

Odporność betonu na uszkodzenia wskutek reakcji alkalicznej kruszywa przy zewnętrznym oddziaływaniu soli odladzającej

CONCRETE RESISTANCE TO DAMAGE CAUSED BY ALKALI-AGGREGATE REACTION UNDER EXTERNAL EXPOSURE TO DE-ICING SALTS

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań betonu poddanego cyklicznym oddziaływaniom zmiennej temperatury i wilgotności wraz z zewnętrznym oddziaływaniem soli odladzającej. Warunki badania odzwierciedlają oddziaływania środowiskowe na beton w nawierzchniach dróg ekspresowych i elementach drogowych obiektów inżynierskich, określone kategorią środowiska E3. Próbkę wykonano według receptur laboratoryjnych oraz pobrano na placu budowy kilku odcinków nawierzchni dróg ekspresowych w Polsce. Przeprowadzono pomiary ekspansji próbek betonu, zmiany masy i zmiany rezonansowego modułu sprężystości w funkcji czasu. W przypadku betonu nawierzchniowego pobranego na budowie, zawierającego kruszywa grube i drobne spełniające kryteria niereaktywności potwierdzono stabilność objętościową i stałość właściwości sprężystych. Wyniki badań próbek laboratoryjnych ujawniły zróżnicowaną podatność betonu na uszkodzenia wskutek ASR w warunkach zewnętrznego oddziaływania soli odladzającej, związaną z obecnością minerałów reaktywnych w kruszywach. Przeprowadzone międzylaboratoryjne badania porównawcze pod auspicjami BASt wykazały biegłość laboratorium.

Abstract

The paper presents the results of tests on concrete subjected to cyclic exposure to varying temperature and humidity along with external exposure to de-icing salts. The testing conditions reflect the environmental effects on concrete in expressway pavements and elements of road engineering structures, as defined by the E3 environmental category. The

mgr inż. Karolina Bogusz – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

mgr inż. Kinga Dziedzic – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

dr Aneta Antolik – Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

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

samples were prepared according to laboratory formulations and taken at the construction site of several sections of expressway pavements in Poland. The expansion of the concrete samples, the change in mass and the change in resonance modulus of elasticity as a function of time were measured. In the case of pavement concrete taken at the construction site, which contained coarse and fine aggregates meeting the non-reactivity criteria, volumetric stability and consistent elastic properties were confirmed. The research results of laboratory samples revealed varying susceptibility of concrete to damage caused by alkali-silica reaction (ASR) under external exposure to de-icing salts, which was associated with the presence of reactive minerals in the aggregates. Interlaboratory comparison tests conducted under the auspices of BAST demonstrated the proficiency of the laboratory.

1. Wstęp

W strefie klimatu umiarkowanego o charakterze kontynentalnym, gdzie sezonowo występuje mróz i opady atmosferyczne, stosowanie soli odladzających do zimowego utrzymania dróg wpływa na trwałość betonowych elementów konstrukcji drogowych. Oprócz bezpośredniego wpływu na zwiększenie stopnia nasycenia betonu wodą i uszkodzenia spowodowane przez mróz i sól, roztwory słonej wody mogą wnikać w beton i prowokować występowanie innych szkodliwych zjawisk. Dotyczy to zwłaszcza nawierzchni jezdni drogowych i parkingów, nawierzchni dróg startowych, dróg kołowania i placów postoju samolotów [1-4]. Chlorek sodu, octan lub mrówczan sodu lub potasu są powszechnie stosowanymi nieorganicznymi i organicznymi solami przeciwołdzeniowymi, używanymi odpowiednio do zimowego utrzymania nawierzchni drogowych i lotniskowych. Ze względu na wymaganą trwałość betonu w odniesieniu do reakcji alkalia-krzemionka (ASR) należy rozważyć rolę alkalicznych roztworów odladzających jako zewnętrznego źródła alkaliów [5, 6].

Przedwczesne uszkodzenia nawierzchni lotnisk betonowych związane z występowaniem reakcji alkalia-krzemionka zostały zidentyfikowane w około trzydziestu amerykańskich obiektach wojskowych. Skala problemu była różna, ale wiązała się ze znacznymi kosztami utrzymania i skróceniem przydatności eksploatacyjnej nawierzchni [7]. Obserwowane niszczenie nawierzchni betonowych na niektórych lotniskach cywilnych wzbudziło obawy co do potencjalnego wpływu środków odladzających na przyspieszenie szkodliwej reakcji ASR w betonie. Badania [8] ujawniły znaczny potencjał środków przeciwołdzeniowych na bazie soli sodowych i potasowych octanów i mrówczanów do wywołania szkodliwej reakcji ASR w próbkach betonowych zawierających kruszywa reaktywne. Jednak w próbkach zawierających kruszywa niereaktywne nie zaobserwowano wystąpienia ASR. Obserwacje odcinków betonowych nawierzchni niemieckich autostrad znacznie uszkodzonych po 8 - 12 latach eksploatacji wykazały [9], że przyczyną przedwczesnych uszkodzeń była reaktywność porfiru kwarcowego i kruszywa żwirowego. Skład mieszanki betonowej był podobny w obu przypadkach: zawartość cementu portlandzkiego wynosiła 360 kg/m^3 (CEM I, zawartość alkaliów $0,90 - 0,95\% \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$), stosunek wody do cementu $0,40 - 0,45$, zawartość powietrza $4,5 - 5,0\%$. Zarówno grys z porfiru kwarcowego, jak i granodiorytu, został zidentyfikowany jako niereaktywny przy użyciu przyspieszonych badań zaprawy w 80°C w 1 M NaOH oraz badań betonu w komorze mgłowej w 40°C . Jednak badania betonu w warunkach eksploatacyjnych (w komorze symulacji oddziaływań klimatycznych i środków odladzających) wykazały szkodliwą ekspansję betonu z kruszywami z tych złóż, co ostatecznie potwierdzono badaniami odwiertów z nawierzchni [10]. Jak stwierdzono, analiza petrograficzna dostarcza istotnych informacji na temat składu mineralnego kruszywa i obecności minerałów reaktywnych, niekiedy jednak nie jest wystarczająco selektywna, aby uzyskać rozstrzygającą ocenę przydatności kruszywa do betonu.

