

Alternatywne metody określenia właściwej jakościowo ilości powietrza w betonie

1. Wstęp

Trwałość mrozowa betonu jest zależna od wielu czynników materiałowych i technologicznych, ale jest determinowana głównie poprzez właściwe napowietrzenie betonu, oczywiście przy założeniu zachowania podstawowych założeń w kwestii jakości użytych surowców, poziomu wskaźnika wodno-cementowego oraz procesów wykonania i pielęgnacji betonu.

Zdaniem Powersa [1] w temperaturze -12°C zamarza już 80% wody kapilarnej. Zamarzająca woda zwiększa swoją objętość o około 9%, powodując wzrost naprężeń w mikrostrukturze, z kolei topnienie lodu powoduje skurcz zaczynu. Kolejne cykle zamrażania i odmrażania powodują zmianę naprężeń, doprowadzając skutecznie do zniszczenia osłabionej matrycy. Pęcznienie i skurcz zamrażanego i odmrażanego zaczynu obrazuje rysunek 1. W celu zapewnienia mrozoodporności zaczynowi, należy umożliwić wodzie przepływ i maksymalnie skrócić drogę jej migracji dla umożliwienia redukcji naprężeń wynikających ze zmiany objętości wody w procesie zamrażania, tj. zapewnić miejsca na jej akumulację, co jest jednoznaczne w wprowadzeniu odpowiedniej jakości i ilości powietrza. Powers wykazał, że nie tylko ilość powietrza, ale jego równomierne rozmieszczenie i odległość między pustkami mają wpływ na mrozoodporność zaczynu. Według niego rozstaw porów powinien wynosić $250\ \mu\text{m}$. Na podstawie maksymalnego rozstawu pustek powietrznych Klieger [5] obliczył, że objętość pustek powietrznych dająca pożądaną wartość to 9%. Wartość ta nie wydaje się być wartością przypadkową, gdyż jest wartością identyczną z wartością zmiany objętości zamarzającej wody.

Złożoność zagadnienia mrozoodporności betonu jest znana od wielu lat i była tematem wielu artykułów i referatów oraz prac badawczych. Właściwym napowietrzeniem betonu, a w zasadzie wpływem różnych czynników kształtujących jego strukturę zajmował się m.in. Zbigniew Rusin, który w swojej monografii [3] wyróżnił ich aż kilkanaście. Poprzez właściwe napowietrzenie rozumieć

należy wprowadzenie do betonu równomiernie rozmieszczonych, drobnych pęcherzyków powietrza, których zadaniem jest kompensowanie naprężeń powstających wskutek zamarzania wody w porach kapilarnych [4].

Mechanizm działania domieszek napowietrzających jest pozornie mało skomplikowany, jako związki powierzchniowo-czynne obniżają napięcie powierzchniowe wody zarobowej, powodując bardziej optymalne zwilżanie ziarn cementu, równocześnie wprowadzając równomiernie rozłożone, drobne pęcherzyki powietrza. Nie jest także tajemnicą, że wprowadzenie dodatkowego powietrza do mieszanki betonowej zwiększa objętość zaczynu, a poprzez stworzenie „łożysk” powoduje obniżenie koniecznej ilości wody zarobowej do uzyskania pożądanej konsystencji.

Przydatność działania domieszki napowietrzającej i jej sprawdzenie podane jest w normie PN-EN 934-2 – tablica 5. Wymagania dotyczące domieszek napowietrzających (przy zachowaniu jednako-wej konsystencji).

Badanie i porównanie skuteczności napowietrzenia z betonem wzorcowym (nienapowietrzonym i niezawierającym żadnych domieszek), zgodnie z powyżej cytowaną normą, nie odzwierciedla sytuacji rzeczywistych, gdzie mamy do czynienia z układami domieszek oraz różnymi konsystencjami.

