

Michał A.Glinicki¹

ZASADY KSZTAŁTOWANIA MROZODPORNOŚCI BETONU

1. Wprowadzenie

Klimat Polski, określany jako umiarkowany przejściowy, charakteryzuje się okresowym występowaniem opadów atmosferycznych i dosyć częstymi zmianami temperatury, w tym dobowymi przejściami przez 0°C w miesiącach zimowych. Elementy konstrukcji betonowych, jeśli nie są zagłębione w gruncie poniżej ści jego przemarzania lub nie są zadaszone i termicznie izolowane, są poddane okresowemu niszcącemu działaniu mrozu. Oczekiwanie trwałości konstrukcji przekłada się m.in. na wymaganie odpowiedniej mrozoodporności betonu.

Rozumienie mrozoodporności betonu w Polsce jest silnie zdominowane przez ujęcie znane z normy PN-B-06250:1988 [1] i wcześniejszej wersji tej normy z roku 1975. Już dawno pojawiła się krytyka takiego ujęcia. W roku 1986 Rusin i Wawrzeńczyk [2] wskazali brak jednoznaczności wymagań normowych, brak kontroli postępu niszczenia próbek w czasie, nieadekwatność kryterium zmiany masy. Współczesne zmiany w technologii produkcji cementu uwypukliły niejednoznaczność oceny poprzez odniesienie do próbek świadków, w których często następuje znaczny przyrost wytrzymałości w wieku od 28 do 90 dni. Dyskusję aktualnego stanu wiedzy i techniki przedstawiono w niedawnej publikacji [3], bazującej na analizie mrozoodporności próbek betonów pobranych z obiektów drogowych. Na podstawie

¹prof. dr hab.inż., IPPT PAN, Warszawa, mglinic@ippt.pan.pl

przeгляdu licznych współczesnych norm zagranicznych przedstawiono też propozycje zmian metodycznych. Skutki marginalizowania zagadnienia mrozoodporności betonu w krajowym załączniku do normy PN-EN 206-1 trwają nadal, a zgłaszane postulaty nie wywołują odpowiednich działań ze strony PKN. Na tle niedostatków w dokumentach normalizacyjnych w niniejszym referacie omówiono postępowanie przy projektowaniu betonu mrozoodpornego. W drugiej części podjęto dyskusję procedur bezpośredniego oznaczania mrozoodporności, a także przedstawiono kryteria pośredniej oceny mrozoodporności betonu.

2. Projektowanie betonu mrozoodpornego

Zgodnie z PN-EN 206:2014 [4] mrozoodporność betonu traktuje się jako odporność na agresję środowiska XF, wyróżnia się 4 klasy ekspozycji od XF1 do XF4:

XF1 – umiarkowane nasycenie wodą bez środków odladzających

XF2 – umiarkowane nasycenie wodą ze środkami odladzającymi

XF3 – silne nasycenie wodą bez środków odladzających

XF4 – silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską

W Tabelicy 1 przedstawiono recepturowe ograniczenia składu mieszanki betonowej, odpowiadające tym klasom ekspozycji.

Po ustaleniu klasy ekspozycji XF, projektowanie betonu mrozoodpornego przebiega następująco:

- a) wybór kruszywa o pożądanej mrozoodporności i uziarnieniu zapewniającym minimalizację wodożądności,
- b) wybór rodzaju cementu o pożądanej charakterystyce twardnienia i właściwościach specjalnych, jeśli wymagane,
- c) wybór zestawu kompatybilnych domieszek do betonu, zazwyczaj domieszki napowietrzającej i uplastyczniającej,
- d) obliczenie zawartości składników w 1 m³ mieszanki na podstawie założonych parametrów spełniających ograniczenia recepturowe wg Tabelicy 1: zawartość cementu, wskaźnik w/c i zawartość powietrza w napowietrzanej mieszance betonowej.

Kolejnym etapem projektowania jest wykonanie zarobu próbnego i doświadczalne potwierdzenie zakładanych właściwości mieszanki betonowej i klasy wytrzymałości betonu.

Brzmi to dosyć prosto i nie jest faktycznie trudne, jeżeli do betonu można wykorzystać składniki już wcześniej sprawdzone w takim zastosowaniu.

Tablica 1 Ograniczenia składu betonu w klasach ekspozycji XF zgodnie z PN-EN 206

Właściwości	Klasa ekspozycji z uwagi na oddziaływanie przemiennego zamrażania i rozmrażania			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Max w/c	0,55	0,55	0,50	0,45
Min klasa wytrzymałości	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Min zawartość cementu [kg/m ³]	300	300	320	340
Min zawartość powietrza [%]	-	4	4	4
Inne wymagania	Kruszywo zgodne z PN-EN 12620 o odpowiedniej mrozoodporności			

Chociaż z PN-EN 206 nie wynika konieczność bezpośredniego sprawdzenia mrozoodporności zaprojektowanego betonu, nie należy zapominać, że i ta i inne normy europejskie zostały zredagowane w sposób ogólny. Odpowiednią przestrzeń na sformułowanie wymagań szczegółowych pozostawiono w „przepisach w miejscu stosowania” czyli krajowych arkuszach aplikacyjnych. Praktyka inżynierska wiodących krajów europejskich bynajmniej nie ogranicza się do sprawdzenia ograniczeń recepturowych według Tablicy 1, ale obejmuje dodatkowe kryteria oceny mrozoodporności betonu. Ponadto, we wstępie do PN-EN 206 wyjaśniono, że trwają prace normalizacyjne nad sformułowaniem wymagań funkcjonalnych, mimo że aktualne wymagania mają charakter recepturowy. Możliwość projektowania betonu na trwałość metodami związanymi z właściwościami użytkowymi (p.5.3.3) pozostawiono w gestii krajowych norm uzupełniających. Wskazano m.in. metody oznaczania mrozoodporności powierzchniowej wg PKN-CEN/TS 12390-9:2007 [5] i mrozoodporności wewnętrznej wg CEN/TR 15177:2006 [6], a także odwołano się do pojęcia rozkładu porów w betonie stwardniałym (Zał. A, str.66 w [4]). Takie są więc warunki właściwego umocowania krajowych wymagań na mrozoodporność betonu.