Różne oznaki rozwoju ASR w obiektach inżynierskich, nawierzchniach jednowarstwowych i dwuwarstwowych omówiono w [11-14]. Należą do nich m.in. przebarwienia, siatka spękań, a w konstrukcjach dwuwarstwowych pęknięcia w narożach i poziome pęknięcia w płytach betonowych. Podczas diagnostyki odcinków autostrad poddanych sezonowemu oddziaływaniu soli odladzających wyznaczono profile stężenia chlorków w odwiertach z nawierzchni. Stwierdzono bliskie podobieństwo profilu penetracji chlorków w odwiertach i w próbkach laboratoryjnych poddanych oddziaływaniu 3% roztworu NaCl [15]. Pomyślne stosowanie przepisów technicznych dotyczących kwa-

lifikacji przydatności betonu do budowy infrastruktury drogowej w Niemczech [16] spowodowało rozwinięcie metodyki badań betonu w warunkach zewnętrznego dostępu środków odladzających i wprowadzenie procedury badawczej PB/5/18 do wytycznych GDDKiA [17], równoważnej do TP B-StB - Teil 1.1.09 (2018). Celem badań przedstawionych w niniejszym referacie jest rozpoznanie podatności betonu z kruszywem mineralnym na wystąpienie reakcji między wodorotlenkami sodu i potasu oraz reaktywną krzemionką w warunkach zewnętrznego oddziaływania roztworu soli odladzającej na beton. Zakres badań obejmuje wybrane kruszywa mineralne łamane i naturalne o właściwościach fizycznych i mechanicznych odpowiednich do zastosowań w nawierzchniach drogowych, tradycyjnie uważane za niereaktywne.

2. Badania doświadczalne

2.1. Materiały i próbki

Dobór składników betonu został przeprowadzony na podstawie krajowych specyfikacji technicznych dla dwuwarstwowych nawierzchni betonowych z odsłoniętą powierzchnią kruszywa, przeznaczonych dla ruchu ciężkiego kategorii KR5 - KR7 [18]. Jako kruszywo grube wykorzystano dostępne na rynku kruszywa łamane ze skał: gabra (oznaczenie GB), amfibolit (dwa kamieniołomy, AM1, AM2), granodioryt (GD). Jako kruszywo drobne wykorzystano naturalny piasek pochodzenia wodnolodowcowego. Zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 o zawartości alkaliów 0,53 - 0,60% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, wyprodukowany w trzech różnych cementowniach. Zgodnie ze specyfikacjami dotyczącymi właściwości betonu górnej warstwy wymaganych w klasie ekspozycji XF4 [1] zaprojektowano napowietrzone mieszanki betonowe o stałej zawartości cementu i zawartości powietrza od 5 do 7%.

Mieszanki betonowe o składzie podanym w Tabeli 1 zostały wytworzone przemysłowo w wytwórni przy placu budowy trzech odcinków drogi ekspresowej. Sposób wytwarzania i właściwości mieszanki dowiezionej na plac budowy odpowiadały wymaganiom układania górnej warstwy betonu w technologii ślizgowej [1]. Skład mieszanek laboratoryjnych (Tabela 2) odpowiadał ramowym proporcjom składników mieszanki stosowanej na budowie do wykonania górnej warstwy betonu dwuwarstwowego, z wyjątkiem bardziej płynnej konsystencji. Maksymalny rozmiar ziaren kruszywa wynosił 8 mm, a zawartość domieszek dostosowywano do docelowej zawartości powietrza i docelowej urabialności.

Kruszywa mineralne pochodziły ze złóż uznawanych tradycyjnie za niereaktywne. Oznaczenie reaktywności kruszyw przeprowadzone zgodnie z procedurą GDDKiA PB/1/18 (na próbkach zaprawy w 80°C w 1 M NaOH w ciągu 14 dni) wykazało brak lub pewne zróżnicowanie reaktywności: ekspansja próbek wynosiła od 0,004% do 0,05% w przypadku kruszywa gabrowego i amfibolitu, 0,13% w przypadku granodiorytu, od 0,004% do 0,08% w przypadku trzech rodzajów piasku kwarcowego oraz 0,23% w przypadku piasku kwarcowego oznaczonego (sd).

Odrębna mieszanka betonowa została zaprojektowana w VDZ w Dusseldorfie do międzylaboratoryjnych badań porównawczych przeprowadzonych pod auspicjami BAST. Celem tych badań było porównanie bieguści pięciu laboratoriów w zakresie badań odporności betonu na ASR w warunkach eksploatacyjnych. Zastosowano jedną recepturę betonu (Tabela 3), a wszystkie składniki były pochodzenia niemieckiego.