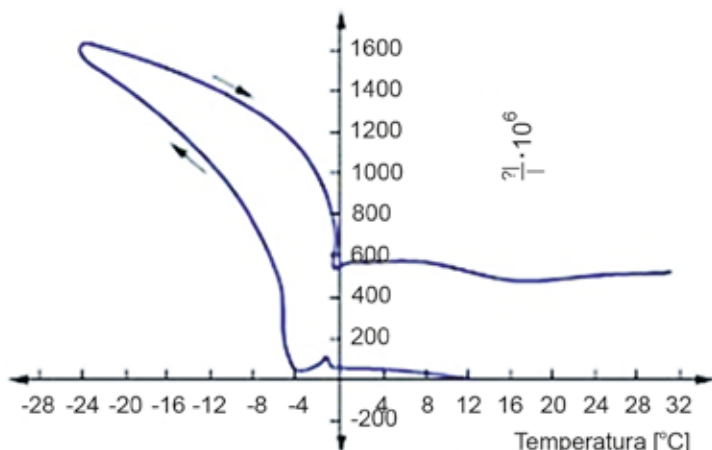
Powszechnie wiadomo, że niektóre kombinacje domieszek uplastyczniających lub upłynniających w połączeniu z domieszkami napowietrzającymi mogą tworzyć bardzo niestabilne układy pustek powietrznych zmieniające się w zależności od zmian stosowanych materiałów wsadowych, procesu produkcji, warunków zewnętrznych czy też w końcu transportu i wbudowania.

Neville [5] wyróżnił 3 podstawowe mechanizmy wpływające na niestabilność i nietrwałość napowietrzenia:

- podczas zagęszczania betonu duże pęcherze powietrza przemieszczają się ku górze na skutek wyporu hydrostatycznego, co jest także potwierdzone prawem Stokesa w powiązaniu z lepkością mieszanki betonowej → zmniejszenie zawartości powietrza
- zapadanie się baniek powietrza w wyniku ciśnienia spowodowanego napięciem powierzchniowym, najmniejsze pory powietrzne, a więc te, od których tak naprawdę zależy mrozoodporność ulegają „rozpuszczeniu”, a bardziej połączony się z wodą wypełniająca pory → zmniejszenie zawartości powietrza w betonie
- agregacja małych pęcherzyków w grupy i tworzenie większych obszarów, a przez to zwiększenie zarówno średnicy, jak i rozstawu porów powietrznych w betonie → zmniejszenie ilości „dobrego” powietrza.

Z reguły, objętość powietrza badanego w mieszance betonowej za pomocą metody ciśnieniowej zawiera powietrze pochodzące od domieszki napowietrzającej i/lub dodatkowe powietrze pocho-

Rys. 1. Pęcznienie i skurcz stwardniałego zaczynu w cyklach zamrażania i odmrażania [2]



dzące od zastosowanych domieszek uplastyczniających/upłynniających jak i powietrze schwyte przypadkowo, a także pory i rakowiny wynikające z niedowibrowania. Wynika z tego, że metoda ta, pomimo swojej pozornej uniwersalności i łatwości wykonywania, niesie za sobą ryzyko niewłaściwej oceny mieszanki, a co za tym idzie wstępnej – błędnej oceny mrozoodporności betonu. Oczywiście można posilkować się metodami badania struktury napowietrzenia mieszanki, jak i stwardniałego betonu, jednak nie są to badania szybkie, proste, popularne i ogólnodostępne.

Czy można zatem w jakiś inny sposób sprawdzić skuteczność napowietrzenia mieszanki betonowej lub betonu przy użyciu metod obliczeniowych i urządzeń dostępnych w każdym laboratorium?

O ile zjawiska „rozpuszczenia” porów w wodzie nie można zidentyfikować i określić prostymi metodami, tak w przypadku dwóch pozostałych mechanizmów można spróbować określić wielkości napowietrzenia na podstawie obliczeń zawartości powietrza, jako funkcji gęstości. Jednak tutaj pojawia się zasadnicze pytanie, która wartość gęstości będzie najbardziej miarodajną, aby na jej podstawie obliczyć faktyczną zawartość powietrza w betonie, a poprzez to oszacować jej wpływ na mrozoodporność.

2. Opis rozpatrywanych metod określenia zawartości powietrza

Obecnie literatura i normy, oprócz wykorzystania procedury AVA, podają trzy metody określenia zawartości powietrza w mieszance betonowej [5]:

metoda ciśnieniowa – najbardziej rozpowszechniona, według normy PN-EN-12350-7 Badanie mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe, polegające na wykorzystaniu prawa Boyle’a-Mariotte’a, czyli zależności między zmianą objętości badanego medium poddanego znanemu przyrostowi ciśnienia; metoda grawimetryczna – polegająca na porównaniu gęstości pozornej mieszanki betonowej zawierającej powietrze, z obliczoną matematycznie gęstością betonu bez powietrza, wynikającą z receptury mieszanki. Zakładając, że gęstości materiałów i skład receptury jest znany, można założyć dokładność tej metody na poziomie +/- 1,0%.