3. Ustalenie klasy ekspozycji XF

Do właściwego ustalenia klasy ekspozycji XF można wykorzystać poradniki dla inżynierów, np. [7]. Jednakże sprawa nie jest banalna, ponieważ normowy opis środowiska jest enigmatyczny. Ogranicza się do rozróżnienia elementów mniej lub więcej nasyconych wodą poprzez wskazanie pionowych i poziomych powierzchni elementów (grawitacyjne odprowadzenie wody zmniejsza oczywiście nasycenie betonu) lub elementów usytuowanych nad brzegiem morza. Stosowanie soli odladzających uwzględnia się w sposób zero-jedynkowy. Podstawowe kwestie są w ogóle nieokreślone: co kryje się pod pojęciem znaczącej agresywności cyklicznego zamrażania/rozmarzania? Stąd pojawiają się pytania praktyczne, np.: czy beton w obiekcie inżynierskim we Wrocławiu na drodze kategorii KR4 i w Suwałkach na transgranicznej drodze ekspresowej kategorii KR7, w obu przypadkach narażony na oddziaływanie soli odladzającej, powinien spełniać te same wymagania pod względem mrozoodporności? Intuicja inżynierska podpowiada, że nie, chociaż w obu przypadkach środowisko kwalifikuje się do klasy XF4.

Zróznicowanie agresywności oddziaływania mrozu na konstrukcje można ocenić na podstawie np. izoterm najzimniejszego miesiąca czyli stycznia - mają przebieg zbliżony do południkowego, co oznacza że zimy są łagodniejsze w Polsce zachodniej. Do podobnych spostrzeżeń prowadzi analiza mapy obciążenia śniegiem, zawartej w Załączniku krajowym do PN-EN 1991-1-3:2005 [8]: charakterystyczne obciążenie śniegiem w strefie 4 na północnym wschodzie jest ponad dwukrotnie większe niż w strefie 1 usytuowanej w południowo-zachodniej części kraju. Znane są stwierdzenia, że ponad połowa dni zimowych charakteryzuje się występowaniem opadów atmosferycznych. Ważna jest nie tylko liczba dni mroźnych i opady atmosferyczne; zasadnicze znaczenie przypisuje się liczbie cyklicznych przejść przez 0 °C. Internetowy serwis pogodowy, umożliwiający dostęp do szczegółowych danych pogodowych, wykazał np. na Okęciu w Warszawie w okresie 2000-2010 średnią liczbę dni mroźnych w roku wynoszącą 40, natomiast liczba dni z przymrozkiem wynosiła 95¹. Dostępne są również dane o opadach atmosferycznych. Liczbę dni z przymrozkiem

¹ Dni z przymrozkiem to takie, w których temperatura minimalna <0° C, natomiast dni mroźne to takie w których temperatura maksymalna <0° C.

można traktować jako oszacowanie liczby przejść temperatury powietrza z dodatniej na ujemną.

We francuskich dokumentach normalizacyjnych uzupełniających EN-206 przedstawiono sposób charakteryzowania agresywności oddziaływania mrozu na konstrukcje z betonu. Zdefiniowano trzy strefy agresywności mrozu [9]:

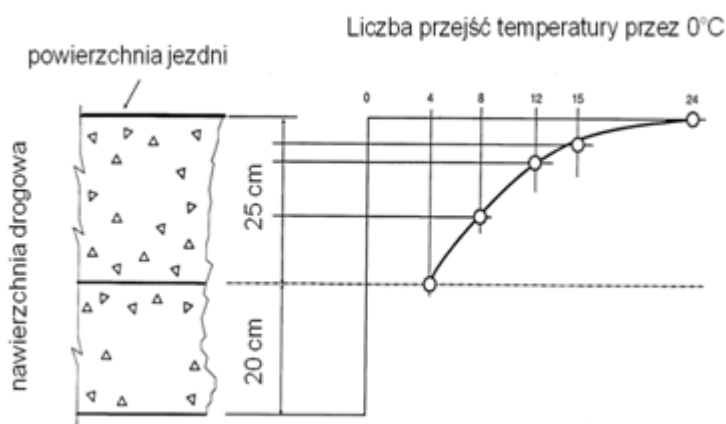
- mróz słaby: ≤ 2 dni rocznie o temperaturze < -5 °C,
- mróz ostry: > 10 dni rocznie o temperaturze < -10 °C,
- mróz umiarkowany: między słabym a ostrym.

Jednocześnie rozróżniono intensywność stosowania soli odładzających na podstawie liczby dni w roku l_{ds} , w których stosowane były środki odładzające: rzadko: $l_{ds} < 10$; często: $10 \leq l_{ds} < 30$; bardzo często: $l_{ds} \geq 30$. Odpowiednim kombinacjom agresywności mrozu i częstości stosowania soli odładzającej przypisano klasy ekspozycji XF, a w konsekwencji nie tylko ograniczenia na skład betonu, ale też zróżnicowane wymagania na charakterystykę porów powietrznych oraz mrozoodporność wewnętrzną i powierzchniową betonu. Pożądane jest przeprowadzenie podobnego rozróżnienia warunków klimatycznych i intensywności stosowania soli odładzających w Polsce. Odwoływanie się do bardzo ogólnych definicji klas XF, bez uszczegółowienia wspomnianego powyżej jak we Francji, może prowadzić do nieporozumień. Trudno bowiem zaakceptować przeniesienie technologii sprawdzających się np. w Holandii (cementy CEM III/B), gdzie zimy są łagodne, do regionów Polski o przewadze oddziaływania zim kontynentalnych.

