



MICHAŁ A. GLINICKI

Instytut Podstawowych  
Probleatów Techniki PAN,  
Warszawa  
mglinic@ippt.pan.pl

## Właściwości betonu nawierzchniowego z kruszywem odkrytym – wpływ rodzaju cementu i pielęgnacji

Technologia budowy drogowych nawierzchni betonowych z kruszywem odkrytym stosowana jest z powodzeniem w krajach europejskich, jednakże w USA nie zdobyła popularności. Jest

to technologia nawierzchni dwuwarstwowej – warstwy są układane i zagęszczane w niewielkim odstępie czasu, tak aby zachować monolityczne połączenie międzywarstwowe. Beton warstwy górnej przyczynia się do spełnienia wymagań nośności całego przekroju nawierzchni, ale spełnia też wymagania odporności na oddziaływanie czynników środowiskowych i eksploatacyjnych. Prawidłowo wykonana nawierzchnia z górną warstwą z kruszywem odkrytym zapewnia projektowane właściwości przeciwoślizgowe bez nadmiernego wzrostu hałasu wywołanego ruchem pojazdów. Nie jest to typowa „warstwa ścieralna”, niekiedy błędnie tak nazywana – ponieważ nie ulega ścieraniu, jej projektowana trwałość jest nie mniejsza niż trwałość całej konstrukcji nawierzchni betonowej. Wykonanie górnej powierzchni warstwy z kruszywem odkrytym wymaga doświadczenia wykonawcy i odpowiedniej selekcji materiałów, a popełnione błędy mogą negatywnie wpłynąć na właściwości przeciwoślizgowe, równość podłużną, czyli komfort jazdy względnie spowodować przedwczesne obniżenie tych właściwości funkcjonalnych. Omówienie tych zagadnień jest m.in. przedmiotem monografii [1]. Wprowadzenie do technologii

Michał A. Glinicki – profesor zwyczajny, doktor habilitowany, inżynier budownictwa – absolwent Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, kierownik pracowni w Instytucie Podstawowych Probleatów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Członek American Concrete Institute i RILEM. Ekspert Komitetów Technicznych RILEM w dziedzinie trwałości betonu w środowisku oddziaływań sprzężonych (chemicznych, fizycznych, mechanicznych) oraz reaktywności alkalicznej kruszyw w warunkach eksploatacji konstrukcji betonowych. Autor czterech monografii, w tym o trwałości betonu w nawierzchniach drogowych, o betonie w konstrukcjach osłonowych elektrowni jądrowych oraz o zbrojeniu rozproszonym betonu. Laureat nagrody naukowej im. F. Jasińskiego, przyznanej przez Wydział Nauk Technicznych Polskiej Akademii Nauk. Wykładał na Uniwersytecie Purdue w USA, w Szkole Inżynierii Lądowej jako profesor wizytujący im. Edwarda M. Curtisa. Jego działalność naukowa obejmuje inżynierię materiałów wieloskładnikowych, specjalizuje się w ocenie mikrostruktury i trwałości w środowiskach agresywnych i pod obciążeniem mechanicznym, ocenia efekty oddziaływania promieniowania jonizującego. Prowadzi działalność ekspercko-konsultingową w zakresie technologii betonu w konstrukcjach budowlanych, nawierzchniach i drogowych obiektach inżynierskich. Wieloletni redaktor naczelny kwartalnika „Roads and Bridges – Drogi i Mosty”, wydawanego przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów.

nawierzchni betonowej z kruszywem odkrytym przedstawił prof. A. Szydło z zespołem w [2] i [3]. W niniejszym artykule podsumowano stan rozpoznania zagadnienia na podstawie powyższych publikacji oraz omówiono wyniki badań przeprowadzonych w IPPT PAN [4], dotyczących właściwości i mikrostruktury betonu z kruszywem odkrytym, poddanego różnicowanej pielęgnacji.

### Zasady projektowania betonu

Projektowanie składu betonu przeznaczonego na górną warstwę nawierzchni kategorii ruchu KR5-KR7 z kruszywem odkrytym polega na takim doborze składników i proporcji mieszanki, aby spełnić przede wszystkim wymagania recepturowe klasy środowiska oraz wymagania wytrzymałości i mrozoodporności. Biorąc pod uwagę warunki ekspozycji środowiskowej, przy projektowaniu betonu na nawierzchnie dróg ekspresowych i autostrad w Polsce stosuje się normowe określenie agresywności środowiska podane w tabeli 1. Na drogach o mniejszym znaczeniu uzasadniony może być wybór klas środowiska XF3 i XM1. Z przyjęcia klasy ekspozycji i klasy środowiska wynikają normowe ograniczenia składu według tabeli 2.