Zgodnie z wzorem zawartość powietrza wyrażona w procentach wynosi:

$$A = 1 - \frac{\rho_a}{\rho} \cdot 100\%$$

gdzie:

ρ_a – gęstość pozorna betonu

ρ – gęstość bez powietrza.

- metoda objętościowa – polegająca na pomiarze różnicy objętości mieszanki betonowej przed usunięciem powietrza (zagęszczeniem) i po tym procesie. Objętość powietrza oblicza się za pomocą pomiaru objętości wody stosowanej do badania (ASTM C-173-10).

Autorzy niniejszego referatu postanowili przeanalizować szerokie spektrum wyników badań prowadzonych w ramach prac badawczych i rozwojowych w laboratoriach Cemex Polska, w celu znalezienia innych sposobów oceny powietrza w betonie i powiązania ich ze zbadaną mrozood-

pornością betonu. Analizowana grupa wyników obejmowała receptury wykonywane dla betonów różnych klas wytrzymałości, klas konsystencji, rodzajów cementów i kruszyw, a także domieszek chemicznych. Punktem stycznym dla wykorzystanych w analizie danych była konieczność zastosowania napowietrzenia mieszanki, wykonanie pomiarów gęstości, badań wytrzymałościowych i w końcu badań mrozoodporności według normy PN-88/B-06250.

Na podstawie wyników badań zawartości powietrza w mieszance betonowej, gęstości mieszanki betonowej i gęstości stwardniałego betonu w różnych fazach dojrzewania, autorzy starali się dociec, czy istnieje korelacja między obliczonymi w sposób pośredni zawartościami powietrza a stratą wytrzymałości po badaniu mrozoodporności według metody zwykłej podanej w normie PN-88 / B-06250. Analizie porównawczej poddano:

- wyniki badań zawartości powietrza określone metodą ciśnieniową,
- zawartość powietrza matematycznie wyliczoną z gęstości stwardniałego betonu dla próbek przed badaniem wytrzymałości na ściskanie,
- zawartość powietrza matematycznie wyliczoną z gęstości stwardniałego betonu dla próbek pielegnowanych do badań trwałościowych.

3. Omówienie wyników badań metod określających zawartość powietrza w betonie

Autorzy podjęli próbę adaptacji klasycznej metody grawimetrycznej dotyczącej mieszanki betonowej do potrzeb oceny zawartości powietrza w stwardniałym betonie. Próba obliczenia zawartości powietrza w betonie stwardniałym na podstawie gęstości wydaje się być stosunkowo prosta, jednak należy brać pod uwagę możliwe odchyłki zaburzające ostateczne wyniki. Jak wiadomo właściwie przyjęta gęstość materiałów wsadowych jest tutaj czynnikiem determinującym kolejne obliczenia. Dodatkowo na wynik końcowy wpływ mogą mieć dokładności związane z procesem formowania, ważenia i określania wymiarów badanych próbek. Kluczem do sprawdzenia poprawności obliczeń było odniesienie uzyskanych wyników do obliczonej „gęstości absolutnej”. Pod pojęciem tym autorzy rozumieją taką gęstość mieszanki, którą by uzyskano, gdyby pozbawić mieszankę całkowicie powietrza – wtedy całą przestrzeń jednostki miary objętości wypełniają materiały składowe receptury (podobnie jak w klasycznej metodzie grawimetrycznej jednakże z wykorzystaniem pomiaru powietrza w mieszance metodą ciśnieniową).

Wartość taką można uzyskać, według poniższego wzoru:

$$\rho_{abs} = \frac{\rho_m}{(1 - p)}$$

gdzie:

ρ_{abs} – gęstość absolutna mieszanki betonowej [kg/m³]

ρ_m – gęstość mieszanki określona w badaniu zawartości powietrza [kg/m³]

p – powietrze zmierzone w mieszance w setnych. Mając tak określoną gęstość absolutną, zawartość powietrza w stwardniałym betonie określa się z różnic gęstości określonej dla badanej próbki i gęstości absolutnej mieszanki.

