



WITOLD ZAPAŚNIK

Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
wzapasnik@gddkia.gov.pl

Przyczyny oraz przykłady występowania reakcji alkalia-kruszywa (AAR) w betonie, na podstawie doświadczeń amerykańskich i australijskich

Część 2. Przykłady reakcji alkalia-kruszywa (AAR) w betonie

Reakcje alkalia-krzemionka (ASR) w betonie, podobnie jak reakcje alkalia-węglany (ACR) są procesami chemicznymi, które mogą spowodować uszkodzenia fizyczne – ekspansję i spękania betonu. W celu określenia mechanizmu zniszczenia, należy przeanalizować informacje uzyskane z inspekcji terenowej wraz z wynikami wykonanych badań laboratoryjnych.

Szkodliwa ekspansja betonów w wyniku reakcji ASR nie występuje bez produktów towarzyszących, natomiast produkty towarzyszące mogą wystąpić bez zaistnienia reakcji ASR. Ponieważ produkty reakcji ASR zaobserwowano w betonie nieuszkodzonym, dlatego obecność produktów tej reakcji niekoniecznie oznacza jej zaistnienie. Wystąpienie zarówno reakcji ASR, jak i jej produktów musi być wzajemnie powiązane.

W związku z powyższym, została opracowana procedura diagnozowania reakcji ASR i oceny jej wpływu na stan obiektu. Procedura ta zawiera następujące etapy: inspekcja w terenie i badania, pobranie próbek, badania laboratoryjne, ocena stanu oraz ocena ryzyka wystąpienia przyszłych reakcji [10]. Obserwacja wizualna obiektu jest zasadniczą częścią tej procedury.

Beton poddany działaniu reakcji ACR zwykle nie wykazuje cech, które jednoznacznie zidentyfikowałyby reakcję alkalia-węglany jako przyczynę powstałych spękań. Rodzaj spękań będzie zależał w tym przypadku także od warunków ograniczenia swobody odkształceń konstrukcji oraz wilgotności. W płytach, pomostach i ławach, tzn. tam, gdzie zmieniają się gradienty wilgotności w górnych, dolnych lub bocznych elementach konstrukcji, prawdopodobne jest wystąpienie spękań siatkowych. Może to spowodować zamknięcie się spoin dylatacyjnych, przesunięcia osiowe elementów sąsiadujących ze sobą, spękania wskutek sił ściskających w betonie, a w przypadku nawierzchni dróg wysadziny nawierzchni [9]. Ponieważ już niska zawartość alkaliów może zainicjować proces ACR, a wyższa zawartość jeszcze go przyspieszyć, stosowanie soli odładzających, które także zawierają alkalia, może przyczynić się do przyspieszenia oraz zwiększenia skali uszkodzeń w betonie.

W dalszej części artykułu podano przykłady występowania uszkodzeń spowodowanych reakcjami AAR w obiektach i nawierzchniach betonowych, wg kategorii klasyfikacyjnych, opracowanych w USA przez *Portland Cement Association (PCA)* i w Australii przez *Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation (CSIRO)*.

Wizualne symptomy ekspansyjnych reakcji AAR (ASR lub ACR) oraz przykłady ich występowania

Odształcenia i przemieszczenia konstrukcji

Typowymi objawami obecności reakcji ASR są spękania podłużne, spękania siatkowe (o wzorcu przypadkowym) oraz w zaawansowanych przypadkach zamknięte spoiny dylatacyjne, złuszczone powierzchnie betonowe lub wzajemne przemieszczenia różnych części obiektu (fot.1).



Fot. 1. Ściana bariery betonowej poddana działaniu intensywnej reakcji ASR. Widoczne są spękania, złuszczenia powierzchni betonowych oraz wyształcone podłużne przesunięcia ścian [7]

Proces niszczenia konstrukcji z betonu wskutek reakcji ASR przebiega zwykle powoli, dlatego ryzyko wystąpienia katastrofy budowlanej jest niewielkie. Reakcje te mogą natomiast spowodować problemy eksploatacyjne obiektu i wzmocnić inne mechanizmy jego niszczenia, które występują w przypadku cykli zamrażania-odmrażania lub działania środków odładzających i siarczanów. Na nawierzchni betonowej mogą występować w takim przypadku spękania siatkowe, a wraz z pojawiającymi się uszkodzeniami w wyniku zamrażania i odmrażania, nawierzchnia może ulec nawet całkowitej destrukcji. Podobnie, spękania spowodowane innymi przyczynami mogą powodować przenikanie alkaliów i/lub wilgoci w głąb struktury betonu, co może doprowadzić do przyspieszenia i zaostżenia

reakcji ASR. W USA niektóre poważne problemy eksploatacyjne związane z odkształceniami konstrukcji betonowych dotyczą zapór hydroelektrycznych. Szybkoobrotowe turbiny wodne wymagają utrzymywania ścisłych tolerancji pomiędzy ich częściami mechanicznymi a betonem, w którym zostały zakotwione [3], [7].