Tabela 1. Środowisko betonu nawierzchniowego w kategorii ruchu KR5–KR7 [1]

Warstwa betonu	Klasa ekspozycji wg PN-EN 206, PN-B-06265	Kategoria środowiska wg CEN/TR 16349
Górna lub nawierzchnia jednowarstwowa	XF4, XM2	E3
Dolna	XF4	E3

Wymagania dotyczące odpowiedniej wytrzymałości betonu, odporności na cykliczne zamrażanie–rozmarzanie, odporności na złuszczenia powierzchniowe wskutek oddziaływania mrozu i środków odladzających oraz odpowiedniej charakterystyki porów powietrznych są zawarte w [5]. Przyjmowane klasy ekspozycji, klasa środowiska, ograniczenia składu betonu oraz wymagania katalogowe według [3] i [5] są w dużym stopniu zbieżne z wymaganiami stosowanymi w Niemczech i w Austrii, odpowiednio na podstawie ZTV Beton-StB i RVS 08.17.02.

Przy tak sformułowanych wymaganiach projektowanie składu betonu jest empiryczne, często wykorzystuje się sprawdzone receptury archiwalne. W konsekwencji w warstwie górnej dwuwarstwowej nawierzchni drogowej na ogół

Tabela 2. Ograniczenia składu betonu przeznaczonego do stosowania w klasach ekspozycji XF4, XM2 i klasie środowiska E3 na podstawie PN-EN 206, PN-B-06265, CEN/TR 16349 [1]

Charakterystyka składu mieszanki	Klasa ekspozycji, klasa środowiska		
	XF4	XM2	E3
Maks. w/c	0,45	0,50	–
Min. zawartość cementu [kg/m <sup>3</sup> ]	340	300	–
Min. klasa wytrzymałości betonu	C 30/37	C 30/37	–
Min. zawartość powietrza [%]	4,0	–	–
Właściwości kruszywa	mrozoodporność wg PN-EN 12620	M <sub>DE</sub> ≤25 – frakcja 2/8; M <sub>DE</sub> ≤20 – frakcja 8/16*	niereaktywne**)

\*) współczynnik ścieralności mikro-Devala według PN-EN 12620

\*\*\*) kategoria reaktywności R0 według [5]

stosuje się beton o dużej zawartości cementu ok. 420 kg/m<sup>3</sup> i małym współczynniku wodno-cementowym. Wobec dużej projektowanej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu  $f_{ti} \geq 5,5$  MPa współczynnik w/c jest mniejszy od 0,40. Wymaganą jakość kruszywa grubego na ogół określają następujące właściwości, wyznaczone zgodnie z PN-EN 12620: LA<sub>20</sub>, PSV<sub>53</sub>, f<sub>1</sub>, C<sub>100/0</sub>, FI<sub>15</sub> lub SI<sub>15</sub>, mrozoodporność w soli ≤ 6%. Jako kruszywo grube o uziarnieniu do 8 mm stosuje się zwłaszcza kruszywa łamane ze skał o dużej odporności na polerowanie, takich jak np. gabra. Niezbędną konsystencję i właściwe napowietrzenie mieszanki [6] uzyskuje się poprzez użycie domieszek upłynniających i napowietrzających, spełniających wymagania kompatybilności wg PN-EN 206.

Spośród wielu dostępnych rodzajów cementu do betonu nawierzchniowego stosuje się tylko nieliczne z uwagi na wysokie wymagania procesu technologicznego przy budowie nawierzchni dwuwarstwowej metodą ślizgową i odkrywaniu kruszywa w warstwie wierzchniej, oraz wysokie wymagania właściwości użytkowych i trwałości w warunkach eksploatacji, odpowiadającej kategorii ruchu KR5-KR7. Cementów specjalnych, produkowanych na podstawie aprobat technicznych na cement „drogowy”, o składzie i właściwościach specjalnie dobranych do zamierzonych zastosowań, już się nie stosuje. Najczęściej stosuje się cement CEM I 42,5 N-NA. Jest to zgodne z praktyką niemiecką, chociaż do roku 2008 była tam widoczna dominacja stosowania CEM I 32,5 R. Na podstawie wytycznych RVS 08.17.02 w Austrii stosuje się jeden rodzaj cementu CEM II/...S, tzw. cement drogowy (*Deckenzement*) zgodny z ONORM B 3327-1. Cement charakteryzuje się 28-dniową wytrzymałością na zginanie 7 MPa oraz powierzchnią właściwą według Blaina ≤ 4000 cm<sup>2</sup>/g. W składzie cementu znajduje się ok. 20% granulowanego żużla wielkopieczowego.