$$p_{mas} = \frac{\rho_{abs} - \rho_p}{\rho_{abs}} \cdot 100\%$$

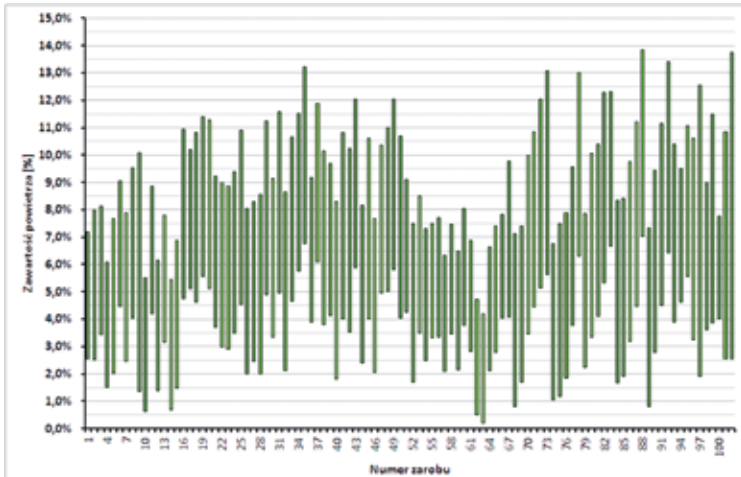
gdzie:

ρ_{abs} – gęstość absolutna mieszanki betonowej [kg/m³]

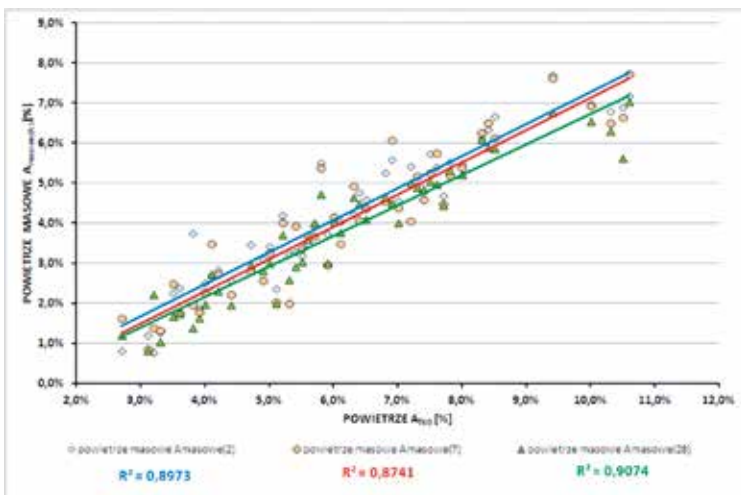
ρ_p – gęstość określona w badaniu próbki betonu stwardniałego [kg/m³]

ρ_{mas} – powietrze masowe próbki w %.

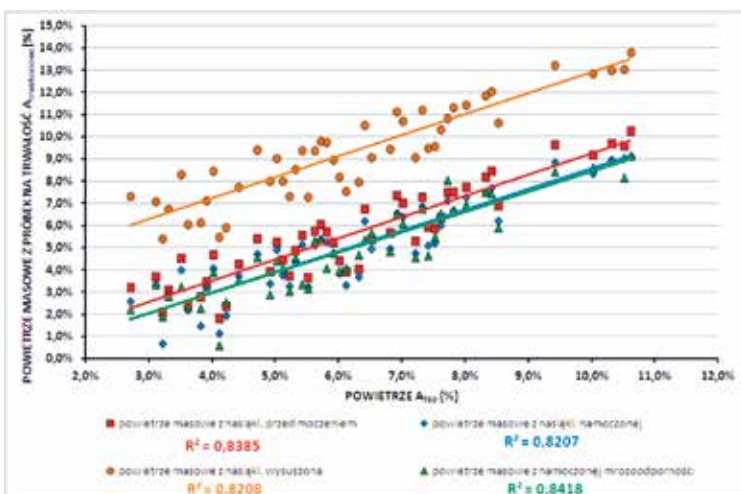
Porównanie wartości zawartości powietrza w betonie określonych różnymi metodami na różnym



Rys. 2. Przedziały zawartości powietrza określone różnymi metodami dla poszczególnych zarobów



Rys. 3. Korelacja między zawartością powietrza A_{T60} a $A_{masowefc}$



Rys. 4. Korelacja między zawartością powietrza A_{T60} a $A_{twardziowe}$

etapie wiązania i twardnienia betonu daje zaskakujące wyniki i znaczne różnice wartości.

Analizie poddano następujące wartości:

- powietrze oznaczone metodą ciśnieniową dla mieszanki betonowej przed rozpoczęciem formowania próbek (T = 60 min)
- powietrze masowe obliczone opisaną powyżej metodą dla próbek do badania wytrzymałości na ściskanie po 2, 7 i 28 dniach pielęgnacji normalnej
- powietrze masowe obliczone opisaną powyżej metodą dla próbek do badania nasiąkliwości (przed rozpoczęciem moczenia, po namoczeniu i po wysuszeniu do stałej masy) oraz mrozoodporności po namoczeniu i przed rozpoczęciem badania.