Zgodnie z zasadami przyjętymi przez GDDKiA, omówionymi w [10], do usuwania lub łagodzenia śliskości zimowej stosuje się środki chemiczne oraz materiały uszorstniające. Solanki-roztwory NaCl lub CaCl₂ o stężeniu 20-25% rozpryskuje się na nawierzchnie w ilościach 15 – 160 ml/m². Mieszaniny NaCl lub CaCl₂ w proporcji 4:1 do 2:1 są najbardziej skuteczne, ale działają niszcząco na zbrojenie i beton. Zgodnie z zasadami Eurokodu, należy rozpoznać i odpowiednio zaprojektować części konstrukcji inżynierskich znajdujących się w strefie rozbryzgów solanki i rozpylania mgły solnej. Właśnie oddziaływanie soli odładzających jest czynnikiem znacząco zwiększającym destrukcyjne działanie mrozu na beton, o czym świadczą poważne uszkodzenia estakad zarówno Mostu Łazienkowskiego, jak też Mostu Grota Roweckiego w Warszawie. W obu przypadkach, po około 30 latach

eksploatacji, estakady poddano całkowitej wymianie, a przecież oczekiwany czas eksploatacji takich obiektów powinien być znacznie dłuższy.

Jeśli już ustalimy intensywność stosowania środków odładzających oraz agresywność oddziaływania mrozu (zimową strefę klimatyczną), pozostaje jeszcze określenie liczby cykli zamrażania/rozmarzania, jakim poddany jest beton w konstrukcji. Rozkład temperatury w betonie, w tym liczba przejść temperatury przez 0°C , zmienia się w funkcji odległości od powierzchni zewnętrznej konstrukcji. Ilustruje to rys.1, wskazujący zmniejszenie liczby przejść przez zero ze wzrostem odległości od lica nawierzchni drogowej [11]. Jednakże cykl przejścia temperatury przez 0°C w jakimś miejscu w konstrukcji betonowej nie oznacza, że to był jeden z cykli destrukcyjnych. Woda w porach betonu nie zamarza bowiem w temperaturze 0°C ; im mniejsze pory tym niższa temperatura zamarzania wody [12]. Orientacyjnie można przyjąć, że w porach kapilarnych betonu o $w/c= 0,40\div 0,50$, w warstwie zewnętrznej o grubości 50 mm, woda zamarza w temperaturze od -2°C do -5°C . Jeśli więc przyjąć średnią temperaturę zamarzania wody w tej warstwie betonu jako -3°C , można wyznaczyć liczbę destrukcyjnych cykli zamarzania /rozmarzania betonu. W tabelicy 2 podane są wyniki oszacowania tej liczby, która okazuje się około dwu lub czterokrotnie mniejsza niż liczba przejść temperatury powietrza przez 0°C (42 lub 25 w porównaniu do 96).



Rys.1 Rozkład liczby przejść temperatury przez 0°C w funkcji odległości od powierzchni jezdni w nawierzchni drogowej na podstawie [11]

Tablica 2. Liczba cykli zamrażania i rozmrażania oznaczona w powietrzu oraz w betonie (rocznie, średnia z 5 lat) – na podstawie [11]

Liczba cykli	Temperatura zamarzania	
	0°C	-3 °C
w powietrzu	96	51
w belce na gł. 50mm	65	42
w nawierzchni na gł. 50mm	47	25

Powyższa analiza wskazuje, że w danych warunkach klimatycznych określenie liczby cykli zamrażania-rozmrażania w czasie eksploatacji obiektu z betonu nie jest jednoznaczne. W tej samej lokalizacji w jednakowym okresie eksploatacji nawierzchnia drogowa lub pomost wiaduktu będą narażone na znacząco różną liczbę destrukcyjnych cykli F-T (zwłaszcza przy silnym oddziaływaniu soli odładzających).

4. Dobór składników betonu

Do betonu mrozoodpornego stosuje się kruszywa mineralne wysokiej jakości, głównie grysy z jednorodnego surowca skalnego. Odpowiednio wysoką mrozoodporność kruszywa specyfikuje się poprzez odniesienie do PN-EN 12620. Przykład wymaganych właściwości kruszywa grubego przeznaczonego do betonu nawierzchniowego przedstawiono w Tablicy 3. Oprócz mrozoodporności kruszywa oznaczanej w 1% roztworze NaCl ważne są zwłaszcza właściwości mechaniczne kruszywa, w tym odporność na rozdrabnianie. Przy zmniejszeniu kategorii odporności na rozdrabnianie np. do LA_{35} najczęściej podwyższa się wymaganie mrozoodporności badanej w 1 % NaCl na kruszywie frakcji 8/16 do wartości nie przekraczającej 2%.