Newralgiczne etapy technologii układania nawierzchni z kruszywem odkrytym, oprócz właściwego projektowania składu mieszanki betonowej i wykonania warstwy dolnej, wymienione są w tabeli 3. Kontaktowy preparat opóźniający wiązanie cementu powinien być przydatny do spryskiwania betonu natychmiast po wyrównaniu, ilość i stężenie preparatu dobiera się w zależności od zakładanej głębokości makrotekstury. Preparat opóźniający nie powinien wykazywać szkodliwego oddziaływania na właściwości betonu. Pod na-

zwą preparatu pielęgnacyjnego rozumie się ciekły produkt naniesiony metodą natryskową na powierzchnię, wytwarzający powłokę zabezpieczającą przed nadmiernym odparowaniem wody. Dozowanie preparatów opóźniającego i pielęgnacyjnego w zależności od szybkości wiązania cementu w określonych warunkach pogodowych określa się na podstawie doświadczeń wykonawczych. Znane są preparaty kompleksowe o ustalonych przez producenta proporcjach substancji opóźniających wiązanie cementu i zabezpieczających przed parowaniem wody. W niektórych krajach (Belgia, UK) zamiast natrysku preparatu pielęgnacyjnego stosuje

się przykrywanie folią polietylenową, co pozwala uniknąć kłopotów z nierównomiernym natryskiem wykonywanym w wietrzne dni. Nierówny rozkład preparatu opóźniającego i pielęgnacyjnego na powierzchni może negatywnie wpływać na głębokość tekstury i właściwości użytkowe warstwy z kruszywem odkrytym, a zwłaszcza lokalnie pogorszyć przyczepność eksponowanych ziaren kruszywa do zaczynu cementowego. Zaletą stosowania szczelnej folii polietylenowej jest zapewnienie najlepszych z możliwych warunków pielęgnacji wilgotnościowej betonu po ułożeniu, co jest nadzwyczaj pożądane w przypadku cementów z dodatkami mineralnymi, których wczesne twardnienie przebiega powoli.

Tabela 3. Newralgiczne procesy technologiczne podczas układania nawierzchni z kruszywem odkrytym

Etap	Roboty
„1”	właściwe zagęszczenie betonu warstwy górnej przy utrzymaniu właściwej charakterystyki porów powietrznych oraz zachowaniu monolitycznego połączenia z warstwą dolną
„2”	równomierne pokrycie powierzchni preparatem opóźniającym wiązanie cementu i preparatem pielęgnującym, zapobiegającym wysychaniu powierzchni
„3”	w odpowiednim czasie usunięcie warstewki niezwiązanego zaczynu z powierzchni przez szczotkowanie
„4”	bezwłoczne i równomierne pokrycie powierzchni preparatem pielęgnującym po zakończeniu szczotkowania
„5”	w odpowiednim czasie wykonanie nacięcia szczelin w nawierzchni

Na fotografii 1 pokazano ilustrację robót prowadzonych na etapie „2” i „3”, a także końcowy efekt robót w postaci widoku tekstury gotowej nawierzchni. Przykłady pochodzą z budów krajowych dróg ekspresowych. Warto zwrócić uwagę na widoczną makroteksturę nawierzchni na fot. 1c i podkreślić, że współczynnik tarcia zmierzony jeszcze przed oddaniem do ruchu wynosił od 0,56 do 0,67 przy prędkości pomiarowej 60 km/h. Dowodzi to skuteczności zastosowanej technologii.

Jak wykazali Jeong i in. [7], wysychanie powierzchni betonu w pierwszych godzinach po ułożeniu nawierzchni może powodować efekty wywołujące obniżenie długotrwałej funkcjonalności nawierzchni. Badania Skarabis [8] wyka-

a)



b)



c)



Fot. 1. Ilustracje poszczególnych faz procesów technologicznych pokrywania nawierzchni preparatem opóźniająco-pielęgnującym i szczotkowania oraz widok tekstury gotowej nawierzchni (fotografie autora)

zały natomiast, że pielęgnacja betonu tuż po teksturowaniu (odkrywaniu kruszywa) w większym stopniu wpływa na odporność na cykle zamrażania i odmrażania aniżeli wcze-

śniejsza pielęgnacja wykonana po wbudowaniu betonu. Warto stwierdzić, że na budowach zagranicznych, można zauważyć stosowanie urządzeń łączących procesy „3” i „4” według tabeli 3, tj. spryskiwacze są zamontowane na jednym ramieniu bezpośrednio za szczotkami. Szczelność powłok pielęgnacyjnych dopuszczalna według krajowych aprobat technicznych, wynosząca minimum 50%, jest znacznie niższa niż szczelność według wymagań austriackich lub francuskich NF P18-370 (współczynnik zamykania min. 90% w ciągu 6 godzin, 85% w ciągu 24 godzin). Przedstawione rozpoznanie stanu techniki stanowiło motywację do podjęcia badań właściwości i mikrostruktury betonu z kruszywem odkrytym, poddanego zróżnicowanej pielęgnacji.