Rozpiętość uzyskanych wyników badań i obliczeń zawartości powietrza ciśnieniowego i masowego dla próbek z poszczególnych oznaczeń przedstawia rysunek 2.

4. Analiza wyników i dyskusja

Na wstępie rozważań przyjęto założenie, że wartością odniesienia jest zawartość powietrza w mieszance betonowej zmierzona metodą ciśnieniową w momencie formowania próbek do badań wytrzymałościowych i trwałościowych – oznaczona jako A_{T60} . Próbki, na których określono masową zawartość powietrza, podzielono na dwa typy różniące się objętością i sposobem pielęgnacji. I tak, zawartość powietrza masową w próbkach do badań wytrzymałościowych oznaczono jako $A_{masowefc}$, a próbki do badań trwałościowych jako $A_{twardziowe}$. Zależność powietrza masowego ($A_{masowefc}$) z próbek do badań wytrzymałościowych w korelacji do powietrza w mieszance betonowej badanego metodą ciśnieniową (A_{T60}) obrazuje rysunek 3.

Zależność powietrza masowego określonego na podstawie obliczeń gęstości z próbek przeznaczonych do badań trwałościowych obrazuje rysunek 4. Najlepszą korelację uzyskano dla wyników gęstości próbek do badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, przy poziomie zgodności około 91% i dla tych danych przeprowadzono dalszą analizę.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność pomiędzy powietrzem zbadanym metodą ciśnieniową A_{T60} a powietrzem masowym dla próbek wytrzymałości 28-dniowej obliczonym z modyfikowaną metodą grawimetryczną $A_{masowefc}$. Określono również różnicę pomiędzy zawartością powietrza w mieszance A_{T60} a powietrzem masowym z próbek $A_{masowefc(28)}$ (rys. 6).

Można zaobserwować, że w zakresie do 7% powietrza zbadanego metodą ciśnieniową spadek powietrza masowego jest mniej więcej stały na poziomie około 2%. Natomiast po przekroczeniu wartości granicznej przyjętej na poziomie 7% różnica ta wzrasta do poziomu 2,5–3,5%.

Wpływ zawartości powietrza określonego metodą ciśnieniową na trwałość, rozumianą jako mrozoodporność według PN-88/B-06250, można w sposób bardzo czytelny zobrazować przedziałami zawartości powietrza. Na podstawie uzyskanych wyników badań mrozoodporności i w zależności od wartości zakresu (przedziału zawartości powietrza) można wyodrębnić przedziały napowietrzenia mieszanki, które niejako gwarantują zapewnienie

trwałości dla zakładanego stopnia mrozoodporności F150(200).

Z poniższego rysunku (rys. 7) wynika, że z 90% pewnością pozytywne wyniki mrozoodporności można uzyskać dla napowietrzenia mieszanki z przedziału 5,5–6,0%, a wraz ze wzrostem zawartości powietrza wzrasta również pewność uzyskania pozytywnego wyniku badania mrozoodporności, co jest zbieżne z wcześniejszymi badaniami autorów [8].

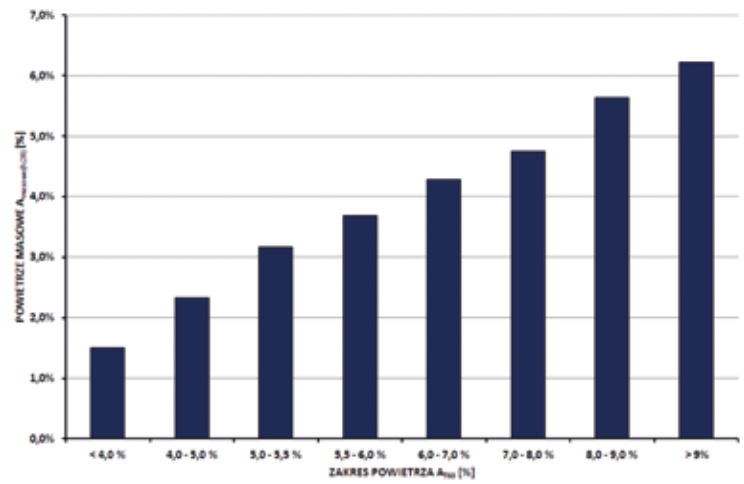
Analizując wpływ powietrza masowego obliczonego zmodyfikowaną metodą grawimetryczną z próbek przeznaczonych do badań wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, można zaobserwować przesunięcie zakresu przedziałów od 1,0 do 2,0%, co jest zgodne z obserwacjami różnic opisanymi na rysunku 6.