Tablica 3. Wymagane właściwości kruszywa grubego (grysu) do stosowania w betonie mrozoodpornym przeznaczonym na powierzchnię drogi ekspresowej (przykład)

Właściwość	Metoda badania	Wymagania wobec kruszywa grubego do:	
		dolnej warstwy nawierzchni	górnej warstwy z kruszywem odkrytym
Mrozoodporność badana w 1 % NaCl; wartość nie wyższa niż w %:	PN-EN 1367-6	6 (frakcja 8/16)	6 (frakcja 4/8)
Odporność kruszywa na rozdrabnianie; kategoria nie wyższa niż:	PN-EN 1097-2	LA_{25} (frakcja 10/14)	LA_{20} (frakcja 4/8)
Kształt kruszywa; kategoria nie wyższa niż:	PN-EN 933-3 lub PN-EN 933-4	FI_{20} lub SI_{20}	FI_{15} lub SI_{15}
Zawartość pyłów; wartość nie wyższa niż:	PN-EN 933-1	f_1 wartość deklarowana	f_1 wartość deklarowana

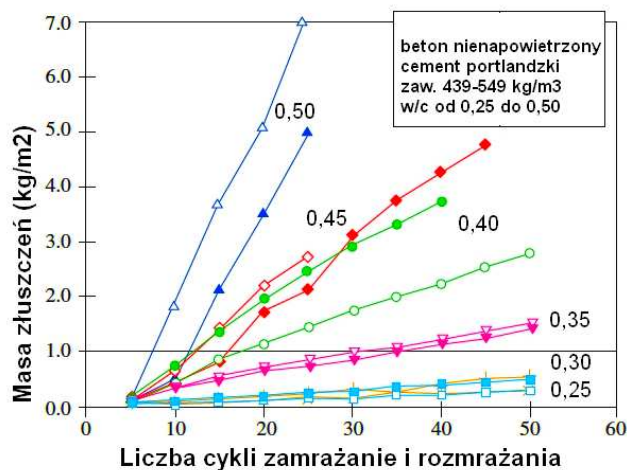
Wybór domieszek do betonu, zazwyczaj domieszki napowietrzającej i redukującej zawartość wody, podporządkowany jest celowi uzyskania konsystencji mieszanki odpowiedniej do zastosowania oraz uzyskaniu projektowanego napowietrzenia mieszanki. Zgodnie z zaleceniem PN-EN 206 należy sprawdzić kompatybilność obu domieszek. Zalecenie to realizuje się przede wszystkim poprzez sprawdzenie charakterystyki porów powietrznych w betonie stwardniałym, odwołując się do procedury PN-EN 480-11 [13] zastosowanej do konkretnej receptury betonu. Chodzi o stwierdzenie, czy łączne użycie domieszki napowietrzającej i domieszki redukującej zawartość wody nie wpłynie negatywnie na zawartość i rozkład wielkości porów powietrznych.

Niewłaściwe napowietrzenie czy brak napowietrzenia bywa zasadniczym powodem niedostatecznej mrozoodporności betonu, o czym informują m.in. prace [3], [14]. Poprzez sprawdzenie zawartości powietrza w mieszance betonowej i w betonie stwardniałym, a także charakterystyki porów w betonie stwardniałym, należy dążyć do wyeliminowania niekorzystnych składników mieszanki betonowej. Oprócz kwestii kompatybilności domieszek, należy zwrócić uwagę na zawartość drobnych frakcji w kruszywie oraz na uziarnienie i skład cementu. Mieszanki betonowe z cementem zawierającym pozaklinkierowe

składniki główne, na ogół zmielone do większej powierzchni właściwej, często są trudniejsze do napowietrzenia niż mieszanki zawierające cement portlandzki. Często obserwuje się niestabilność zawartości powietrza, a także niekorzystne zmiany rozkładu wielkości porów w kierunku zmniejszenia zawartości mikroporów.

Przy wyborze cementu do betonu mrozoodpornego często decydujący wpływ mają dodatkowe uwarunkowania, np. pożądana wysoka odporność na agresję chemiczną czy też ograniczenie samoociepłania twardniejącego betonu w elementach masywnych. Jeśli nie ma wymagań specjalnych, odpowiedniego wyboru cementu do odpowiedniej klasy ekspozycji można dokonać na podstawie zasad przedstawionych w pracy [15]. Zgodnie z uproszczonym modelem Powersa mrozoodporność wewnętrzna betonu napowietrzonego będzie proporcjonalna do wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego i jego przepuszczalności. Najkorzystniejsze rezultaty mrozoodporności betonu uzyskuje się przy zastosowaniu cementów portlandzkich. Szybkość twardnienia spoiwa (w tym klasa wytrzymałościowa cementu) ma znaczenie w odniesieniu do przewidywanego wieku betonu w chwili ekspozycji na działanie mrozu: pożądanym jest wysoki stopień przereagowania spoiwa i skorelowana z nim niska zawartość wody niezwiązanej w betonie.

Zawartość wody w betonie jest pierwszorzędym czynnikiem wpływającym na mrozoodporność. Wskaźnik w/c decyduje o zawartości porów kapilarnych i stopniu ich nasycenia wodą, a także o wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementowego. Do uzyskania przyzwoitej mrozoodporności konieczne jest ograniczenie w/c do wartości 0,50, a lepiej do wartości 0,45, co nie jest trudne z uwagi na dostępność domieszek redukujących zawartość wody. Przy bardzo niskich wartościach w/c, poniżej 0,30, można oczekiwać odpowiedniej mrozoodporności betonu bez stosowania domieszek napowietrzających. Świadczą o tym m.in. rezultaty badań przeprowadzonych przez Portland Cement Association [16] (rys.2). Jednakże jest to ścieżka mniej ekonomiczna i niepozbawiona dodatkowych utrudnień, zwłaszcza związanych ze dużym skurczem samoosuszania, charakterystycznym dla mieszanek betonowych o wskaźniku $w/c < 0,40$ i pojawiającym się zagrożeniem powstania wczesnych rys skurczowych. Znane są niepowodzenia przy wyborze tej ścieżki technologicznej.



