

Napowietrzenie mieszanki betonowej, jako parametr determinujący trwałość betonu wyrażony stopniem mrozoodporności

1. Wstęp

Jaka powinna być minimalna zawartość powietrza w mieszance betonowej, aby zapewnić właściwy stopień mrozoodporności betonu?

Na to pytanie nie ma nigdy jednoznacznej odpowiedzi. Przedział zawartości powietrza (napowietrzenia) dla betonu obciążonego agresją mrozową ewoluuje wraz z kolejnymi badaniami zagłębiającymi się w strukturę napowietrzanego betonu. Pomimo iż już w „starej” normie betonowej z roku 1988 pojawiły się zapisy wymagające wprowadzenia do betonu narażonego na działanie czynników atmosferycznych dodatkowego powietrza, to przez szereg lat unikano napowietrzania mieszanki betonowej, obawiając się o obniżenie wytrzymałości betonu.

Jeszcze na przełomie stuleci wiele wyników badań wskazywało, że zapewnienie szczelności betonu poprzez obniżenie wskaźnika W/C i/lub zastosowanie dodatków mineralnych (mikrokrzemionka) jest działaniem wystarczającym, aby wykonać beton odporny na cykliczne zamrażanie i odmrażanie. Z takich wniosków korzystano wówczas podczas realizacji konstrukcyjnych betonów mostowych. Doświadczenia oparte na wynikach badań mrozoodporności prowadzonych według metody zwykłej wykonywanych ręcznie w komorach do badań mrozoodporności wskazywały, że przy zastosowaniu odpowiedniej jakości surowców możliwe było spełnienie stopnia mrozoodporności F200 przy zawartości powietrza nawet rzędu 3,5% a niejednokrotnie bez napowietrzenia. Zdaniem wielu praktyków, ówczesne urządzenia, których ograniczenia wymuszały niejako przeprowadzenie jednego do dwóch cykli zamrażania i odmrażania na dobę, bardziej oddawały naturalne warunki zmian temperaturowych, jakimi obciążona jest konstrukcja betonowa eksploatowana w naszych warunkach klimatycznych. Potencjalny

i zgodny z zapisami procedury badawczej dobowy cykl zamrażania i odmrażania obrazuje rys. 1.

Wadą tak wykonywanego badania był długi czas, możliwe błędy badawcze i wyniki uzyskiwane po ponad pół roku od zabetonowania konstrukcji, stąd też pojawił się parametr nasiąkliwości będący w owym czasie próbą „szybką” weryfikacji mrozoodporności i trwałości betonu, choć oba badania w żaden sposób nie są pomiędzy sobą skorelowane. Niestety, pomimo licznych publikacji [np. 8] pogląd ten do tej pory funkcjonuje, ale jest to temat na inną, obszerną publikację.