Z powyższego rysunku można wywnioskować, że z 95% pewnością pozytywnych wyników mrozoodporności można się spodziewać dla powietrza masowego zawierającego się w przedziale 4,0–5,0%. Analizując powyższe rozważania i dane, można dojść do konkluzji, że najbardziej przystającym do analizy trwałości betonu na podstawie powietrza masowego $A_{masowe(fc28)}$ i ciśnieniowego A_{T60} jest wykres określający pola ufności związane z tymi dwoma parametrami powietrza w funkcji straty wytrzymałości próbek zamrażanych i odmrażanych.

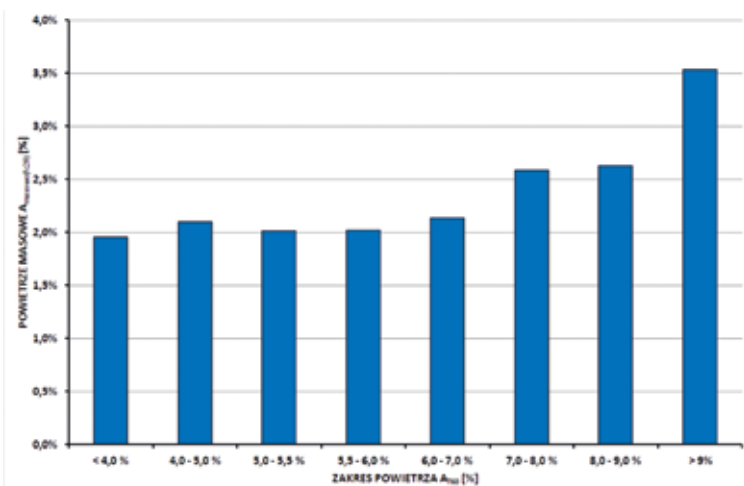
5. Wnioski

Ocena zastosowania alternatywnej metody na obliczenie właściwej jakościowo zawartości powietrza, powinna być weryfikowana przede wszystkim badaniami mrozoodporności. Dysponując możliwie dużą bazą danych, można próbować określić zależności i korelacje oraz szukać prawidłowości analizując pełne spektrum danych, jako tło przyjmując do oceny poprawności wniosków wyniki badań trwałościowych.

Niezależnie od przyjętych do obliczeń zawartości powietrza masowego można stwierdzić, że jego wielkość jest z reguły znacznie niższa niż zawartości uzyskiwane w wyniku pomiaru napowietrzenia w świeżej mieszance betonowej. Zjawisko to po-