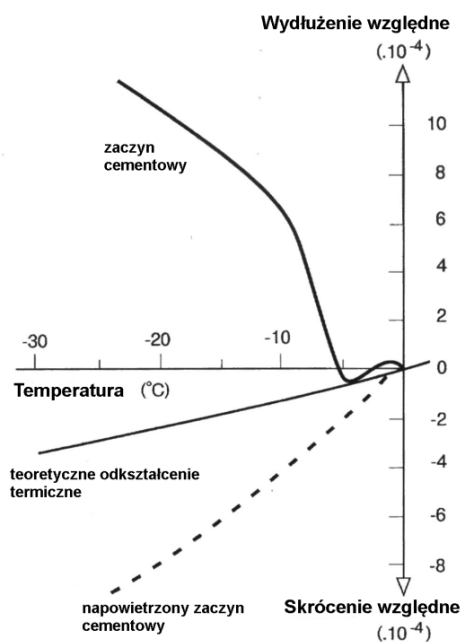
Rys.2 Wpływ wskaźnika wodno-cementowego na mrozoodporność betonu [16]

Oprócz składników betonu i ich proporcji, na mrozoodporność betonu w konstrukcji będą wpływały czynniki związane z wykonaniem mieszanki, jej transportem, sposobem zagęszczania i pielęgnacji. Dotyczy to zwłaszcza betonów napowietrzonych – znany jest wpływ intensywności mieszania podczas transportu mieszanki, pompowania i intensywności zagęszczania betonu na zawartość lub rozkład wielkości porów w betonie [10]. Od skuteczności pielęgnacji zależą natomiast właściwości fizyczne warstwy powierzchniowej betonu, ewentualna przepuszczalność wpływająca na stopień nasycenia betonu wodą lub wodnymi roztworami soli odladzającej. Wysoki stopień nasycenia betonu wodą znacząco obniża odporność na cykliczne zamrażanie-rozmrażanie. Ten sam beton w konstrukcji, w której błędnie zaprojektowano odprowadzenie wody opadowej okaże się mniej odporny na niszczące działanie mrozu niż w innej, prawidłowo zaprojektowanej konstrukcji.

5. Bezpośrednia ocena mrozoodporności betonu

Mrozoodporność betonu rozumie się jako stabilność wymiarów oraz właściwości mechanicznych i fizycznych pod działaniem cyklicznych zmian temperatury z dodatniej na ujemną. Uszkodzenie od mrozu to skumulowany efekt wielokrotnych zmian temperatury betonu, zwłaszcza temperatury wody w porach betonu, związanych z odkształceniami termicznymi, transportem wody w porach oraz przemianą fazową wody w lód. Jeśli wykluczyć szokowe zmiany temperatury, ochłodzenie lub ocieplenie elementu betonowego wywołuje odpowiednie odkształcenie, proporcjonalne do różnicy temperatury i

współczynnika rozszerzalności termicznej α_T . Jeśli współczynniki α_T stwardniałego zaczynu cementowego i ziaren kruszywa są dość bliskie, odkształcenie termiczne betonu nie powoduje znacznych koncentracji naprężeń na granicach ziaren. Dopiero w przypadku wysokiego nasycenia betonu wodą lub stałego dostępu do wody z zewnątrz cykliczne zamrażanie-rozmrażanie może wywołać uszkodzenia. Dzieje się tak z powodu zwiększenia objętości wody przy przejściu fazowym w lód, co w konsekwencji prowadzi do powstania ciśnienia wewnętrznego (tzw. hydraulicznego) w porach kapilarnych betonu, częściowo nasyconych wodą. Przy szybkim zamrażaniu betonu zauważa się znaczący efekt napowietrzania, zilustrowany na rys.3 na podstawie badań stwardniałego zaczynu cementowego: zaczyn ulega znaczącej ekspansji, chociaż oczekiwać należałoby skurczu, a w zaczynie napowietrzonym zamarzanie wody następuje bez widocznych skutków przejścia fazowego wody w lód.



Rys.3 Zmiana długości próbek z zaczynu cementowego napowietrzonego i nienapowietrzonego, nasyconego wodą, na skutek szybkiego zamrażania (wg. [12])

Prosty model ciśnienia hydraulicznego wg T.C. Powersa opisuje zasięg strefy chronionej przez pęcherzyki powietrza w betonie, a w konsekwencji określa wskaźnik rozmieszczenia porów [10]. Nie jest to ani jedyne ani wyczerpujące objaśnienie uszkodzeń mrozowych betonu i efektu napowietrzania. Znane są inne modele, ale nie będą tu szczegółowo omawiane.

Miarę mrozoodporności wewnętrznej betonu definiuje się na podstawie ewentualnych mikro i makrospękań betonu, spowodowanych powstaniem naprężeń wskutek ciśnienia hydraulicznego lub ciśnienia osmotycznego, lokalnie przekraczającego wytrzymałość na rozciąganie. Ewentualne uszkodzenie betonu określa się poprzez szybkość zmian wybranej właściwości mechanicznej betonu w funkcji liczby cykli zamrażania-rozmrażania. W praktyce stosuje się kryterium granicznej wartości względnego współczynnika sprężystości lub spadku wytrzymałości po zadanej (adekwatnej do agresywności ekspozycji mrozowej) liczbie cykli N_{F-T} :

$$DF = E_{res}(N_{F-T}) / E_{res}(N_{F-T}=0) \quad (1)$$

$$RDE = E_{ult}(N_{F-T}) / E_{ult}(N_{F-T}=0) \quad (2)$$

$$\Delta f = [f_c(N_{F-T}=0) - f_c(N_{F-T})] / f_c(N_{F-T}=0) \quad (3)$$

$$\Delta f_{PN} = [f_c(\text{ref}) - f_c(N_{F-T})] / f_c(\text{ref}) \quad (4)$$

gdzie :