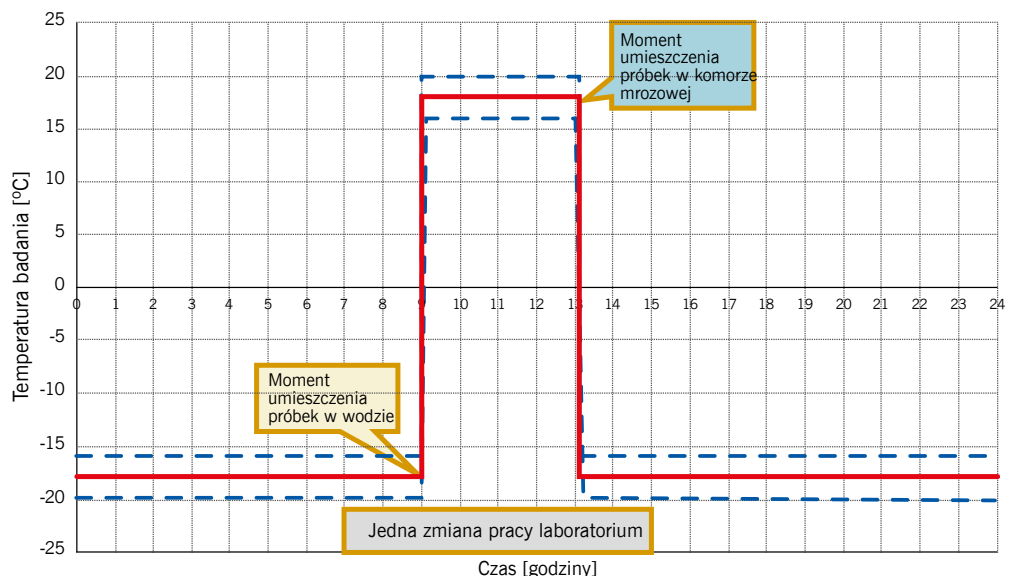
Pojawienie się nowych, bardziej sprawnych i automatycznych komór do badania mrozoodporności wymusiło inne spojrzenie na mrozoodporność wewnętrzną betonu. Szok termiczny, jaki przechodzą próbki betonowe badane w obecnych urządzeniach, gdzie teoretyczny dobowy cykl zamrażania i odmrażania obrazuje rysunek 2, spowodował zintensyfikowanie badań nad właściwą strukturą napowietrzenia betonu, która zapewniała zmniejszenie naprężeń pochodzących od gwałtownych zmian temperatur i ich częstotliwości w strukturze betonu.

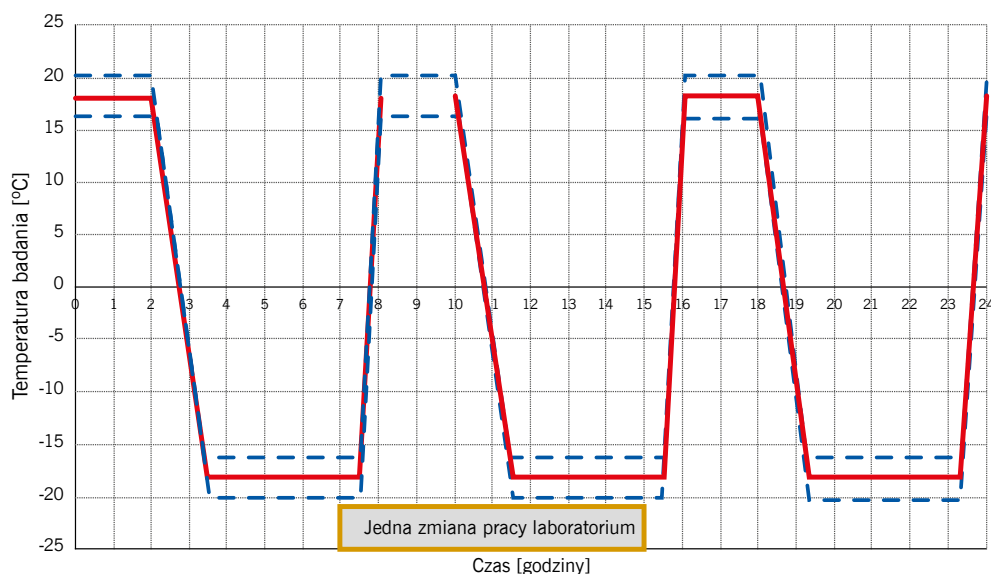
Celem opisanego w niniejszym artykule programu badawczego była próba odpowiedzi na pytanie zawarte w pierwszym akapicie, czyli jaka zawartość powietrza (przedział) gwarantuje z dużą dozą prawdopodobieństwa mrozoodporność betonu zweryfikowaną za pomocą najpowszechniej stosowanej metody badawczej, czyli za pomocą bezpośredniego mrożenia w powietrzu i rozmrażania próbek w wodzie.

