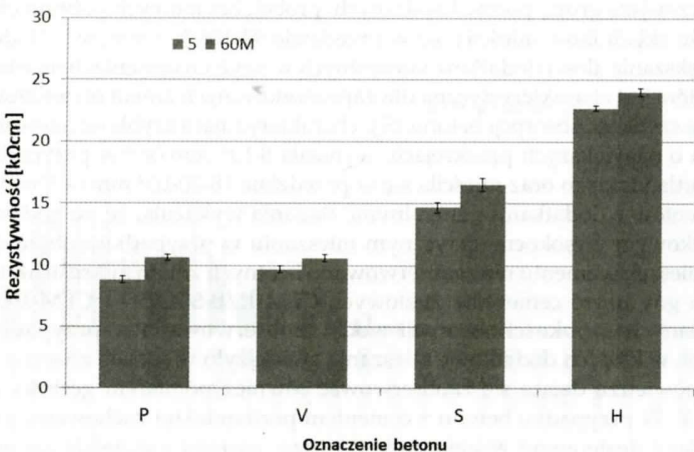
Uzyskane wyniki początkowej i wtórnej szybkości absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego przedstawia Rys. 4. Początkowa szybkość absorpcji (S_i), charakteryzująca najliczniejszą grupę porów kapilarnych, próbek betonowych pobranych zaraz po wymieszaniu składników mieściła się w przedziale $92-108 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$. Widoczny jest wpływ zwiększania ilości dodatków mineralnych w użytych cementach na zmniejszenie S_i betonu, która jest charakterystyczna dla zaproponowanych zmian materiałowych [27], [28]. Wtórna szybkość absorpcji (S_s), charakteryzująca szybkość nasycania porów kapilarnych o największych przekrojach, wynosiła $8 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ w przypadku użycia cementu portlandzkiego oraz mieściła się w przedziale $18-20 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}^{1/2}$ w przypadku użycia cementów z dodatkami mineralnymi. Badania wykazują, że po godzinie bezruchu i dodatkowym wysokoenergetycznym mieszanemu w przypadku dobrze dobranego układu domieszek i cementu nie zaobserwowano istotnych zmian mikrostruktury porów kapilarnych gdy użyto cementów żużlowych CEM II/B-S 42,5N i CEM III/A 42,5N. Istotne zmiany w szybkości absorpcji wody zaobserwowano w przypadku betonu z cementami, w których dodatkowe mieszanie zwiększyło w sposób znaczny całkowitą zawartość powietrza dającą się zaobserwować również pomiarem gęstości mieszanki – beton P i V. W przypadku betonu z cementem portlandzkim zachowanie jest zgodne z obserwacjami dostępnymi w literaturze [29], tzn. nastąpił niewielkie zmniejszenie S_i i zwiększenie S_s o 80%. Natomiast w przypadku betonu z cementem CEM II/A-V 42,5R sytuacja jest odmienna, gdyż nastąpiło 10% zwiększenie S_p i nieznaczne zwiększenie S_s .

Ciężko jednoznacznie wytłumaczyć zaobserwowane zjawisko w przypadku betonu V, gdyż w dostępnej literaturze nie analizowano wpływu zmian ilościowych i jakościowych charakterystyki porów w odniesieniu do podciągania kapilarnego betonu z cementami z dodatkami mineralnymi. Można jedynie przypuszczać, że ma to związek ze zmianami w dystrybucji porów, nie tyle ilościowymi, co jakościowymi.



Rys. 4. Początkowa (a) i wtórna (b) szybkość absorpcji betonu po 28 dniach dojrzewania pobranego po 5 minutach (5) oraz po 60 minutach z dodatkowym mieszaniną (60M)

Wyniki pomiarów rezystywności przedstawia Rys. 5. Rezystywność wzrasta wraz ze zmniejszającą się objętością porów w nasączonym wodą betonie. Zakładając zbliżony poziom nasycenia próbek walcowych betonu po 28 dniach dojrzewania w wodzie oceniono porowatość całkowitą, na którą składała się suma objętości porowatości kapilarnej i powstałej w skutek stosowania domieszki napowietrzającej. Z przeprowadzonych badań