DF- wskaźnik mrozoodporności wg ASTM C 666 [17] (przyjmuje się $N_{F-T}=300$),

E_{res} – rezonansowy współczynnik sprężystości betonu,

RDE – względny dynamiczny współczynnik sprężystości wg CEN/TR 15177 [6],

E_{ult} – współczynnik sprężystości oznaczony metodą ultradźwiękową,

Δf – względny spadek wytrzymałości na ściskanie f_c , na ogół w odniesieniu do f_{c28} ,

Δf_{PN} – względny spadek wytrzymałości na ściskanie w odniesieniu do wytrzymałości próbek świadków $f_c(\text{ref})$ wg PN-B-06250 (najczęściej dotąd przyjmowano $N_{F-T}=150$).

Współczynnik sprężystości betonu jest bardzo podatny na powstawanie mikro i makrospękań, spodziewanych w rezultacie niszczącego cyklicznego działania mrozu, dlatego stosowany jest w ujęciu norm amerykańskich i CEN (wzory (1) i (2)). W sformułowaniu PN-B-06250, jak również według norm stosowanych w krajach Europy Wschodniej i Chinach, ocena mrozoodporności opiera się na sprawdzeniu zmiany wytrzymałości na ściskanie (wzory (3) i (4)). Zupełnie konwencjonalnie przyjmuje się, że 20% redukcja współczynnika sprężystości lub wytrzymałości na ściskanie wyznacza granicę oddzielającą beton mrozoodporny od niemrozoodpornego. Znane są także inne kryteria mrozoodporności: redukcja wytrzymałości $\leq 15\%$ wg norm czeskich, $\leq 5\%$ wg normy litewskiej lub redukcja współczynnika sprężystości $\leq 25\%$ wg norm francuskich. Względność określenia „mrozoodporności” jest

związana z rodzajem testu kwalifikacyjnego i kryterium oceny; beton mrozoodporny według normy polskiej może być niemrozoodporny zgodnie z innymi normami lub odwrotnie.

Odrębnym rodzajem zniszczenia mrozowego betonu są złuszczenia powierzchniowe powstające przy jednoczesnym oddziaływaniu soli odladzających, ujawniające się poprzez odspajanie fragmentów przypowierzchniowej warstwy w postaci cienkich płatków zaprawy. Według teorii ciśnienia osmotycznego w trakcie ochładzania i krystalizacji lodu dochodzi do dużych różnic w stężeniu roztworu w porach, co generuje dużo wyższe ciśnienia osmotyczne niż w przypadku czystej wody. Według innego modelu, zniszczenie betonu przy powierzchni jest konsekwencją pęknięcia warstwy lodu powstałego na powierzchni podczas ochładzania. Kurczenie się powstałego lodu w wyniku dalszego ochładzania wywołuje naprężenia rozciągające w lodzie przekraczające wartości graniczne, a spęknięcia lodu odbijają się na powierzchni betonu. Zjawisko powierzchniowego niszczenia betonu jest progresywne, obejmuje kolejno coraz głębsze warstwy i większe odpryski.

Miarę mrozoodporności powierzchniowej betonu definiuje się najczęściej na podstawie ubytku masy złuszczonego materiału z powierzchni próbki zalanej znormalizowanym (na ogół 3%) roztworem NaCl, poddanej zadanej liczbie cykli zamrażania i rozmrażania. Odpowiednia procedura badania wg CEN/TS 12390-9 [5], określona jako „slab test”, jest dość powszechnie stosowana. Kategorie powierzchniowej mrozoodporności betonu wyznacza się na podstawie masy złuszczeń m_{56} lub m_{28} , odpowiednio po 56 lub 28 cyklach zamrażania i rozmrażania, jak też na podstawie szybkości narastania masy złuszczeń, wyrażonej w formie ilorazu m_{56}/m_{28} . Wartości graniczne masy złuszczeń 1 kg/m^2 lub $0,5 \text{ kg/m}^2$ są najczęściej stosowane do oceny mrozoodporności powierzchniowej. Badanie zgodnie z powyższą normą jest też podstawą oceny mrozoodporności betonu w „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych”[18], przyjętym do stosowania na budowach nawierzchni dróg krajowych i autostrad.

Szczegółowe porównanie różnych metod bezpośredniego wyznaczania mrozoodporności wewnętrznej i mrozoodporności powierzchniowej betonu przedstawiono w pracach [19] i [20]. Znamioną cechą współczesnych procedur badawczych jest ściśle określenie przebiegu zmian temperatury, na które narażone są elementy próbne. Precyzyjnego sterowania

szybkością zamrażania nie można było zdefiniować 30 lat temu i w związku z tym w procedurze oznaczania stopnia mrozoodporności wg [1] brakuje bardzo ważnego parametru, który znacząco wpływa na rezultaty badania. Ponadto, w związku z zależnością temperatury w betonie od odległości od powierzchni zewnętrznej należałoby ustalić jedną wielkość próbek. Trzy próbki o boku 150mm wydają się bardziej reprezentatywne w tym zakresie niż normowe 6 próbek o boku 100mm. Zmodyfikowane kryterium oceny mrozoodporności poprzez odniesienie do f_{c28} pozwoliłoby uniknąć nieporozumień związanych z przedłużonym narastaniem wytrzymałości, obserwowanym w przypadku aktualnie produkowanych cementów. Odpowiednią liczbę cykli zamrażania i rozmrażania należałoby ustalić w odniesieniu do mapy agresywności mrozu i intensywności stosowania soli odladzającej, o jakiej wspomniano w rozdz. 3. Ponieważ duża liczba laboratoriów w Polsce posiada odpowiednią aparaturę i umiejętności wykonania testów mrozoodporności wg PN-B-06250, warto opracować odpowiednie modyfikacje tej procedury i kryteriów oceny; implementacja metod badawczych wg CEN/TR 15177 lub ASTM C 666 napotkałaby trudności aparaturowe. Z powodu niszczącego charakteru oznaczania wytrzymałości procedura badania nadal nie pozwoli na monitorowanie uszkodzeń w funkcji wzrastającej liczby cykli F-T.