2. Dokumenty techniczne – różne wymagania, różna ocena w aspekcie zgodności napowietrzenia

Archaiczne, aczkolwiek wciąż powoływane w specyfikacjach technicznych dla konstrukcji inżynier-

Rysunek 1. Dobowy cykl badania mrozoodporności sposobem ręcznym (1 cykl) zgodnie z PN-B-06250





skich, wymagania dotyczące projektowania składu mieszanek betonowych i parametrów stwardniałego betonu opierały się głównie na zaleceniach norm PN-88/B-06250 oraz PN-S-10040:1999 w zakresie betonu i PN-B-06712 w zakresie kruszyw, które to zalecenia zostały uszczegółowione i doprecyzowane Rozporządzeniem Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. (Dz.U. nr 63 poz.735). Wyszczególnione powyżej normy i przepisy szczegółowo regulowały przedziały napowietrzenia mieszanki betonowej, rozróżniając jednocześnie warunki, w jakich będzie pracował element konstrukcji.

Zawartość powietrza w zagęszczonej mieszance betonowej badana metodą ciśnieniową wg PN-88/B-06250 nie powinna wykraczać:

- powyżej 2% w przypadku niestosowania domieszki napowietrzającej
- poza przedziały wartości podane wycinkowo w tabeli 1 w przypadku stosowania domieszek napowietrzających.

Były to zapisy bardzo często traktowane w aspekcie zła koniecznego, przez co ograniczano zawartości powietrza do jak najniższego, dopuszczalnego normą poziomą, czyli 3,5-4,5%, po to aby nie narażać się na utratę wytrzymałości i zachować wymagania wytrzymałościowe klasy betonu.

Pojawienie się normy PN-EN 206-1:2003 było nadzieją, że problem napowietrzenia mieszanki betonowej będzie rozwiązany w sposób bardziej adekwatny do możliwości zachowania trwałości konstrukcji. Norma ta określiła wymaganą wartość zawartości powietrza poprzez podanie tylko specyfikowanej wartości minimalnej. Dla klas ekspozycji od XF2 do XF4 włącznie minimalna wartość powietrza określona została na 4%, a przyjmując zgodnie z punktem 5.4.3 dotyczącym zawartości powietrza w stosunku do wyspecyfikowanej – górnej granicy zawartości powietrza stanowi wyspecyfikowana wartość minimalna powiększona o 4%, czyli w tym przypadku 8%. W przypadku zawartości powietrza w mieszance betonowej badanej zgodnie z normą PN-EN 12350-7 maksymalne dopuszczalne odchylenia wynoszą:

- Dolna granica = -0,5% wartości bezwzględnej
- Górna granica = +1,0% wartości bezwzględnej

Tabela 1. Przedziały zawartości powietrza dla uziarnienia 0-16 mm wg PN-B-06250

Rodzaj betonu	Zawartość powietrza, w % przy uziarnieniu 0 ÷ 16 mm
Beton narażony na czynniki atmosferyczne	3,5 ÷ 5,5
Beton narażony na stały dostęp wody, przed zamarznięciem	4,5 ÷ 6,5

Zatem okazało się, że dla pojedynczego wyniku badania można było akceptować mieszankę betonową z wartością napowietrzenia mieszcząca się w przedziale 3,5%-9,0%.

Nowa norma PN-EN 206:2013 znów nieco zmienia podejście do napowietrzenia mieszanki betonowej. Jeżeli jest ono konieczne, należy je zbadać zgodnie z PN-EN 12350. Wartość powietrza winna być wyspecyfikowana zgodnie z potrzebą, lecz na poziomie nie niższym niż 4% dla betonów w klasie ekspozycji XF2 do XF4 przy czym pojedyncze wyniki muszą się mieścić w granicach -0,5% objętościowo i +5% objętościowo od wartości deklarowanej. W normie tej znalazł się dodatkowo zapis zalecający uwzględnienie w specyfikacji zawartości powietrza strat powietrza, które mogą wystąpić po dostarczeniu mieszanki na miejsce wbudowania w wyniku pompowania, układania, zagęszczania itp.