Z mieszanek wykonanych przemysłowo i wyładowanych na placu budowy drogi lub wytworzonych w laboratorium uformowano próbki o kształcie pryzmatycznym o wymiarach 75x75x285 mm oraz normowe próbki sześciennie do oznaczania wytrzymałości na

ściskanie. Mieszankę w formach zagęszczano za pomocą stołu wibracyjnego. Po wyjęciu z formy próbki dojrzewały w warunkach wilgotnych w ustalonej temperaturze zgodnie z odpowiednią normą. Próbki wykonane w Niemczech do badań międzylaboratoryjnych po odpowiednim stwardnieniu zostały przesłane do laboratorium IPPT PAN.

Tabela 1. Skład i właściwości betonu - mieszanki na warstwę górną nawierzchni, wykonane w warunkach przemysłowych na budowie odcinków drogi ekspresowej

Składniki	Oznaczenie betonu		
	S8	S17	S61
Cement – zawartość [kg/m ³] i rodzaj	420 CEM I 42.5 N ^{*)}	420 CEM I 42.5 N ^{*)}	420 CEM I 42.5 N ^{**)}
Woda [kg/m ³]	149	151	165
Piasek kwarcowy 0/2 mm [kg/m ³]	523 (sa)	603 (sb)	597 (sc)
Kruszywo łamane 2/8 mm [kg/m ³]	1365 (GA)	1237 (AM1)	1211 (AM2)
Plastyfikator [% m.c.]	0.60	0.60	0.45
Domieszka napowietrzająca [% m.c.]	0.83	0.25	0.12
Właściwości mieszanki betonowej:			
Zawartość powietrza [%]	5.4	5.7	6.5
Opad stożka [mm]	16	13	3
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	2410	2440	2350
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	63.4±2.0	66.1±2.7	63.1±2.5
^{*)} cementownia W, zawartość alkaliów 0.53% Na ₂ O _{eq} ^{**)} cementownia K, zawartość alkaliów 0.56% Na ₂ O _{eq} (sa) piasek z kopalni A; (sb) piasek z kopalni B; (sc) piasek z kopalni C m.c. – w odniesieniu do masy cementu			

Tabela 2. Skład i właściwości betonu - mieszanki na warstwę górną nawierzchni, wykonane w laboratorium IPPT PAN

Składniki	Oznaczenie betonu					
	GD_sd	GD_sa	AM1_sd	AM1_sa	AM2_sd	AM2_sa
Cement ^{*)} [kg/m ³]	430	430	430	430	430	430
Woda [kg/m ³]	172	172	172	172	172	172
Piasek kwarcowy 0/2 mm [kg/m ³]	500 (sd)	500 (sa)	500 (sd)	500 (sa)	500 (sd)	500 (sa)
Kruszywo łamane 2/8 mm [kg/m ³]	1159 (GD)	1159 (GD)	1277 (AM1)	1277 (AM1)	1277 (AM2)	1277 (AM2)
Domieszka napowietrzająca [% m.c.]	0.15	0.15	0.2	0.2	0.15	0.15
Właściwości mieszanki betonowej:						
Zawartość powietrza [%]	6.8	6.5	6.3	6.1	6.4	6.7
Opad stożka [mm]	90	80	80	100	80	100
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	2300	2290	2340	2350	2360	2350
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	58.8±1.3	55.7±1.0	60.0±1.3	62.1±0.5	61.3±1.5	60.1±1.4
^{*)} cementownia G, CEM I 42.5 R - zawartość alkaliów 0.60% Na ₂ O _{eq} (sa) piasek z kopalni A; (sd) piasek z kopalni D m.c. – w odniesieniu do masy cementu						

Tabela 3. Skład mieszanki betonowej do międzylaboratoryjnych badań porównawczych pod auspicjami BAST (mieszanka wykonana w VDZ Dusseldorf), [21]

Składniki	Zawartość
Cement CEM I 42.5 R (Na ₂ O _{eq} = 0.77%)	360 kg/m ³
Woda	162 kg/m ³
Piasek 0/2 mm (12/2018)	30% objętościowo
Grys granitowy 2/5 mm (02/2021)	7.5% objętościowo
Grys granitowy 5/8 mm (02/2021)	7.5% objętościowo
Grys granitowy 8/11 mm (02/2021)	12.5% objętościowo
Grys granitowy 11/16 mm (02/2021)	12.5% objętościowo
Grys granitowy 16/22 mm (02/2021)	30% objętościowo
Domieszka napowietrzająca	0.688 kg/m ³

2.2. Metody badań

Do oceny odporności betonu na wystąpienie reakcji ASR w warunkach eksploatacyjnych przy zewnętrznym dostępie soli odladzającej zastosowano procedurę GDDKiA PB/5/18. Próbki pryzmatyczne przechowywano w cyklicznie zmieniających się warunkach ekspozycji środowiskowej przez co najmniej 20 tygodni. Każdy cykl trwa 14 dni: 5 dni w suszarce w temperaturze $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, 2 dni całkowicie zanurzone w roztworze chlorku sodu w szczelnym pojemniku w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 6 dni nad wodą w szczelnych pojemnikach w komorze ciepłno-wilgotnościowej w temperaturze $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności $\text{RH}>98\%$, 1 dzień w szczelnych pojemnikach w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności $\text{RH}>98\%$. Ekspozycję prowadzi się przez co najmniej 10 cykli (tj. 140 dni). Pomiarów zmian długości próbek, masy i częstotliwości rezonansowych drgań sprężystych próbek są wykonywane po każdym cyklu ekspozycji. W ten sposób wyznaczono wydłużenie próbek betonu, zmianę masy i zmianę rezonansowego modułu sprężystości [19] w postaci średnich wartości z pomiarów trzech próbek.