6. Ocena mrozoodporności metodą pośrednią

Do pośrednich metod określania mrozoodporności betonu należy oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w betonie napowietrzonym, zwłaszcza wskaźnika rozmieszczenia porów zgodnie z koncepcją Powersa. Ilościowy opis charakterystyki porów w napowietrzonym betonie uzyskuje się na podstawie mikroskopowej analizy przekrojów próbek. Metoda zgodna z normą [13] jest wykorzystywana w Polsce od ok. 15 lat, została dość szeroko opisana [21]. Wymagania normowe dotyczące charakterystyki porów powietrznych w betonie odpornym na agresję mrozu w klasach środowiska XF2 do XF4 zestawiono w tablicy 4. Przyjęto oznaczenia zgodnie z PN-EN 480-11:

\bar{L} - wskaźnik rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie

A - zawartość powietrza w stwardniałym betonie

A_{300} - zawartość makroporów mniejszych od 0,3 mm w stwardniałym betonie

Kryteria dotyczą oczywiście betonu intencjonalnie napowietrzonego.

W austriackiej i duńskiej normie uzupełniającej EN 206-1 sformułowane są szczegółowe wymagania dotyczące wskaźnika rozmieszczenia porów i zawartości mikroporów w stwardniałym betonie, odpowiednio do klasy ekspozycji XF. W normie duńskiej wymaganie dobrej odporności na powierzchniowe złuszczenie (oznaczone metodą Boraas) jest traktowane zamiennie z wymaganiem właściwego wskaźnika rozmieszczenia porów. Wymagania dotyczące betonów na nawierzchnie dróg są jeszcze bardziej restrykcyjne. Według ZTV Beton-StB 07 w betonie na nawierzchnie, zarówno w toku opracowywania receptury mieszanki, jak też przy sprawdzaniu zgodności, wymaga się odpowiedniej charakterystyki porów.

Tablica 4. Wymagania dotyczące charakterystyki porów w betonie według norm uzupełniających EN 206-1 w wybranych krajach europejskich oraz w betonie nawierzchniowym według wytycznych niemieckich i austriackich (na podstawie [21])

Norma lub wytyczne	Wymaganie	Klasa ekspozycji		
		XF2	XF3	XF4
Norma austriacka ÖNORM B 4710-1	min. zawartość mikroporów A_{300} , % w betonie	1,0	1,0	1,8
	max. wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} , mm	-	-	0,18
Norma duńska DS 2426	min. zawartość powietrza A w betonie, %	3,5	3,5	3,5
	max. wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} , mm	0,20	0,20	0,20
	odporność na złuszczenia powierzchniowe (*)	dobra	dobra	dobra
Beton na nawierzchnie dróg				
Niemieckie Federalne Ministerstwo Komunikacji ZTV Beton-StB 07 i TL Beton-StB 07 oraz Austriackie RVS 08.17.02	Wymaganie	Badanie wstępne	Badanie zgodności	
	min. zawartość mikroporów A_{300} , % w betonie	1,8 / 1,8	1,5/ 1,8	
	max. wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} , mm	0,20/ 0,18	0,24/ 0,21	

(*) na podstawie badania wg normy szwedzkiej SS 13 72 44, 2005; kategoria odporności „dobra” odpowiada złuszczeniom $< 0,5 \text{ kg/m}^2$ po 56 cyklach zamrażania-rozmrażania.

Również w przepisach krajowych, dotyczących nawierzchni dróg betonowych [18], znajduje się wymaganie odpowiedniej charakterystyki porów powietrznych w betonie narażonym na agresję mrozu:

- zawartość mikroporów $A_{300} \geq 1,5\%$,

- wskaźnik rozmieszczenia porów $\bar{L} : \leq 0,250\text{mm}$ w klasie ekspozycji XF3 oraz $\leq 0,200\text{mm}$ w klasie ekspozycji XF4.

Warto zwrócić uwagę, że ocena mrozoodporności metodą pośrednią wymaga spełnienia warunków dodatkowych, zwłaszcza ograniczenia wskaźnika wodno-cementowego do wartości podanych w Tabelicy 1.

Zrozumiałe jest, że wykorzystanie powyższych kryteriów pośredniej oceny mrozoodporności betonu ma sens jedynie w przypadku intencjonalnego i kontrolowanego napowietrzenia mieszanki betonowej. Kiedy beton jest napowietrzony marginalnie (poniżej 3 %) lub nienapowietrzony, może okazać się odporny na łagodne oddziaływanie mrozu, a incydentalnie również na cykliczne silne zamrażanie i odmrażanie. Wspomniane w rozdziale 5 niejednoznaczności procedury badawczej wg PN-B-06250 mogą być źródłem niezgodności ocen w takich przypadkach.