W 2014 roku, w miejsce dotychczas stosowanych specyfikacji technicznych bazujących na „starej” normie betonowej i Rozporządzenia MTiGM z 30 maja 2000 roku, podjęto próbę wprowadzenia nowych OST opartych już o bogate doświadczenia wynikające ze stosowania europejskich norm betonowych PN-EN 206 i powiązanych z nią norm badawczych mieszanki betonowej i stwardniałego betonu oraz nowych norm kruszywowych powiązanych z normą PN-EN 12620. Wprowadzenie zmian w podejściu do betonu było o tyle znaczące, że spowodowało możliwość nieco innego spojrzenia na mostowy beton konstrukcyjny, w sposób bardziej dostosowany od obecnych uwarunkowań technologiczno-materiałowych, a więc przy wykorzystaniu możliwości zastosowania innych wymagań / przedziałów napowietrzenia mieszanki betonowej oraz możliwości stosowania szerszego spektrum kruszyw. Zgodnie z zapisami „nowych” specyfikacji technicznych „Zawartość powietrza

Tabela 2. Wartości powietrza w mieszance betonowej wg OST

Wymiar kruszywa D [mm]	Etap wykonywania badań		Tolerancja pomiarowa [%]
	Projektowanie składu mieszanki betonowej [%]	Zatwierdzenie receptury, próba technologiczna, kontrola jakości robót [%]	
16,0	4,5÷6,0	4,5÷6,5	-0,5 +1,0
22,4	4,0÷5,5	4,0÷6,0	
31,5	4,0÷5,5	4,0÷6,0	

w mieszance betonowej badana zgodnie z PN-EN 12350-7 nie powinna wykraczać:

- powyżej 2 %, w przypadku niestosowania domieszki napowietrzającej
- poza granice przedziałów podanych w poniższej tabelicy, w przypadku stosowania domieszki napowietrzającej do wykonania elementów narażonych na oddziaływanie środowiska w klasach ekspozycji: XF2, XF3, XF4: [tabela 2]