Rys. 5. Rezystywność betonu po 28 dniach dojrzewania pobranego po wymieszaniu składników (5) i po dodatkowym mieszaniną (60M)

wynika, że beton z CEM I 42,5R i CEM II/A-V 42,5R (oznaczenie P i V) charakteryzują się wysoką przepuszczalnością, z CEM II/B-S 42,5N (oznaczenie S) umiarkowaną przepuszczalnością, a z cementem CEM III/A 42,5N (oznaczenie H) niską przepuszczalnością jonów chlorkowych. Zatem rezystywność zwiększała się wraz z ilością dodatku użytego w cementach z żużlem wielkopieczowym, zgodnie innymi badaniami [30], co wynika z zagęszczenia fazy C-S-H. Natomiast w przypadku dodatku popiołu lotnego krzemionkowego (do 20%) nie zaobserwowano istotnych zmian, mimo, że w badaniach [31], [32], w których udział dodatku popiołowego był większy niż 20% zawsze obserwowano zwiększenie rezystywności. Rezystywność po dodatkowym mieszanii zwiększyła się od 6% w przypadku betonu z cementem hutniczym (oznaczenie S) do 20% w przypadku betonu z cementem portlandzkim (oznaczenie P).

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że każdy z badanych cementów ma odmienny wpływ na charakterystykę porów powietrznych pochodzących od napowietrzenia. Badania na zglądach betonowych próbek pobranych w trzech terminach: po zmieszaniu składników, godzinie bezruchu i godzinie bezruchu z dodatkowym wysokoenergetycznym mieszanii pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- Nie zaobserwowano bardzo istotnej ucieczki powietrza (>0,55%) w mieszanice betonowej przez 60 min bezruchu od wymieszania składników.
- Największe różnice między pomiarami metodą ciśnieniową mieszaniki betonowej, a mierzona na zglądach betonowych wynosiła 1,2%, co stanowiło 15-17% mierzonej wielkości.
- Wysokoenergetyczne mieszanii zwiększyło całkowitą zawartość powietrza o 1,57%, 1,02% i 0,92% odpowiednio w betonie z cementami CEM I 42,5R, CEM II/A-V 42,5R i CEM II/B-S 42,5N. Wyjątek stanowił beton z cementem CEM III/A 42,5N, w którym zmierzono mniejszą o 0,69% całkowitą zawartość powietrza.
- W betonie z cementami CEM I 42,5R, CEM II/B-S 42,5N i CEM III/A 42,5N dodatkowemu mieszanii towarzyszyło zwiększenie powierzchni właściwej o odpowiednio 21%, 38% i 17%, świadczące o powstawaniu mikroporów – A_{300} bądź zmniejszaniu objętości porów większych od 300 μm , szczególnie widoczne w betonie z cementem CEM III/A 42,5N. Wyjątek stanowił beton z cementem CEM II/A-V 42,5R, w którym zaobserwowano 12% zmniejszenie powierzchni właściwej porów.
- Po powtórnym mieszanii obserwuje się zwiększenie rezystywności betonu o 20%, 9%, 13% i 6%, w porównaniu do próbek pobranych zaraz po wymierzaniu składników, odpowiednio w przypadku użycia cementu CEM I 42,5R, CEM II/A-V 42,5R, CEM II/B-S 42,5N i CEM III/A 42,5N.
- Zmiana całkowitej zawartości powietrza w próbach pobranych po dodatkowym mieszanii w porównaniu do próbek pobranych od razu po wymieszaniu powoduje zmniejszenie początkowej szybkości absorpcji wody i zwiększenie o 80% wtórnej szybkości absorpcji w betonie z cementu CEM I 42,5R. W próbkach betonu z CEM II/A-V 42,5R obserwuje się 10% zwiększenie początkowej szybkości absorpcji, a moment pobrania nie wpływa na szybkość podciągania kapilarnego betonu z cementami żużłowymi (zbyt mała zmiana zawartości powietrza po powtórnym mieszanii)
- Powtórne mieszanii zwiększyło wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozluźnianiu o 8-12% w przypadku użycia cementów żużłowych, natomiast zmniejszyło

wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu odpowiednio o 45% i 20% w przypadku użycia cementu CEM I 42,5R. Mierzone wytrzymałości w przypadku użycia cementu CEM II/A-V 42,5R zmniejszyły się o około 20%.