## Badania doświadczalne

### Materiały i próbki

Zgodnie z wymaganiami recepturowymi zaprojektowano napowietrzone mieszanki betonowe o składzie podanym w tabeli 4. Zastosowano dwa rodzaje cementu CEM I 42,5 N oraz CEM III/A42,5 N (skład i właściwości podano w [4]). Mieszanka z CEM I oraz  $w/c = 0,34$  była traktowana jako mieszanka odniesienia. Dwie pozostałe mieszanki zostały zaprojektowane w celu sprawdzenia efektów zmiany składu i właściwości cementu oraz zmiany  $w/c$ . Cement CEM III/A nie jest stosowany w warstwie nawierzchni z odkrytym kruszywem, wybór był uzasadniony intencją sprawdzenia efektów pielęgnacji w skrajnym przypadku redukcji zawartości klinkieru o 50%.

Tabela 4. Receptury mieszanki betonowej

Oznaczenie betonu	Rodzaj cementu	Zawartość [kg/m <sup>3</sup> ]					
		ce-ment	woda	kruszywo		SP <sup>3)</sup>	AEA <sup>4)</sup>
				drob- ne <sup>1)</sup>	gru- be <sup>2)</sup>		
C I_0.34	CEM I 42.5N SR3/NA	430	145	553	1326	3,0	0,9
C III_0.34	CEM III/A 42.5N LH/HSR/NA		145	553	1326	3,0	0,9
C I_0.37	CEM I 42.5N SR3/NA		160	542	1298	1,7	0,7

<sup>1)</sup> piasek 0/2 mm;

<sup>2)</sup> kruszywo łamane gąbko 2/5 mm i 4/8 mm;

<sup>3)</sup> super plastyfikator ChrysoPlast Omega 132;

<sup>4)</sup> domieszka napowietrzająca ChrysoAir A.

Wykonano próbki płytowe o wymiarach 800×500×80 mm, belki o wymiarach 150×150×700 mm, próbki sześcienne o boku 150 mm i 100 mm. Po zagęszczeniu mieszanki w formach płytowych na stole wibracyjnym powierzchnię zacierano ręcznie i następnie pokryto warstwą preparatu opóźniającego ChrysoRoad TSR 02 w ilości około 0,1 kg/m<sup>2</sup>. Po odpowiednim czasie twardnienia cienką warstwę zaprawy usunięto za pomocą myjki ciśnieniowej, odsłaniając na powierzchni ziarna kruszywa do głębokości około 1 mm. Formy płytowe z betonem umieszczono w suchym pomieszczeniu laboratoryjnym w temperaturze 20 ± 2°C. Jedna z obu

identycznych płyt została pokryta środkiem pielęgnacyjnym ChrysoCure HPE (spełniającym wymagania współczynnika zamykania wg NF P18-370), natomiast drugą płytą pozostawiono bez pielęgnacji. Po 2 dniach próbki rozformowano i przechowywano w warunkach suchego pomieszczenia laboratoryjnego do osiągnięcia wieku 90 dni. Normowe próbki sześciennie i belki zostały wykonane bez eksponowania kruszywa; ich przechowywanie w warunkach wysokiej wilgotności przebiegało zgodnie z wymaganiami normowymi.

### Metody badań

Zgodnie z odpowiednimi normami PN-EN wykonano badania wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Charakterystykę porów powietrznych wyznaczono na zgladach polerowanych wyciętych z próbek sześciennych zgodnie z PN-EN 480-11, zachowując długość linii trawersowej 2400 mm przy zmniejszonej do 80 mm wysokości przekroju (zgodnie z [5]). Szybkość powierzchniowej absorpcji wody oznaczono zgodnie z ASTM C1585 na próbkach o kształcie dysku o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm, wyciętych z próbek płytowych z eksponowanym kruszywem. Mrozoodporność powierzchniową wyznaczono zgodnie z CEN/TS 12390-9 na próbkach o wymiarach  $150 \times 150 \times 80$  mm, modyfikując procedurę, aby 3% roztwór NaCl oddziaływał na powierzchnię betonu z odkrytym kruszywem. Ocenę odporności na powierzchniowe złuszczenie po 56 cyklach zamrażania-rozmrażania przeprowadzono zgodnie z kryteriami normy szwedzkiej SS 137244.