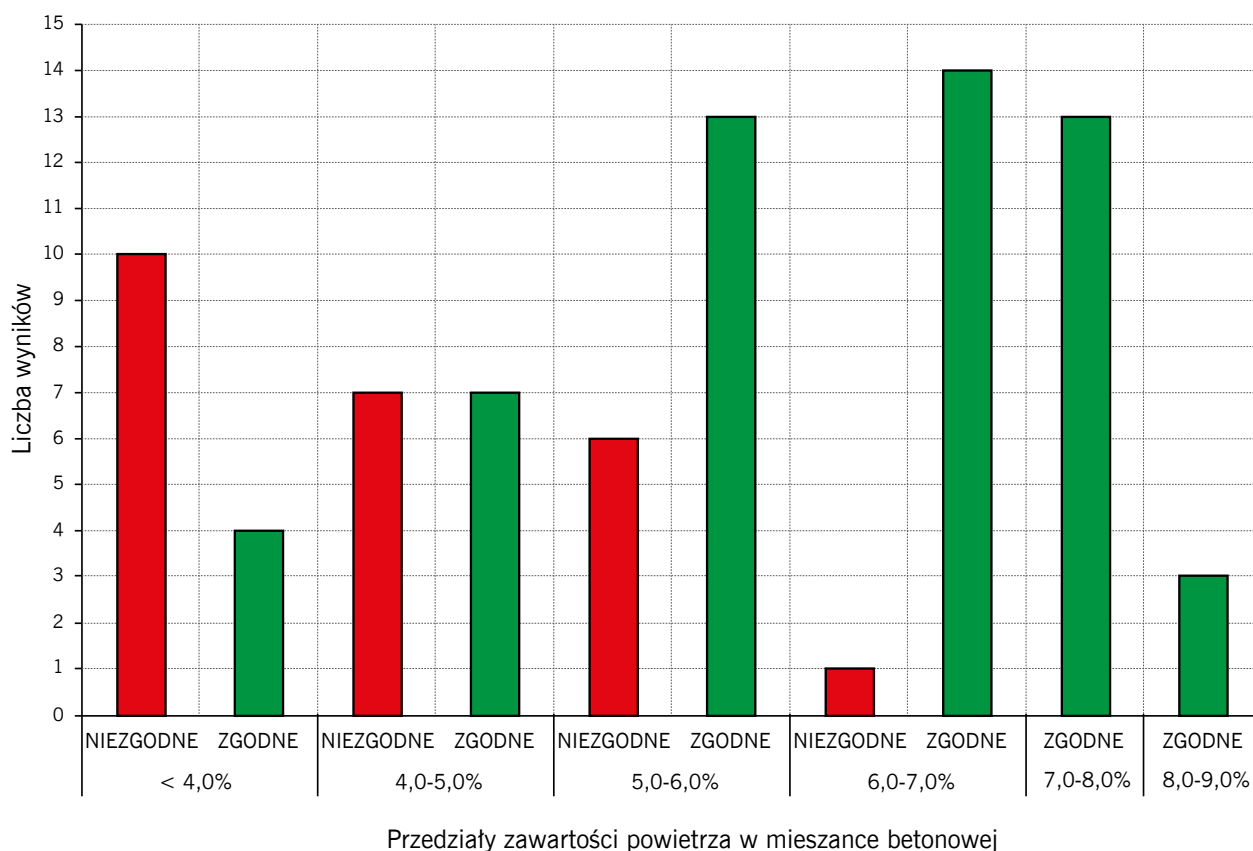
3. Omówienie celu i zakresu programu badawczego

Dla przeanalizowania założeń nowych specyfikacji opracowany został program badawczy obejmujący szerokie spektrum dopuszczonych specyfikacją materiałów.

Receptury badawcze spełniały wymagania i zalecenia projektu OST [7] dla betonu konstrukcyjnego w zakresie składu jak i parametrów, czyli:

- cementy zgodne z punktem 3.1
- kruszywa naturalne grube łamane zgodne z punktem 3.2
- domieszki upłynniające i napowietrzające (kilku wiodących producentów)
- maksymalna wartość wskaźnika W/C=0,45
- klasy ekspozycji od agresji mrozowej XF3 i XF4
- klasa konsystencji S3 (100-150 mm)
- zawartość powietrza w mieszance betonowej dla XF3 i XF4 od 4,0 do 7,5%

Rys.3. Ilości badań mrozoodporności zgodnych i niezgodnych w zależności od zawartości powietrza od mieszance betonowej



- wytrzymałość na ściskanie $f_{cm} \geq f_{ck} + 6 \div 12$ MPa.

Oprócz sprawdzenia podstawowych cech mieszanki betonowej i betonu stwardniałego przy zastosowaniu „nowych” materiałów, pośrednim wnioskiem, który po uzyskaniu wszystkich wyników badań stał się głównym wątkiem niniejszego opracowania, było ustalenie przedziału ufności zawartości powietrza w mieszance, dla którego wszystkie wyniki z wykonanych badań mrozoodporności spełniały zakładany projektem receptury stopień mrozoodporności (F150, F200).