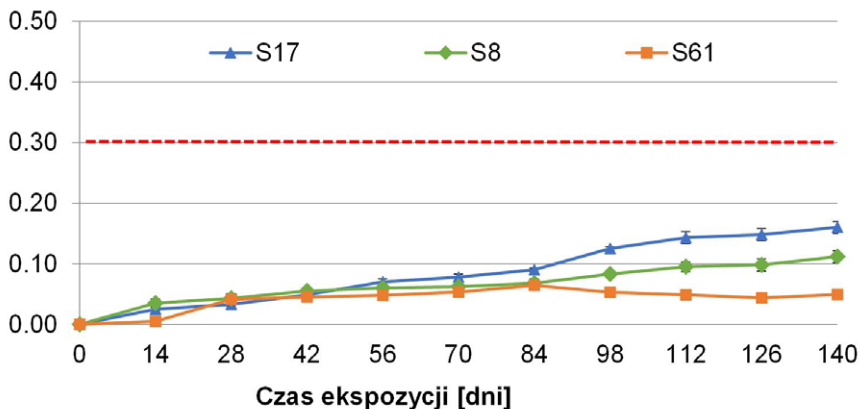
Zgodnie z odpowiednimi normami wskazanymi w normie PN-EN 206 określono podstawowe właściwości mieszanki betonowej (gęstość, opad stożka i zawartość powietrza) oraz stwardniałego betonu (wytrzymałość na ściskanie na próbkach sześciennych po 28 dniach dojrzewania).

3. Wyniki badań i dyskusja

Próbki betonu wykonane na budowie w warunkach przemysłowej produkcji wykazały jedynie niewielką ekspansję pod wpływem naprzemiennej ekspozycji na podwyższoną temperaturę i roztwór NaCl zgodnie z GDDKiA PB/5/18 (Rysunek 1b). Ekspansja końcowa próbek betonu wynosiła 0,05 - 0,16 mm/m (Tabela 4), tj. znacznie mniej od wartości granicznej 0,30 mm/m. Świadczy o wysokiej odporności betonu nawierzchniowego na uszkodzenia wskutek ASR przy zewnętrznym dostępie alkaliów w postaci roztworu NaCl. Ta obserwacja jest zgodna z przewidywaniami opartymi na charakterystyce poszczególnych frakcji kruszywa, wskazującej na ich niereaktywność. W konsekwencji nie zaobserwowano też istotnych zmian rezonansowego modułu sprężystości pod wpływem cyklicznej ekspozycji środowiskowej. Rejestrowane zmiany masy próbek były bardzo małe – poniżej 0,5%, tzn. ponad dwukrotnie mniejsze niż w przypadku próbek betonów laboratoryjnych wykonanych z tych samych kruszyw grubych. Można uważać, że powyższe różnice zmian masy odzwierciedlają większą szczelność betonu związaną z niższym wskaźnikiem wodno-cementowym w betonie.

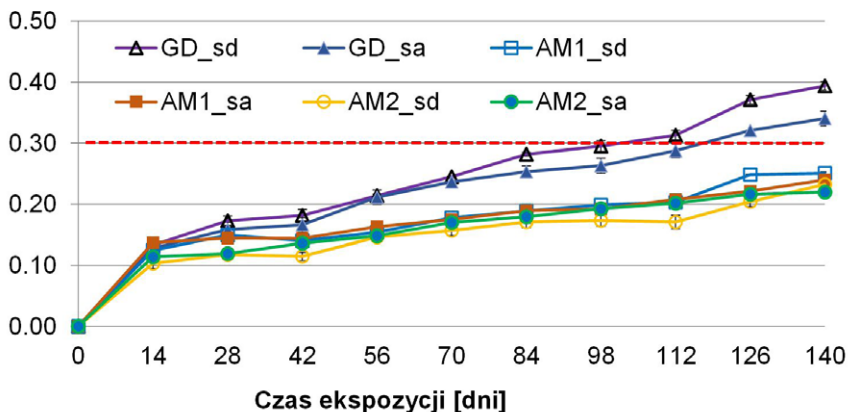
a)

Wydlużenie próbek [mm/m]



b)

Wydlużenie próbek [mm/m]



Rys. 1. Wydlużenie próbek betonu ekspozowanych na cyklicznie zmienną temperaturę, wilgotność i zewnętrzne oddziaływanie 3% roztworu NaCl: a) mieszanki wykonane na budowie drogi ekspresowej; b) mieszanki laboratoryjne

Tabela 4. Wydłużenie, przyrost masy i rezonansowy moduł sprężystości próbek betonu poddanych 10 cyklom naprzemiennej ekspozycji na zmienną temperaturę, wilgotność i zewnętrzne oddziaływanie 3% roztworu NaCl według PB/5/18