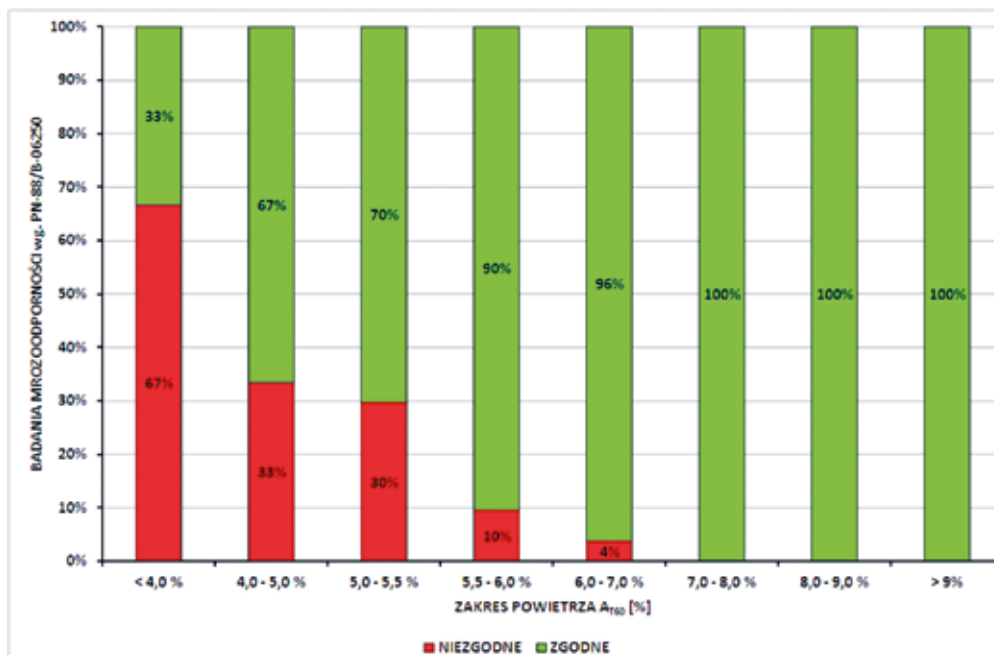


Rys. 5. Zależność w przedziałach zawartości powietrza A_{T60} a powietrzem masowym $A_{masowe(fc28)}$

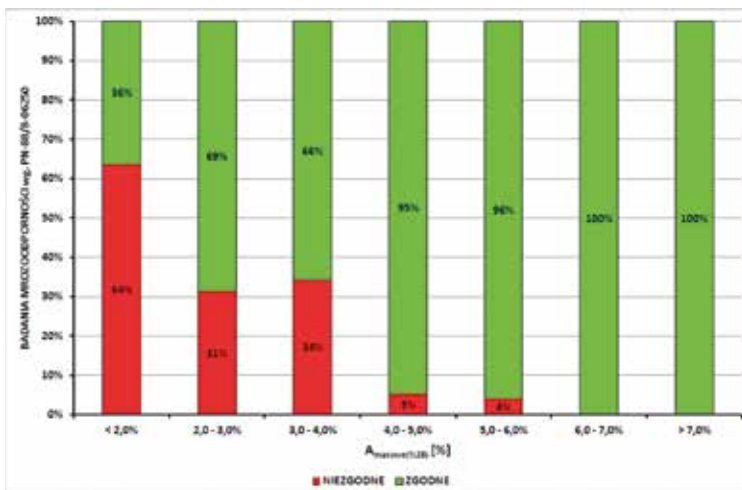


Rys. 6 Spadek zawartości powietrza masowego $A_{masowe(fc28)}$ w przedziałach zawartości powietrza A_{T60}

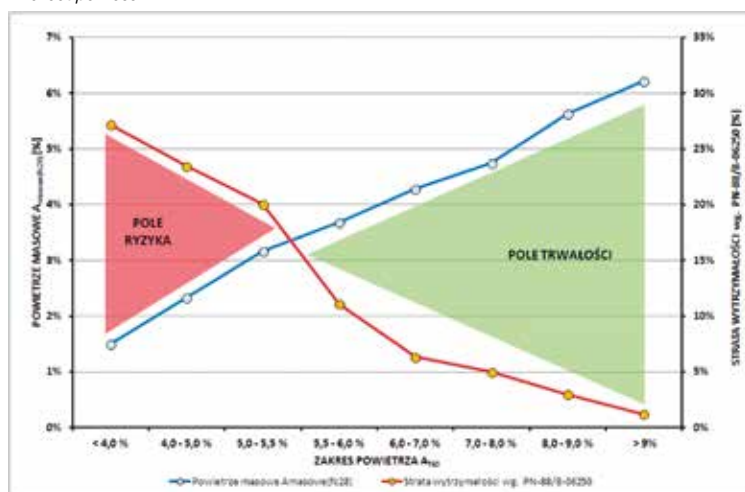
twierdza się także w warunkach przemysłowych, czyli podczas produkcji i dostawy betonów napowietrzonych, a jego wpływ nadal jest pomijany lub uznawany za coś „nieistotnego”. Niestety fakt, że nie jest ono dokładnie rozumiane, powoduje czasem szereg nieporozumień na budowach podczas badań kontrolnych wykonywanych w celach



Rys. 7. Przedziały zawartości powietrza A_{T60} a ich wpływ na zapewnienie warunku mrozoodporności



Rys. 8. Przedziały zawartości powietrza $A_{masowe(fc,28)}$ a ich wpływ na zapewnienie warunku mrozoodporności



Rys. 9. Obszary określające ryzyko i ufność dla przedziałów zawartości powietrza określonych różnymi metodami w aspekcie straty wytrzymałości po badaniu mrozoodporności

akceptacji właściwości mieszanki lub przy ocenie zgodności wartości napowietrzenia z zapisanymi kryteriami.