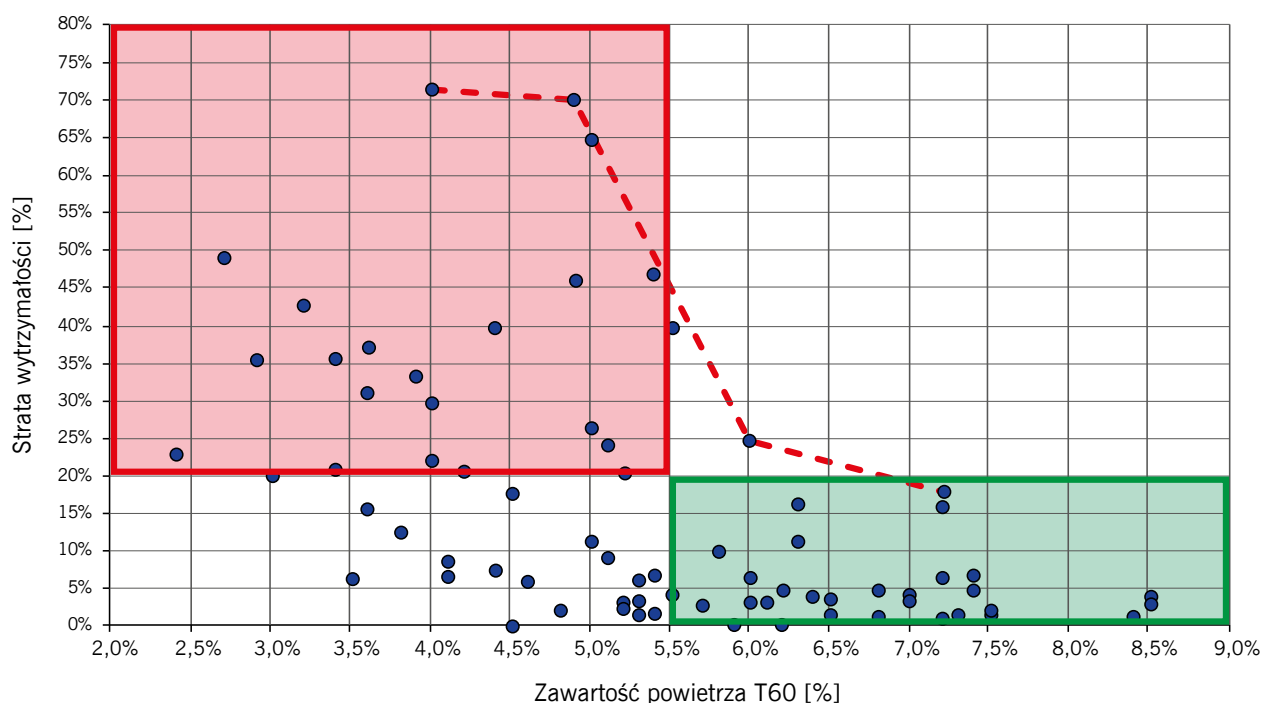
4. Omówienie uzyskanych wyników badań w zakresie odporności na zamrażanie i odmrażanie w funkcji zawartości powietrza w mieszance betonowej.

Przeprowadzone serie badań dla stopni mrozoodporności F150 i F200 odpowiednio dla klas ekspozycji XF3 i XF4 już po wstępnej analizie przedziałów wyraźnie zaznaczają granicę minimalnego napowietrzenia mieszanki betonowej, dla której uzyskano spełnienie warunków mrozoodporności [rys. 3] niezależnie od zastosowanego rodzaju cementu i rodzaju kruszywa.

Zaobserwowano także, że w pewnej ilości przypadków badanych betonów napowietrzanych badanie mrozoodporności betonów musiało zostać przerwane ze względu na stan próbek po 75 do 105 cyklach. Natomiast jeżeli próbki przetrzymały ten początkowy okres badania, wytrzymały 150 czy 200 cykli mrożenia.

Na bazie doświadczeń wynikających z realizacji tego projektu, jak i innych badań prowadzonych w laboratorium badawczym, kryterium straty wytrzymałości poniżej 20% uzyskiwano bez straty a w zasadzie przy przyroście masy nieprzekraczającej

Strata wytrzymałości vs. zawartość powietrza T60



czającym 0,35%-0,50%. Próbkę, która nie uległa spękanemu (a brak spękań jest jednym z warunków spełnienia kryterium mrozoodporności), nigdy nie wykazywała strat wytrzymałości powyżej wartości granicznej spełnienia kryterium, a ich ubytek masy mieścił się w granicach błędów pomiarowych.