Literatura

- [1] M.A. Glinicki, Właściwości betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym – wpływ rodzaju cementu i pielęgnacji, *Drogownictwo*, LXXIV, 4, 2019, 99-104
- [2] K. Dziedzic, M. Dąbrowski, A. Antolik, A. Glinicki, Charakterystyka napowietrzenia mieszanki betonowej metodą sekwencyjno-ciśnieniową, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 19, 2020, 107 – 118
- [3] J. Gołaszewski, Domieszki do betonu. Efekt działania, ocena i badania efektywności, stosowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016
- [4] M.A. Glinicki, *Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych*, PWN, Warszawa 2019
- [5] D.S. Zhang, Air entrainment in fresh concrete with PFA. *Cement and Concrete Composite* 18, 6, 1996, 905-920
- [6] P.C. Aitcin, R.J. Flatt, *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Elsevier 2018
- [7] M. Pigeon, P. Plante, M. Plante, Air voids stability, part.1 Influence of silica fume and other parameters, *ACI Material Journal*, 86, 1989, 482-490
- [8] Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych D-05.03.04 v2 Nawierzchnia z betonu cementowego, GDDKiA, Warszawa 2019
- [9] J. Hu, M.S. Siddiqui, D.W. Fowles, D. Whitney, Two-Lift Concrete Paving – Case Studies and Reviews from Sustainability, Cost Effectiveness and Construction Perspectives, TRB 2014 Annual Meeting, 15 p.
- [10] S. Pranav, S. Aggarwal, E.H. Yang, A.K., Sarkar, A.P. Singh, M. Lahoti, Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review, *Construction and Building Materials* 236, 2020, 11760
- [11] A. Rudy, J. Olek, T. Nantung, R. M. Newell, Statistical optimization of low slump ternary concrete mixtures with ground granulated blast furnace slag (GGBS) and high calcium fly ash for pavement applications, *Brittle Matrix Composites-9*, edited by A.M. Brandt, J. Olek, I.H. Marshall, Woodhead Publ. & IFTR PAS, Warsaw, 2009, 149-159
- [12] T. Van Dam, P. Taylor, G. Fick, D. Gress, M. Van Geem, E. Lorenz, *Sustainable concrete pavements: a manual of practice*, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University 2011
- [13] T. Rudnicki, R. Jurczak, Recycling of a concrete pavement after over 80 years in service, *Materials* 13, 2020, 2262
- [14] H.S. Wong, A.M. Pappas, R.W. Zimmerman, N.R. Buenfeld, Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete, *Cement and Concrete Research* 41, 2011, 1067–1077.
- [15] Z. Liu, Frost deterioration in concrete due to deicing salt exposure: Mechanism, mitigation and conceptual surface scaling model, PhD dissertation, University of Michigan 2014
- [16] PN-EN 12350-2:2019 Badanie mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [17] PN-EN 12350-7:2019 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe
- [18] PN-EN 12390-6:2019 Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość
- [19] PN-EN 12390-3:2019 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [20] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [21] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [22] AASHTO TP95-11, Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 2011
- [23] ASTM C1585-13 Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes
- [24] K.G. Babu, V.S.R. Kumar, Efficiency of GGBS in concrete, *Cement and Concrete Research* 30, 2000, 1031–1036
- [25] S.J. Barnett, M.N. Soutsos, S.G. Millard, J.H. Bungey, Strength development of mortars containing ground granulated blast furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies, *Cement and Concrete Research* 36, 2006, 434 – 440
- [26] Z. Giergiczny, M.A. Glinicki, M. Sokołowski, M. Zieliński, Air void system and frost salt scaling of concrete containing slag blended cement, *Construction and Building Materials*, 23, 2009, 2451-2456

- [27] S. Ioannou, K. Paine, L. Reig, K. Quillin, Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate–anhydrite–fly ash cement, *Cement and Concrete Composites* 55, 2015, 196–204
- [28] P. Nath, P. Sarker, Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete, *Procedia Engineering* 14, 2011, 1149–1156
- [29] M. Dąbrowski, K. Dziedzic, A. Antolik, M.A. Glinicki, Influence of the air voids distribution in concrete on the rate of water absorption, *Brittle Matrix Composites-12*, edited by M.A. Glinicki, D. Józwiak-Niedźwiedzka, C.K.Y. Leung, J. Olek, IPPT PAN, Warsaw, 2019, 147-158
- [30] A.A. Shubbar, H.Jafer, A. Dulaimi, K. Hashim, W. Atherton, M. Sadique, The development of a low carbon binder produced from the ternary blending of cement, ground granulated blast furnace slag and high calcium fly ash: An experimental and statistical approach, *Construction and Building Materials* 187, 2018, 1051-1060
- [31] O. Sengul, Use of electrical resistivity as an indicator for durability, *Construction and Building Materials* 73, 2014, 434-441
- [32] H. Yildirim, T. Ilica, O. Sengul, Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration, *Construction and Building Materials* 25, 2011, 1282-1288

MONOGRAFIE TECHNOLOGII BETONU

XI KONFERENCJA

DNI

BETONU

TRADYCJA I NOWOCZESNOŚĆ

Wista • 11-13 października 2021

ISBN: 978-83-61331-41-4



Stowarzyszenie Producentów Cementu
ul. Lubelska 29, 30-003 Kraków
tel.: +48 12 423 33 55
e-mail: wydawnictwo@polskicement.pl
www.polskicement.pl • www.dnibetonu.com