Oznaczenie betonu	Kruszywo grube	Kruszywo drobne	Wydłużenie [mm/m]	Przyrost masy [%]	Rezonansowy moduł sprężystości [GPa]	Spadek modułu sprężystości [%]
Mieszanki laboratoryjne						
GD_sd	Granodioryt (GD)	piasek (sd)	0.394±0.007	1.3±0.1	41.7±0.1	4.3
GD_sa		piasek (sa)	0.340±0.012	1.4±0.1	42.3±0.2	0.8
AM1_sd	Amfibolit (AM1)	piasek (sd)	0.233±0.005	1.1±0.1	46.7±0.3	2.9
AM1_sa		piasek (sa)	0.220±0.003	1.1±0.1	46.6±0.1	2.1
AM2_sd	Amfibolit (AM2)	piasek (sd)	0.251±0.002	1.1±0.1	48.4±1.0	2.5
AM2_sa		piasek (sa)	0.240±0.007	1.2±0.0	46.7±0.7	1.9
Mieszanki wykonane na budowie drogi ekspresowej						
S8	Gabro (GA)	piasek (sa)	0.112±0.010	0.5±0.0	48.6±1.2	1.0
S17	Amfibolit (AM1)	piasek (sb)	0.160±0.010	0.4±0.1	50.4±0.6	-0.6
S61	Amfibolit (AM2)	piasek (sc)	0.049±0.002	-0.1±0.0	43.5±0.3	-1.8

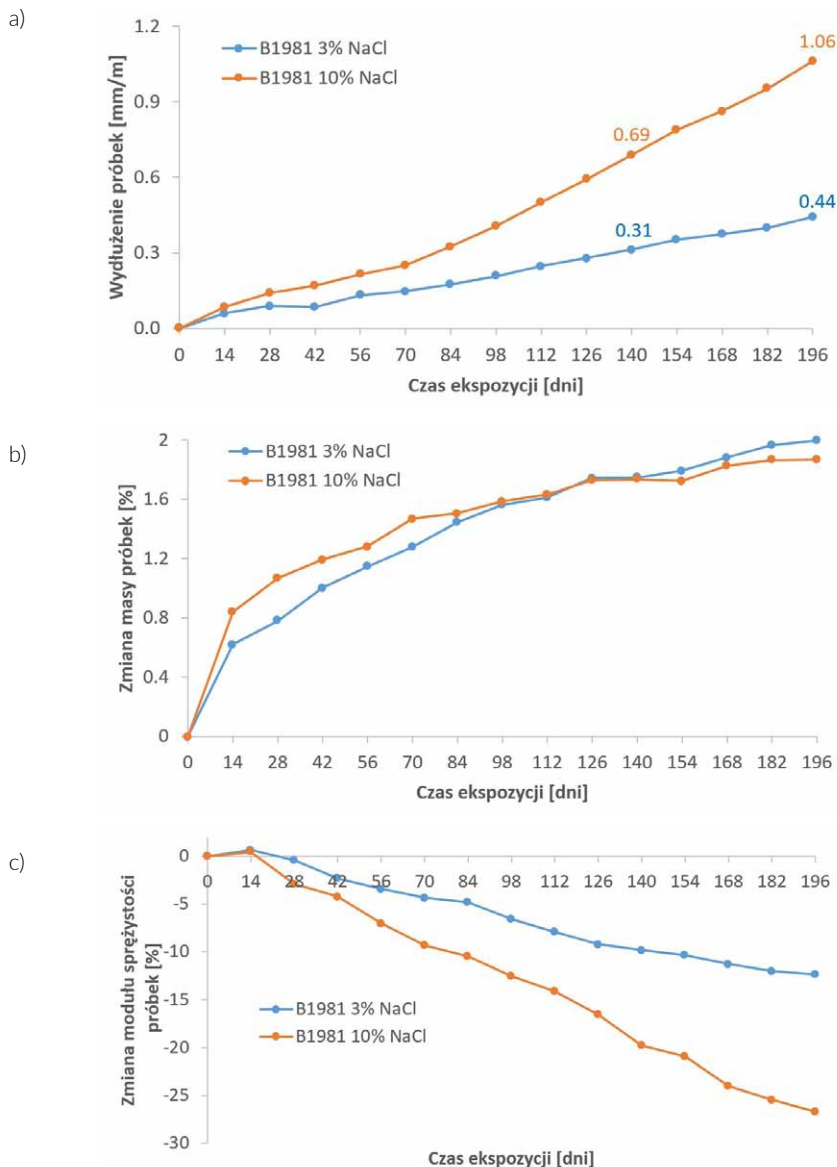
Wydłużenie próbek betonowych w funkcji czasu pokazane na Rysunku 1b ilustruje stały wzrost wydłużenia, przy czym największą szybkość wykazały próbki z kruszywem granodiorytowym. Porównanie obu krzywych oznaczonych GD ujawnia efekt różnicowanej reaktywności piasku – widoczne jest wzmocnienie ekspansywnego zachowania próbek betonu zawierającego piasek reaktywny. Jednak różnice w reaktywności piasku (sd) i (sa) praktycznie nie wpłynęły na ekspansję betonu zawierającego którykolwiek z dwóch kruszyw amfibolitowych: ekspansja przy 10 cyklach ekspozycji mieściła się w przedziale od 0,22 do 0,25 mm/m (Tabela 4). Ekspansja końcowa próbek betonu zawierającego kruszywo granodiorytowe wynosiła 0,34 - 0,39 mm/m, a więc była wyraźnie większa od wartości granicznej 0,30 mm/m ustalonej dla odpowiednich właściwości ASR betonu w nawierzchni przy zewnętrznym dostępie soli odladzającej [20]. Stwierdzono zmniejszenie rezonansowego modułu sprężystości w czasie ekspozycji – redukcja mieściła się w przedziale 0,8 - 4,3% w stosunku do początkowego modułu sprężystości po 28 dniach twardnienia betonu. Nieco większą redukcję modułu sprężystości stwierdzono dla betonu zawierającego kruszywo granodiorytowe (GD) i piasek kwarcowy (sd), co odpowiadało największej zmierzonej ekspansji próbek betonowych.