Na podstawie analizy wyników badań mrozoodporności w zależności od wartości napowietrzenia mieszanki stworzono wykres obrazujący przedział ufności, w którym oznaczono wartość minimalną napowietrzenia mieszanki, dla której w zbiorze wykonanych badań uzyskano 100% spełnienia warunku mrozoodporności [rys. 4].

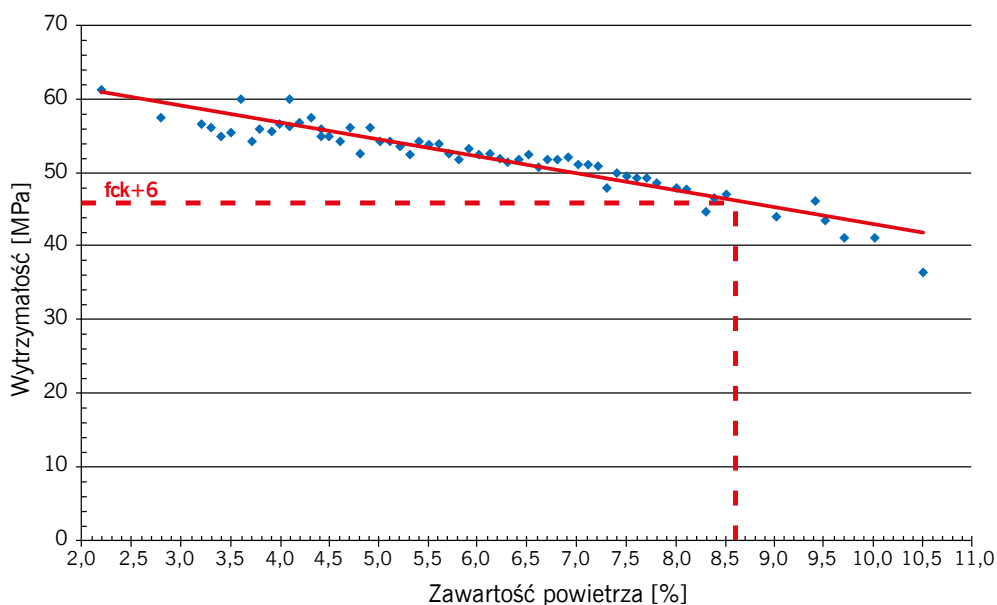
Jak można zaobserwować na rys. 4, granica zawartości powietrza w mieszance betonowej gwarantująca spełnienie mrozoodporności betonu mostowego przebiega na poziomie 5,5%. Można więc

wstępnie wysnuć wniosek, że jeżeli napowietrzenie mieszanki betonowej w chwili wbudowania będzie co najmniej 5,5%, to wówczas możemy być pewni, że zakładana przez nas mrozoodporność takiego betonu będzie spełniona.

Z drugiej strony pojawia się pytanie, a co ze spełnieniem zakładanej klasy wytrzymałości na ściskanie takiego betonu? Odpowiedź można znaleźć na poniższych wykresach [rys. 5 i 6], gdzie pokazano zależność uzyskiwanej wytrzymałości na ściskanie w zależności od zawartości powietrza w mieszance betonowej.

Jak można zaobserwować na powyższych wykresach, do spełnienia założeń wymaganych w badaniach wstępnych określonych na poziomie $f_{ck}+6$, do spełnienia klasy wytrzymałości można spokojnie dopuścić zawartość powietrza na poziomie

Rys.4. Zależność straty wytrzymałości po mroźeniu od zawartości powietrza mierzonego metodą ciśnieniową w chwili zarabiania próbek



Rys.5. Zależność wytrzymałości betonu C30/37 od zawartości powietrza

8,6% dla klasy C30/37 oraz 7,3%, aby spełnić wymagania dla klasy C35/45.