Potwierdza się pewnego rodzaju „oczywistość”, że całość powietrza w betonie nie pochodzi od domieszki napowietrzającej, jednak ciekawie jawi się zależność i różnica między powietrzem zmierzonym w mieszance betonowej a obliczonym na podstawie zmodyfikowanej metody grawimetrycznej. Jako punkt odniesienia do przeprowadzenia analiz przyjęto napowietrzenie mieszanki zbadanej w momencie formowania próbek do badań betonu stwardniałego (A_{T60}), traktując tę zawartość powietrza jako najbardziej stabilną. Zawartości powietrza zaraz po wykonaniu mieszanki (A_{T5}) różni się z reguły od wartości końcowych (A_{T60}) od 0,5 do 1,5% wartości bezwzględnej.

Najlepszą korelację uzyskano w momencie powiązania zawartości powietrza w mieszance betonowej z zawartością powietrza w stwardniałym betonie dla próbek przewidzianych do badań wytrzymałościowych. Zapewne wynika to z objętości próbek $3,375 \text{ dm}^3$ (dla badań wytrzymałościowych) w stosunku do $1,0 \text{ dm}^3$ (dla badań trwałościowych) oraz sposobu ich pielęgnacji (woda/wilgotność powyżej 95%). Dodatkowo pojawiały się ciekawe zawartości powietrza masowego dla próbek wysuszonych po badaniach nasiąkliwości, których wielkości w odniesieniu do próbek namo-

czonych można próbować interpretować jako porowatość betonu, ale jest to temat do rozwinięcia i kolejnych analiz.

Do dalszych rozważań przyjęto powietrze masowe określone dla próbek przeznaczonych do badań wytrzymałości po 28 dniach ($A_{masowe(fc,28)}$), choć próbki do badań wytrzymałości wczesnych mogą być także wstępną informacją o faktycznej zawartości powietrza w betonie stwardniałym.

Przeprowadzone analizy wskazują, że:

- można skutecznie wykorzystać możliwość obliczenia zawartości powietrza masowego określonego na podstawie gęstości próbek do badań wytrzymałościowych
- obliczona wielkość zawartości powietrza w betonie jest niższa niż zmierzona w mieszance betonowej, jest to spowodowane różnymi czynnikami, zarówno materiałowymi jak i wpływem procesu mieszania, wibrowania i formowania próbek
- można założyć, że w zakresie do 7,0% powietrza zmierzonego metodą ciśnieniową (A_{T60}) „strata powietrza” w przypadku powietrza masowego ($A_{masowe(fc,28)}$) wynosi około 2,0%
- określono także, że ta różnica jest tym większa, im większa jest zawartość powietrza w mieszance
- powietrze masowe może być również pośrednim wskaźnikiem prognozującym mrozoodporność betonu
- zgodnie z badaniami autorów [8] można przyjąć, że „bezpieczne” zawartości powietrza gwarantujące znalezienie się w obszarze trwałości betonu to:
 - dla mieszanki betonowej zakres powyżej 5,5%-6,0% (A_{T60})
 - dla powietrza masowego zakres powyżej 3,5-4,5% ($A_{masowe(fc,28)}$)
- wobec uzyskanych wyników gwarantujących mrozoodporność wydaje się słuszny zapis normy dotyczący napowietrzenia dla klas ekspozycji powyżej XF2 na minimalnym poziomie 4,0%, ale winien on odnosić się do powietrza masowego.

dr inż. Zbigniew Kołacz
mgr inż. Piotr Górak
mgr inż. Łukasz Szabat
CEMEX Polska Sp. z o.o.

Literatura

- 1 T. Powers, *Physical Properties of Cement Paste*, Washington 1960,
- 2 J. Sulikowski, *Cement. Produkcja i zastosowanie*, Wydawnictwo ARKADY, Warszawa 1982.
- 3 Z. Rusin *Technologia betonów mrozoodpornych Polski Cement Kraków 2002*
- 4 Glinicki M., Dąbrowski M., *Air void system parameters and frost resistance of air-entrained concrete containing calcareous fly ash, Roads and Bridges Vol. 12 (1/2013), p. 41–55*
- 5 A.M. Neville, *Właściwości betonu*
- 6 PN-88/B-06250 *Beton zwykły*
- 7 PN-EN 206:2013 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
- 8 Z. Kołacz, P. Górak, Ł. Szabat: *Napowietrzanie mieszanki betonowej, jako parametr determinujący trwałość betonu BTA 1(73)/2016*

Artykuł został opublikowany w materiałach konferencyjnych Konferencji Dni Betonu 2016