Nadmierną ekspansję betonu zawierającego granodioryt zaobserwowano, chociaż reaktywność tego kruszywa oznaczona na podstawie procedury przyspieszonej PB/1/18 przypisana została jedynie do kategorii R1 (umiarkowanie reaktywne). Wcześniejsze badania petrograficzne granodiorytu wykazały wszakże obecność kwarcu w postaci rozciągniętych i wydłużonych mikrokryształów oraz w postaci mikro- i kryptokrystalicznej w mikropęknięciach w bezpośrednim sąsiedztwie większych kryształów kwarcu. Duże ziarna kwarcu wykazywały faliste wygaszanie światła. W ziarnach piasku (sd) stwierdzono obfitą obecność kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego. To wyjaśnia podatność na reakcję i nadmierne wydłużenie betonu, potwierdzone również obecnością produktów reakcji alkalia-krzemionka widoczną w przekroju poprzecznym betonu po zakończeniu cyklicznej ekspozycji środowiskowej [19].

Na Rysunku 2 przedstawiono wybrane wyniki międzylaboratoryjnych badań porównawczych przeprowadzonych w celu walidacji biegiłości laboratoriów do określania odporności betonu na uszkodzenia wskutek ASR w warunkach zewnętrznego działania środków odladzających. Pełne wyniki przedstawiono w [21], natomiast tu prezentowane są tylko wyniki pomiarów IPPT PAN. Końcowa ekspansja po 10 cyklach (140 dni) wynosiła 0,69 mm/m i 0,31 mm/m przy stężeniu roztworu NaCl, wynoszącym odpowiednio 10% i 3%. Powiązane wartości z-score dla wyników pomiaru wydłużenia IPPT PAN wyniosły odpowiednio 0,37 i 0,39. Takie wartości z-score są międzynarodowo akceptowanym wskaźnikiem potwierdzającym biegiłość laboratorium uczestniczącego w testach porównawczych [21]. Kształt wykresów wydłużenia betonu w czasie wyznaczony przez pozostałe cztery laboratoria był podobny. Negatywna ocena właściwości ASR betonu przy zewnętrznym oddziaływaniu roztworu chlorku sodu była zgodna zarówno przy stosowaniu 10% roztworu NaCl, jak i 3% roztworu NaCl; dokładność oceny okazała się większa przy wyższym stężeniu roztworu soli.

Związane z wydłużeniem próbek zmiany ich masy podczas ekspozycji środowiskowej (Rys. 2b) wskazują na rosnący trend nasycenia wodą w wyniku rozwoju mikropęknięć, z wyjątkiem wzrostu masy podczas pierwszego cyklu. Obserwuje się też równomierne zmniejszenie rezonansowego modułu sprężystości w czasie ekspozycji, jak pokazano na Rys. 2c. W wyniku ekspozycji środowiskowej trwającej 10 cykli moduł sprężystości uległ zmniejszeniu o 9,8% i 19,8% odpowiednio przy stężeniu NaCl wynoszącym 3% i 10%. Tak wyraźna redukcja właściwości sprężystych jest odzwierciedleniem znacznego spękania betonu w przekrojach.

Znaczenie wyników badania betonu w warunkach cyklicznej ekspozycji na zmiany wilgotności, temperatury i oddziaływanie soli odladzającej jest związane z przydatnością metody badawczej do odzwierciedlenia rzeczywistych efektów środowiskowych i obciążeń eksploatacyjnych. Oddziaływania na beton w nawierzchniach dróg są złożone, polegają na nakładaniu się cyklicznych efektów mechanicznych obciążeń ruchem pojazdów i zmian pogodowych wywołujących wahania temperatury i wilgotności. Zmiany dobowe i sezonowe występują ze znacznie zróżnicowaną szybkością, wywołują sprężyste deformacje niezbrojonych płyt nawierzchni i powstawanie naprężeń, zarówno ściskających jak i rozciągających. Akumulacja cyklicznych efektów oddziaływań prowadzi do lokalnego występowania mikrospeknań w matrycy cementowej, a sprzężenie z zewnętrznym źródłem alkaliów (roztwory soli odladzających) może obniżyć trwałość nawierzchni [5, 6]. Zarówno badania terenowe, jak i laboratoryjne potwierdziły akumulację sodu w betonie na głębokość około 20 mm oraz dwukrotne zwiększenie stężenia Na_2O na powierzchni [22]. Jednak dokładne określenie penetracji środków odladzających w głąb betonu pozostaje nadal wyzwaniem metodycznym. Obserwacje mikrostruktury betonu po cyklicznej



Rys. 2. Wydłużenie próbek betonowych (a), zmiana masy (b) i zmiana modułu sprężystości (c) w badaniach odporności betonu na ASR w warunkach eksploatacyjnych z zewnętrznym oddziaływaniem soli odladzających przy użyciu 3% i 10% roztworu NaCl w ramach badań porównawczych BAsT (wyniki IPPT PAN)

ekspozycji zgodnie z procedurą GDDKiA PB/5/18 wykazały występowanie licznych spękań w matrycy cementowej [23]. Jednocześnie metodą MIP stwierdzono zmniejszenie objętości porów związane ze zmniejszenia objętości dominujących porów w zakresie 0,5 - 1

μm . Konsekwencją zmian mikrostrukturalnych okazał się wzrost początkowej szybkości absorpcji wody, skorelowany z wydłużeniem próbek betonu oraz liczbą spękań obserwowanych pod mikroskopem skaningowym. Obserwacje te potwierdzają większy stopień nasycenia betonu wodą i ewentualnie roztworami soli odladzającej.