Wartości te należy przyjmować jako orientacyjne, bo będą one zależały bezpośrednio od składu receptury, zastosowanych surowców i podejścia do projektowania betonów mostowych danego technologa.

W przypadku wyższych klas należy przyjąć podejście bardziej indywidualne, bo tu duże znaczenie będą miały wpływ surowce, jakie zostaną zastosowane w danej recepturze (cement, kruszywa, domieszki) oraz w/c na jakie będzie projektowany dany beton.

5. Wnioski

Bazując na uzyskanych wynikach badań ze zrealizowanego, obszernego programu badawczego oraz analizie znaczenia napowietrzenia betonu, można wysnuć następujące wnioski:

- należy mieć świadomość, że całość napowietrzenia w mieszance betonowej nie pochodzi od domieszki napowietrzającej, zatem powinna być to wartość, jaką należy brać pod uwagę przy akceptacji parametrów mieszanki na budowie w dolnym przedziale napowietrzenia
- dla badanych serii sprawdzanych receptur, niezależnie od rodzaju stosowanego cementu oraz rodzaju stosowanego kruszywa łamanego, a także źródła (producenta domieszek) zaobserwowano, że początkowa granica przedziału ufności, w którym istnieje największe prawdopodobieństwo spełnienia warunku mrozoodporności F150 lub F200 wynosi 5,5%. Zgodnie z zapisami projektu nowych ogólnych specyfikacji technicznych dla konstrukcyjnych betonów mostowych jest to środek proponowanego przedziału
- zapisy normy PN-EN 206.2013 słusznie wprowadzają tylko ograniczenie dolne zawartości powietrza, a także dodatkowo sugerują odpowiednie podejście do wyspecyfikowanej wartości napowietrzenia w zależności od możliwych zjawisk strat napowietrzenia
- nie zaobserwowano także negatywnego wpływu na wytrzymałość lub brak osiągnięcia klasy betonu dla wartości napowietrzenia wykraczające-

go poza 6,5%. Graniczną wartość napowietrzenia gwarantującą spełnienie warunku uzyskania klasy wytrzymałości określono dla:

- o C30/37 na poziomie max 8,6%
- o C35/45 na poziomie max 7,3%

W niniejszym artykule analizowano tylko wartość napowietrzenia w mieszance betonowej i świadomie nie zajmowano się strukturą napowietrzenia, ilością powietrza w stwardniałym betonie, bo ten temat będzie kontynuowany i poddany innej analizie. Jednak nie od dziś wiadomo, że napowietrzenie mieszanki a zawartość powietrza w betonie to całkowicie inne wartości

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

Literatura

- 1 A.M.Neville, *Właściwości betonu*
- 2 PN-88/B-06250 *Beton zwykły*
- 3 PN-EN 206-1:2003 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
- 4 PN-EN 206:2013 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
- 5 *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie Dz.U. 63/2000 poz.735*
- 6 *OST M-13.01.00 Beton konstrukcyjny w obiekcie mostowym GDDKiA, 2011*
- 7 *Wzorcowe Dokumenty Kontraktowe. Specyfikacja OST BETON KONSTRUKCYJNY z 18.07.2014 (zał.1) GDDKiA*
- 8 M.A.Glinicki, *Widmo nasiąkliwości, Budownictwo, Technologie, Architektura, nr 3/2007*
- 9 A.Golda, S.Kaszuba, *Nasiąkliwość betonu – Wymagania a procedury badawcze. XI Sympozjum Naukowo-Techniczne. Reologia w technologii betonu. Gliwice 2009*
- 10 Z.Rusin, *Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement, Kraków 2002*
- 11 PN-S-10040:1999 *Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania*

Rys.6. Zależność wytrzymałości betonu C35/45 od zawartości powietrza