### Wyniki badań i ich ocena

#### Podstawowe właściwości mieszanki i betonu

Wyniki badań mieszanki betonowej wykazały zbliżoną gęstość 2435–2400 kg/m<sup>3</sup> oraz zbliżone napowietrzenie wszystkich mieszanek w przedziale 5,3–6%. Projektowany opad stożka 50 mm został w przybliżeniu osiągnięty, ale po upływie 70 minut zaobserwowano spadek konsystencji do 15–30 mm opadu stożka, dość typowy w przypadku mieszanek o małym w/c. Charakterystyka porów powietrznych w betonie została przedstawiona w tabeli 5 przy przyjęciu oznaczeń według PN-EN 480-11:

- A – całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie;
- $\alpha$  – powierzchnia właściwa systemu porów powietrznych;
- $\bar{L}$  – wskaźnik rozmieszczenia porów;
- $A_{300}$  – zawartość mikroporów o średnicy poniżej 300 mm.

Uzyskane wyniki wskazują na zbliżoną mikrostrukturę porów w trzech seriach próbek. Kryteria oceny zgodności z wymaganiami wieloletniej trwałości w środowisku XF4:  $\bar{L} \leq 0,18$  mm,  $A_{300} \geq 1,8\%$  są spełnione z zapasem. O korzystnej charakterystyce porów powietrznych świadczą też proporcje zawartości mikroporów do całkowitej zawartości porów, przekraczające 50% we wszystkich trzech rodzajach betonu. W odróżnieniu od wcześniejszych obserwacji [9], nie stwierdzono pogorszenia charakterystyki porów na skutek zamiany cementu CEM I na cement CEM III/A, co pozytywnie świadczy o efektywności zestawu domieszek.

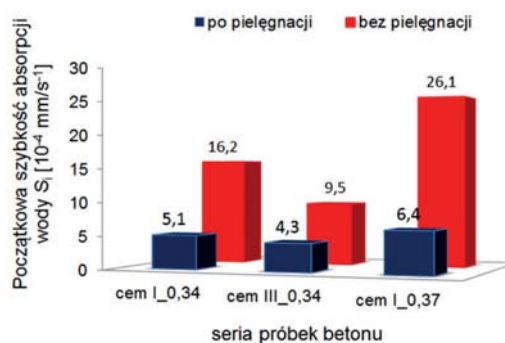
Tabela 5. Charakterystyka porów powietrznych w betonie stwardniałym [4]

Oznaczenie betonu	Charakterystyka porów powietrznych			
	A [%]	$\alpha$ [mm <sup>-1</sup> ]	$\bar{L}$ [mm]	$A_{300}$ [%]
C I_0,34	6,06	32,61	0,14	3,63
C III_0,34	6,31	33,02	0,13	3,90
C I_0,37	6,27	33,78	0,13	3,66

Badania wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawione w tabeli 6 wskazują znaczne różnice wytrzymałości betonu w wieku 7 dni. Po upływie 28 dni wytrzymałość jest zbliżona, mieści się w przedziale 60–65 MPa. Zwiększenie współczynnika w/c do 0,37 wywołało względny spadek wytrzymałości o około 14%. Nie zaobserwowano zasadniczych różnic wytrzymałości na zginanie i na rozłupywanie. Średnie wartości wytrzymałości mieściły się odpowiednio w przedziałach od 7,8 do 8,6 MPa i od 3,9 do 4,9 MPa. Wymagania wytrzymałościowe, odpowiednie dla najwyższej kategorii ruchu KR7, zostały spełnione z zapasem w trzech przypadkach receptur betonu.

Tabela 6. Wytrzymałość próbek betonu: na ściskanie w wieku 7 i 28 dni, na rozciąganie przy zginaniu oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu w wieku 28 dni [4]

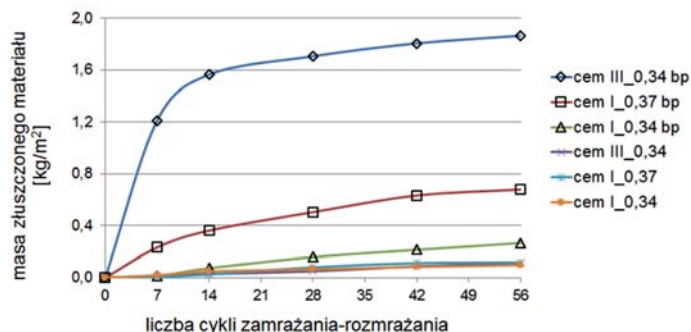
Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie w wieku [MPa]		Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość na rozłupywanie [MPa]
	7 dni	28 dni		
C I_0,34	57,6±0,6	63,5±0,7	8,6±0,6	4,4±0,2
C III_0,34	39,2±0,6	66,8±0,6	7,8±0,1	4,9±0,3
C I_0,37	49,8±0,3	60,7±0,5	8,1±0,2	3,9±0,3



Rys. 1. Wpływ pielęgnacji na szybkość absorpcji wody w warstwie betonu z eksponowanym kruszywem (oznaczenie betonu zgodnie z tabelą 3)