Mechanizm promujący wystąpienie reakcji ASR przy zewnętrznym dostępie roztworu chlorku sodu nie został dotąd rozpoznany [24], aczkolwiek sugeruje się, że obecność NaCl ma bezpośredni wpływ na szybkość rozpuszczania krzemionki, niezależnie od wpływu pH. Znana jest też hipoteza dotycząca udziału $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w przebiegu reakcji ASR - sugeruje się, że w przeciwieństwie do NaOH, NaCl nie obniża stężenia Ca^{2+} w roztworze porowym, a im wyższe stężenie Ca^{2+} , tym mniejsza dyfuzja rozpuszczonej krzemionki z ziaren kruszywa, co w konsekwencji skutkuje wyższymi ciśnieniami pęcznienia produktów reakcji ASR.

Uzyskane wyniki ekspansji betonu odpowiadają oczekiwaniom dla dobrze znanych kruszyw niereaktywnych, takich jak gąbrosz i amfibolit, często stosowanych w nawierzchniach z kruszywem odkrytym w warstwie górnej. Wyjaśnieniem ekspansywnego zachowania się betonu z kruszywem granodiorytowym (GD) oraz piaskiem kwarcowym (sd) była obecność kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego oraz kwarcu zdeformowanego występującego w składzie kruszywa. O roli reaktywności kruszywa drobnego w odniesieniu do ekspansji betonu wskutek ASR świadczy wyraźnie tendencja do jej zwiększania przy zastosowaniu umiarkowanie reaktywnego piasku. Efekt ten nie jest jednak bardzo silny w badanym zakresie zróżnicowania piasku.

Postęp reakcji alkalia-krzemionka w betonie jest stosunkowo powolny, dlatego objawy widocznych uszkodzeń na nawierzchniach mogą pojawić się dopiero po 10 - 15 latach, chyba że kruszywa należą do bardzo reaktywnych, powodujących uszkodzenia już po 3 - 5 latach. Nie można z góry przewidzieć intensywności oddziaływania środków odladzających jako zewnętrznych źródeł alkaliów na nawierzchniach drogowych, a ich oddziaływanie może zaostrić reakcję alkalia-krzemionka w betonie. W związku z tym niezależne badania ich wpływu na stabilność właściwości betonu są potrzebne, aby potwierdzić odpowiedni margines bezpieczeństwa dla zastosowań w obiektach narażonych na intensywne oddziaływanie ruchu drogowego i czynników środowiskowych.

Praktyczne znaczenie uzyskanych wyników badań dotyczy możliwości zastosowania omówionej metodyki przewidywania trwałości betonu w sytuacji niepewnej reaktywności kruszywa lokalnego, rozpatrywanego jako możliwy składnik betonu nawierzchniowego. Taką sytuację tworzy umiarkowane występowanie reaktywnych faz krzemionkowych w kruszywach i ewentualne wyniki pomiaru ekspansji próbek bliskie granicy rozdzielającej kategorie reaktywności. Wykorzystując metodykę PB/5/18 w ciągu około sześciu miesięcy możliwa jest walidacja składu mieszanki betonowej pod kątem odporności na reakcję ASR w trudnych warunkach środowiskowych, odzwierciedlających oddziaływanie na beton w silnie obciążonych nawierzchniach drogowych, narażonych w zimie na oddziaływanie środków odladzających.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania doświadczalne betonu napowietrzonego, przeznaczonego na wierzchnią warstwę nawierzchni z eksponowanym kruszywem pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

- Trwałość betonu w symulowanych warunkach eksploatacyjnych z zewnętrznym oddziaływaniem roztworu soli odladzającej została potwierdzona w przypadku mieszanek wykonanych na placu budowy, zawierających kruszywo gabrowe i amfibolitowe frakcji 2/8 mm. Brak istotnej ekspansji i stabilność właściwości sprężystych betonu były skorelowane z odpowiednią odpornością kruszyw na wystąpienie reakcji alkalicznej.
- Wykonany w laboratorium beton zawierający dobrze znane niereaktywne kruszywo amfibolitowe 2/8 nie wykazał szkodliwych skutków ekspozycji na warunki eksploatacyjne z zewnętrznym oddziaływaniem roztworu soli odladzającej. Niewielkie zróżnicowanie reaktywności piasku kwarcowego stosowanego w betonie nie miało wpływu na stabilność objętościową betonu.
- Nadmierna ekspansja betonu zawierającego kruszywo granodiorytowe 2/8, zaobserwowana w przypadku zewnętrznego oddziaływania roztworu soli odladzającej, była skorelowana z obecnością kwarcu mikro- i kryptokrystalicznego oraz kwarcu zdeformowanego w kruszywie grubym.
- Międzylaboratoryjne badania porównawcze przeprowadzone przez pięć laboratoriów na betonie z niemieckim kruszywem granitowym konsekwentnie wykazały jego nadmierną ekspansję w symulowanych warunkach eksploatacji nawierzchni. Stwierdzono, że ekspansja wzrosła dwukrotnie, gdy stężenie zewnętrznego roztworu NaCl zwiększono z 3% do 10%. Zmniejszony rezonansowy moduł sprężystości był skorelowany z obecnością licznych spękań w osnowie i ziarnach kruszywa.

Podziękowania

Referat opracowano na podstawie danych zgromadzonych przy realizacji Projektu „Reaktywność alkaliczna krajowych kruszyw”, Nr RID-I/37, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach programu Rozwój Innowacji Drogowych (RID).