7. Uwagi końcowe

Ocena mrozoodporności betonu nie jest wyłącznie związana z jego składem i sposobem wykonania, jest względna – odnosi się do konkretnych warunków ekspozycji betonu na działanie wilgoci, szybkości i amplitudy zmian temperatury powodujących zamrażanie i rozmrażanie oraz intensywności stosowania środków odładzających. Względność określenia mrozoodporności jest też związana z rodzajem bezpośredniego testu kwalifikacyjnego i kryterium oceny, np. beton mrozoodporny według normy polskiej może być niemrozoodporny zgodnie z normami francuskimi. Obserwacje uszkodzeń betonu w estakadach drogowych, niedawno wymienianych w Warszawie, wskazują na niedocenicenie agresywności oddziaływania soli odładzającej i synergii innych mechanizmów zniszczenia.

Zasady projektowania betonów mrozoodpornych można podsumować w formie następujących spostrzeżeń:

1. Kluczowe znaczenie ma wskaźnik wodno-cementowy, zawartość cementu w betonie i napowietrzenie. Ograniczenia recepturowe według PN-EN 206 trzeba traktować jako warunki konieczne, ale niewystarczające do uzyskania wysokiej odporności betonu na działanie mrozu, zwłaszcza w regionach mroźnych i wilgotnych oraz obszarach intensywnego stosowania środków odladzających.
2. Zasady doboru kruszyw wysokiej jakości do betonów mrozoodpornych, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12620, obejmują przede wszystkim odpowiednią mrozoodporność kruszywa w roztworze soli i w wodzie oraz uziarnienie zapewniające szczelność stosu okruszowego i minimalizację wodożądności.
3. Przy wyborze domieszek do betonu, zwłaszcza domieszki napowietrzającej i redukującej zawartość wody, zasadnicze znaczenie ma sprawdzenie ich kompatybilności poprzez ocenę charakterystyki porów powietrznych w betonie stwardniałym.
4. Podstawą wyboru rodzaju cementu do betonu mrozoodpornego są zalecenia normowe i klasyfikacja agresywności oddziaływania mrozu. Często wymagania specjalne (agresja chemiczna, masywność elementów) dominują przy tym wyborze. Najlepsze efekty uzyskuje się przy zastosowaniu cementu portlandzkiego, przy wysokim stopniu jego przereagowania skorelowanym z niską zawartością wody niezwiązanej w betonie.
5. Właściwe napowietrzenie betonu jest ekonomicznym rozwiązaniem problemu mrozoodporności. Rozwój domieszek do betonu umożliwia finezyjne kształtowanie rozkładu wielkości porów powietrznych w betonie przy minimalizacji negatywnego wpływu porowatości na jego wytrzymałość.

Literatura

- [1] PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- [2] Z.Rusin, J.Wawrzeńczyk, Metodyka badania mrozoodporności betonów nawierzchniowych, Konf. Naukowo-Techniczna „Nawierzchnie z betonu cementowego na drogach obciążonych małym ruchem”, SITK, Poznań 1986, 105-111
- [3] A.Glinicki, W. Radomski, Diagnostyka mrozoodporności betonu w drogowych obiektach mostowych, Drogownictwo, nr 9, 2013, 268-276
- [4] PN-EN 206:2014 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [5] PKN-CEN/TS 12390-9: 2007 Testing Hardened Concrete – Part 9: Freeze-Thaw Resistance – Scaling
- [6] CEN/TR 15177:2006 Testing the Freeze-Thaw Resistance of Concrete. Internal Structural Damage
- [7] M.J.Dickamp, R.Kampen, M.Peck, R.Pickhardt, T.Richter, Katalog elementów budowlanych. Poradnik projektowania na trwałość według norm nowej generacji, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007
- [8] PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1 - Oddziaływania na konstrukcje - Część 1-3: Oddziaływania ogólne - Obciążenie śniegiem
- [9] Bétons et ouvrages d'art - La durabilité des bétons. Collection Technique Cimbéton, T 48, Paris 2004
- [10] M. A. Glinicki, Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych: wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka. Seria „S” Studia i Materiały, Wyd. IBDiM, Warszawa 2011
- [11] M.R. Nokken, R. D. Hooton, C. A.Rogers, Measured internal temperatures in concrete exposed to outdoor cyclic freezing, Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 26, No. 1, 2004, 26-32
- [12] A.Carles-Gibergues, M.Pigeon, La durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse, w: La durabilité des bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1992, 227-284
- [13] PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Metody badań – Część 11: Oznaczenia charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [14] K.Flaga, O mrozoodporności betonów mostowych. w: „Trwałość obiektów mostowych”. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2012, 499-511

- [15] Z. Giergiczny, Czym kierować się przy doborze cementu do określonych zastosowań w budownictwie?, *Magazyn Autostrady*, 1-2/2014, 25-29
- [16] R.C.A.Pinto, K.C.Hover, Freeze-thaw durability of high-strength concrete, *Research & Development Bulletin RD122*, PCA, Skokie, Illinois, 2001
- [17] ASTM C 666: 2008 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- [18] A.Szydło, P.Mackiewicz, R.Wardęga, B.Krawczyk, Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, GDDKiA, Warszawa 2014
- [19] D. Józwiak-Niedźwiedzka, Metody badania mrozoodporności betonu, II Sympozjum Naukowo-Techniczne Trwałość betonu, Politechnika Krakowska, 2008, 161-181
- [20] P. Boss, Z. Giergiczny, Testing the frost resistance of concrete with different cement types - experience from laboratory and practice, *Architecture, Civil Engineering, Environment*, Vol. 3, No. 2, 2010, 41-52
- [21] M.A.Glinicki, Metody ilościowe i jakościowe oceny napowietrzenia betonu, *Cement-Wapno-Beton*, Vol.19, No.6, 2014, 359-369