Zróznicowanie pielęgnacji warstwy betonu z kruszywem odkrytym wywołało znaczące pogorszenie wskaźnika nasiąkliwości oraz odporności na powierzchniowe złuszczenie. Ilustrację obserwacji doświadczalnych przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Pomiarzy szybkości absorpcji wody wykazały niewielkie zróżnicowanie  $S_i$  w przypadku właściwie pielęgnowanych powierzchni betonu. W przypadku braku pielęgnacji zaobserwowano znaczny wzrost  $S_i$ ; dwukrotny w przypadku CEM III/A i 3,5-krotny przy zwiększonym współczynnikiem w/c (rys. 1). Interesująca obserwacja dotyczy

roli żuźla wielkopieczowego jako składnika cementu: stwierdzono najmniejszą początkową szybkość absorpcji  $4,3 \cdot 10^{-4}$  mm/s<sup>1/2</sup>, o 40% niższą niż w przypadku betonu referencyjnego z CEM I. Brak właściwej pielęgnacji był bardziej istotny w przypadku betonu o większym w/c; wówczas początkowa szybkość absorpcji była aż 5 razy większa niż w przypadku właściwie pielęgnowanego betonu referencyjnego.



Rys. 2. Wpływ pielęgnacji na odporność na powierzchniowe zruszczenie betonu w warstwie z ekspozycją kruszywa (ozn. betonu zgodnie z tabelą 3, bp-próbki bez pielęgnacji)

Wcześniejsza pozytywna ocena rozkładu wielkości porów w betonie napowietrzonym pozwala na przewidywanie dużej odporności betonu na powierzchniowe zruszczenia wskutek oddziaływania mrozu i soli odladzającej [1]. Bezpośrednie sprawdzenie mrozoodporności powierzchniowej na podstawie masy zruszczeń powierzchniowych (rys. 2) potwierdza przewidywaną dużą odporność w przypadku dobrze pielęgnowanych próbek betonu. Całkowita masa zruszczeń po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania ( $m_{56}$ ) mieściła się w granicach od 0,10 do 0,12 kg/m<sup>2</sup>. Stosując skalę oceny według szwedzkiej normy SS 137244 beton wykonany według trzech receptur, niezależnie od rodzaju cementu i współczynnika w/c, kwalifikuje się do klasy „bardzo dobrej” odporności na powierzchniowe zruszczenie. Brak pielęgnacji powoduje natomiast radykalne obniżenie odporności betonu. W przypadku betonu z cementem CEM III/A stwierdzono wzrost  $m_{56}$  do 1,8 kg/m<sup>2</sup> (klasa „niedostatecznej” odporności na powierzchniowe zruszczenie). Brak pielęgnacji w przypadku betonu o w/c=0,37 wywołał wzrost masy zruszczeń do 0,7 kg/m<sup>2</sup>, której odpowiada jedynie kategoria „dopuszczalnej” odporności na powierzchniowe zruszczenie. Zaobserwowany znaczny przyrost masy zruszczeń w przypadku betonu z cementem żuźlowym można przypuszczalnie przypisać zwiększonej karbonatyzacji betonu [9]. Beton z tego cementu okazał się najbardziej podatny na niedostatek pielęgnacji. Potwierdza to szczególną jej istotność w przypadku stosowania cementu z dodatkami mineralnymi, z uwagi na wolniejszy przebieg wiązania i twardnienia.

## Dyskusja wyników badań

Odpowiednią recepturę betonu o projektowanej dużej wytrzymałości na rozciąganie, właściwą w środowisku XF4, XM2 i E3, uzyskuje się przy zastosowaniu kruszywa ze skały bardzo twardej i odpornej na reakcję z wodorotlenkami sodu

i potasu występującymi w cieczy porowej betonu, o dużej odporności na polerowanie, o preferencji ziaren kubicznych. Przy jednoczesnym obniżeniu współczynnika wodno-cementowego poniżej 0,40, uzyskuje się redukcję porowatości kapilarnej stwardniałego zaczynu i strefy kontaktu z ziarnami kruszywa, pożądaną z uwagi na dużą przyczepność ziaren i odporność betonu na zruszczenia powierzchniowe, ale pod warunkiem uzyskania wysokiego stopnia hydratacji cementu, co z kolei wymaga starannej ochrony przed wczesnym odparowaniem wody z mieszanki [1]. Teoretycznie przy wskaźniku w/c poniżej 0,40 pojawia się także zagrożenie tzw. samoosuszenia zaczynu cementowego, prowadzącym ewentualnie zarówno do powstawania spękań, jak również przyhamowaniem hydratacji cementu. Względne zmiany masy zruszczeń  $m_{56}$  jak też szybkości absorpcji  $S_i$  wskutek braku pielęgnacji nie potwierdzają negatywnego efektu samoosuszenia. Obserwowany duży wzrost  $m_{56}$  w przypadku CEM III\_0,34 można było jakościowo przewidzieć na podstawie [9].