Literatura

- [1] M.A. Glinicki, Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019
- [2] P. Nita, M. Linek, M. Wesółowski, Betonowe i specjalne nawierzchnie lotniskowe. Teoria i Wymiarowanie Konstrukcyjne. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 2022
- [3] P. Nita, M. Linek, Oddziaływanie mediów stosowanych w eksploatacji statków powietrznych na trwałość lotniskowych nawierzchni betonowych, Journal of KONBiN 53 (1), 95-108, 2023
- [4] J. Zhang, J. Wang, Y. Li, J. Yuan, Y. Wu, Research progresses on salt scaling and protective methods for concrete pavements, Construction and Building Materials, 342,127993, 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127993>
- [5] E. Krütt, F. Weise, B. Meng, Einfluss einer druckschwellinduzierten Degradation von Fahrbahndeckenbeton auf die schädigende AKR, Beton- und Stahlbetonbau 115, Heft 10, 779-788, 2020; DOI: 10.1002/best.202000017
- [6] R. Breitenbücher, Besonderheiten bei Alkali-Kieselsäure-Reaktionen in Betonfahrbahndecken, Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 8, 521-527, 2007; DOI: 10.1002/best.200700563
- [7] U.S. Army Corps of Engineers, Transportation Systems Center, Report on Alkali-Aggregate Problems on Portland Cement Concrete Airfield Pavements, Omaha, NE, 2006
- [8] P.R. Rangaraju, J. Olek, Potential for Acceleration of ASR in Presence of Pavement Deicing Chemicals, Final Report IPRF-01-G-002-03-9, Innovative Pavement Research Foundation, Washington DC, 2007
- [9] I. Fernandes, Ö. Andic-Cakir, C. Giebson, K. Seyfarth, Mainland Europe, Turkey and Cyprus, in: "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review". Edited by Ian Sims, Alan B. Poole, CRC Press, London 2017

- [10] C. Giebson, K. Seyfarth, H.-M. Ludwig, Influence of sodium chloride on ASR in highway pavement concrete. in: Bernardes, H., Hasparyk, N.P. (eds.): Proceedings of the 15th ICAAR, São Paulo, Brazil, July 3-7, 2016
- [11] Z. Owsiak, J. Zapala-Slaweta, P. Czapiak, Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 63 (1), 23-29, 2015
- [12] O. Mielich, V. Zwerger, Zustandserfassung von Betonfahrbahndecken mit Verdacht auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Beton- und Stahlbetonbau 114, Heft 12, 899-910, 2019; DOI: 10.1002/best.201900059
- [13] M.A. Glinicki, D. Józwiak-Niedźwiedzka, A. Antolik, K. Dziedzic, M. Dąbrowski, K. Bogusz, Diagnosis of ASR damage in highway pavement after 15 years of service in wet-freeze climate, Case Studies in Construction Materials, 17, e01226, 2022; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01226>
- [14] M.A. Glinicki, D. Józwiak-Niedźwiedzka, A. Antolik, K. Dziedzic, M. Dąbrowski, K. Bogusz, P. Lisowski, Analysis of causes of damage to single-layer concrete highway pavement, Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 21, 3, 183-201, 2022; <https://doi.org/10.7409/rabd.022.011>
- [15] Ch. Müller, I. Borchers, E. Eickschen, Experience with ASR test methods: advice on obtaining practical evaluation criteria for performance testing and aggregate testing, Cement International, 11(3), 86-93, 2013
- [16] ARS, Prevention of Damage to Concrete Pavements as a Result of Alkali-Silica Reaction; General Circular for Road Construction (ARS) 04/2013, Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development, Bonn, Germany 2013
- [17] GDDKiA, Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich (+ załączniki), GDDKiA Warszawa 2019; <https://www.gov.pl/web/gddkia/reaktywnosc-kruszyw>
- [18] GDDKiA, Warunki wykonania i odbioru robót budowlanych. D-05.03.04 v02, Nawierzchnia z betonu cementowego (dokument wzorcowy). Warszawa, 30.09.2019, <https://www.gov.pl/web/gddkia/nawierzchnie>
- [19] M.A. Glinicki, K. Bogusz, D. Józwiak-Niedźwiedzka, M. Dąbrowski, ASR performance of concrete at external alkali supply - effects of aggregate mixtures and blended cement. International Journal of Pavement Engineering, 24:1, 2023; DOI: 10.1080/10298436.2023.2171038
- [20] Ch. Müller, M. Seidel, M. Böhm, J. Stark, H.-M. Ludwig, K. Seyfarth, AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche. Straßenbau Heft S 90, Bergisch Gladbach, 2015
- [21] I. Borchers, BAST-Vergleichsversuch 2021: 60°C – Betonversuch mit Alkalizufuhr, AKR-Gutachtersitung, VDZ, Dusseldorf, 2022
- [22] H. Zeitlhofer, B. Achleitner, G. Maier, C. Bos, M. Peyerl, S. Krispel, ASR testing versus field experience in Austria, 16th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Lisbon, Portugal, 2022, 527-538
- [23] M. Dąbrowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, A. Antolik, M.A. Glinicki, Effects of cyclic wet-dry-external alkali exposure on microstructure and water permeability of air-entrained pavement concrete. 13th International Symposium on Concrete Roads, Berlin, 2018
- [24] E. Kotwica, K. Florek, Wpływ soli litu na reakcję krzemionki ze związkami sodu w zaprawach z cementu glinowego poddanych korozji w roztworach środków odładzających. Cement Wapno Beton, 24, 1, 65-67, 2019