Do omówienia znaczenia uzyskanych wyników niezbędne jest przywołanie pojęcia projektowanej makrotekstury nawierzchni betonowej z kruszywem odkrytym. Wymaganą makroteksturę określa jej głębokość w przedziale od 0,8 do 1,3 mm. Masa zruszczeń powierzchniowych  $m_{56} = 1,86$  kg/m<sup>2</sup> (rys. 2) przy gęstości zaprawy około 2100 kg/m<sup>3</sup> odpowiada objętości zruszczonej warstwy materiału o grubości 0,9 mm, równomiernie rozłożonej na powierzchni 1 m<sup>2</sup>. Zatem obniżona powierzchniowa mrozoodporność betonu przyczyniłaby się do dwukrotnego zwiększenia głębokości makrotekstury, a przy nierównomiernym zruszczaniu lokalne nierówności byłyby jeszcze większe. Ekspozowane ziarna kruszywa odstaniały się nadmiernie. W konsekwencji można byłoby oczekiwać zwiększenia hałaśliwości nawierzchni, obniżenia komfortu jazdy określanego wskaźnikiem równości IRI i ewentualnie wrywania ziaren z powierzchni przez koła pojazdów. Takich negatywnych skutków można się spodziewać przy niewłaściwej pielęgnacji nawierzchni z kruszywem odkrytym, np. nierównomiernym pokryciu lub miejscowym braku pokrycia nawierzchni środkiem pielęgnacyjnym.

Zniszczenie w warunkach agresji XF4 następuje zazwyczaj w formie odspajania warstewek zaprawy, jednakże przy niedostatecznej pielęgnacji betonu można postulować występowanie spękań w strefie przyczepności ziaren kruszywa do zaczynu, ewentualnie prowadzącej do odspajania ziaren. Korzystny wpływ właściwego napowietrzenia betonu teoria wyjaśnia na podstawie obserwacji skrócenia próbek przy ochładzaniu w odróżnieniu od rozszerzania w przypadku betonu nienapowietrzonego [10]. Efekt niweluje niedopasowanie termicznej odkształcalności warstwy lodu i warstwy zaprawy powodując zmniejszenie zruszczeń powierzchniowych. W przypadku betonu z kruszywem odkrytym racjonalne jest prowadzenie pomiaru głębokości makrotekstury przed i po narażeniu na oddziaływanie mrozu i środków odladzających. Wykorzystanie stacjonarnego profilografu laserowego (ELAtextur) pozwoli na bardziej szczegółową ocenę powierzchniowych zruszczeń warstwy z kruszywem odkrytym.

Znany jest efekt pompowania wilgoci w głąb betonu wskutek cyklicznych zmian temperatury przechodzącej przez punkt zamarzania wody [1]. Penetracja roztworu NaCl wskutek podciągania kapilarnego powoduje zarówno miejscowe

obniżenie temperatury zamrażania wody, jak też miejscowo zwiększa stężenie alkaliów w cieczy porowej w betonie, prowadząc w konsekwencji do zwiększenia zagrożenia wystąpienia reakcji alkalia–krzemionka, o ile w kruszywie znajdują się minerały reaktywne. Nadmierna przepuszczalność betonu w warstwie powierzchniowej z kruszywem odkrytym ma istotny wpływ na złuszczenia nawierzchni wskutek mrozu, a nawet wzmaga potencjał jednoczesnego wystąpienia szkodliwych reakcji ekspansyjnych.

## Wnioski szczegółowe i podsumowanie

Przeprowadzone badania laboratoryjne betonu napowietrzonego, wykonanego w laboratorium w sposób imitujący wykonanie warstwy nawierzchni z kruszywem odkrytym, a także analiza zróżnicowania rodzaju cementu (CEM I i CEM III/A) i pielęgnacji betonu pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

- Zróżnicowanie wskaźników w/c (0,34 i 0,37) oraz rodzaju cementu (CEM I i CEM III/A) w betonie nie powoduje zasadniczych zmian wytrzymałości na zginanie, na rozłupywanie i na ściskanie – wartości średnie wytrzymałości mieściły się odpowiednio w granicach 7,9–8,6 MPa, 3,9–4,9 MPa oraz 61–67 MPa.
- Prawidłowo napowietrzona warstwa betonu z kruszywem odkrytym, pielęgnowana za pomocą środka pielęgnacyjnego o szczelności >85%, charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na złuszczenia powierzchniowe – masa złuszczeń  $m_{56}$  wynosiła 0,10–0,12 kg/m<sup>2</sup>, niezależnie od rodzaju cementu i w/c.
- Brak pielęgnacji warstwy betonu z kruszywem odkrytym spowodował wzrost szybkości absorpcji wody o 100–300%, przypuszczalnie z powodu mikrospękań i mniejszego stopnia hydratacji cementu.
- Wzrost masy złuszczeń powierzchniowych  $m_{56}$  wskutek braku pielęgnacji sięgał od 0,2 do 1,8 kg/m<sup>2</sup>, przy czym największy przyrost stwierdzono w przypadku betonu z cementem CEM III/A, potwierdzając tym samym zwiększoną podatność na błędy pielęgnacji.

W podsumowaniu należy podkreślić fakt, że prawidłowe projektowanie betonu i wykonanie warstwy z kruszywem odkrytym wymaga dokładnego rozpoznania interakcji właściwości materiałowych i czynników pogodowych. Dotyczy to również sterowania złożonym procesem pielęgnacji nawierzchni, który ma kluczowe znaczenie dla trwałości betonu. Obecny stan wiedzy i techniki pozwala na budowę nawierzchni betonowych o odpowiedniej nośności i trwałości użytkowej, postrzeganej przez przyrządy równości podłużnej i właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni, utrzymanych przez dziesiątki lat eksploatacji.

## Bibliografia

- [1] Glinicki M.A., Inżynieria betonowych nawierzchni drogowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019
- [2] Szydło A., Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, Wymiarowanie, Realizacja. Polski Cement, Kraków 2004
- [3] Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B., Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [4] Glinicki M.A., Dąbrowski M., Skrzypczyński M., Wpływ pielęgnacji na właściwości napowietrzonego betonu w górnej warstwie nawierzchni z kruszywem odkrytym–badania modelowe, Cement Wapno Beton, 84, 4, 2017, 271-281
- [5] Ogólna Specyfikacja Techniczna D - 05.03.04 Nawierzchnia z betonu cementowego, GDDKiA, Warszawa 2018
- [6] Glinicki M.A., Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF, Drogownictwo, 3, 2005, 86-88
- [7] Jeong J.-H., Dan G., Zollinger D.G., Development of Test Methodology and Model for Evaluation of Curing Effectiveness in Concrete Pavement Construction, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 1861(1), 2003, DOI:10.3141/1861-03.
- [8] Skarabis J., Nachbehandlung von Fahrbahndecken aus Waschbeton, Strasse und Autobahn 63, 5, 2012, 289-292
- [9] Giergiczny Z., Glinicki M.A., Sokołowski M., Zieliński, M., Air void system and frost salt scaling of concrete containing slag blended cement, Construction and Building Materials, 23, 2009, 2451-2456.
- [10] Scherer G.W., Modeling damage from ice and salt, Int. RILEM Symposium on Concrete Modeling – CONMOD'08, 26-28 May 2008, Delft, 13-23

## Z serwisu GDDKiA

### Podpisano umowę na realizację ostatniego odcinka autostrady A1 w Polsce

Po zawarciu tej umowy wszystkie odcinki autostrady A1 są w realizacji. Odcinek Piotrków Trybunalski – Kamieńsk to najdłuższy odcinek realizacyjny A1 na terenie woj. łódzkiego i liczy ponad 24 km. Wszystkie pozostałe w obu województwach (łódzkim i śląskim) są już w fazie budowy.

Podpisanie umowy przypieczętowało połączenie A1 w całość stanowiącą komunikacyjny kręgosłup kraju. Nowa droga poprawi nie tylko sam komfort podróży ale radykalnie zmienią się również bezpieczeństwo i przepustowość trasy. W miejsce dwujezdniowej drogi krajowej o dwóch pasach ruchu i nawierzchni bitumicznej, pojawi się nowoczesna autostrada z trzema pasami ruchu. To zwiększy przepustowość nowej trasy o ok. 50 proc. w stosunku do stanu obecnego. Z kolei betonowa nawierzchnia, według ocen specjalistów, powinna wytrzymać bez poważniejszych zabiegów remontowych 30–40 lat.

Znikną skrzyżowania jednopoziomowe, które były źródłem wielu kolizji i zdarzeń drogowych, w tym także bardzo groźnych. Na nową trasę będziemy mogli dostać się za pośrednictwem wygodnych i bezpiecznych węzłów bezkolizyjnych. Ruch lokalny zabezpieczą nowo projektowane drogi w sąsiedztwie autostrady. Realizacja tej strategicznej trasy jest, zarówno dla kierowców, inwestora, jak i wykonawców, wyzwaniem szczególnym. Będzie to prowadzona pod ruchem rozbudowa istniejącej drogi krajowej nr 1 do standardu autostrady. Trzeba więc nie tylko prowadzić prace budowlane ale także zapewnić płynność ruchu i zadbać o bezpieczeństwo tak podróżujących, jak i wykonawców.

17-04-2019