Fot. 2. Przykład zniszczenia konstrukcji z Australii – odkształcona ściana oporowa tamy poddanej działaniu reakcji AAR. W wyniku zaawansowanego procesu destrukcji, w konstrukcji powstały liczne spękania siatkowe, które następnie w ramach naprawy zostały wypełnione żywicami epoksydowymi. Otworzyły się one na nowo, co doprowadziło do wypadania wypełnień starych spękań (widoczne na zdjęciu) i powstania nowych oraz w konsekwencji do odkształceń konstrukcji ściany [7]

Spękania

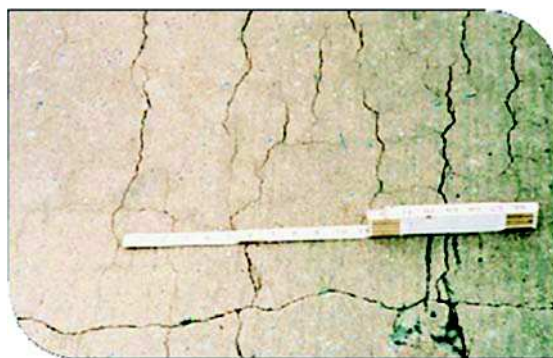
Beton poddany działaniu zaawansowanej, ekspansywnej reakcji ASR charakteryzuje się siatką występujących spękań (fot. 3 i 4).



Fot. 3. Spękania podłużne wywołane przez reakcję ASR w nawierzchni betonowej [2]

W czasie inspekcji w terenie należy określić lokalizację spękań, ich długość, szerokość, przybliżoną głębokość, ciągłość oraz to czy spękania przechodzą przez czy obok ziaren kruszywa w betonie. W celu uszczegółowienia opisu spękań, należy wykonać także sprawdzenia dotyczące związku spękań z kierunkami istniejących naprężeń w konstrukcji, z rozmieszczeniem zbrojenia, warunkami ograniczenia przemieszczeń konstrukcji oraz jej odbarwieniami.

Szerokie spękania w konstrukcji betonowej są łatwe do stwierdzenia. Spękania wąskie nie są zawsze widoczne, mogą być łatwiej wykryte na mokrej nawierzchni betonowej, która

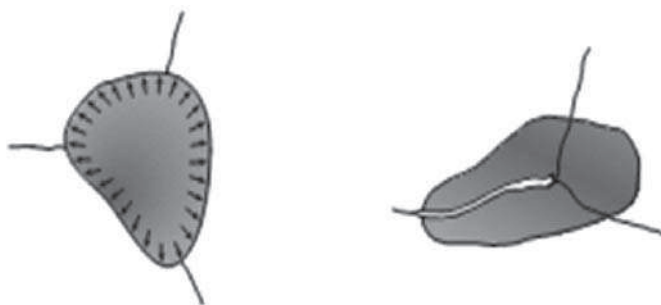


Fot. 4. Widok dobrze rozwiniętych spękań w nawierzchni, typowy wzór przypisywany jest działaniu reakcji ASR. Główne spękania przebiegają w kierunku podłużnym nawierzchni z betonu [2]

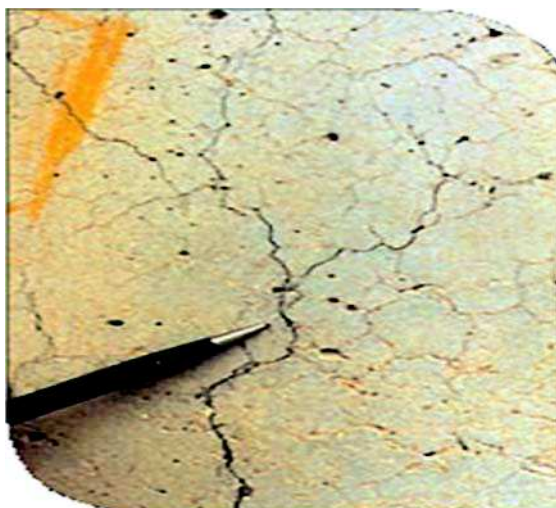
już zaczyna wysychać. Wysychanie nawierzchni postępuje zazwyczaj nierówno i uzyskuje się kontrast, dzięki czemu drobne spękania stają się bardziej widoczne (fot.5). Z tego względu korzystnie jest oceniać obiekt betonowy pod kątem występujących uszkodzeń w czasie jego wysychania, po opadach deszczu.



Fot. 5. Dobrze widoczne spękania w trakcie wysychania betonu po wcześniejszym zwilżeniu [2]



Rys. 1. Przykłady wzorca pęknięć „gwiazdzistych”. Reakcja ASR często powoduje powstanie trzech lub więcej spękań „gwiazdzistych” w każdym reaktywnym ziarnie kruszywa, niwelując w ten sposób naprężenia spowodowane siłami rozciągającymi [8]



Fot. 6. Spękania powstające w ziarnach kruszywa reaktywnych często łączą się z innymi sąsiednimi spękaniami. Prowadzi to do powstania wzorca spękań, przypominającego linie na mapie – tzw. spękania mapowe lub siatkowe [2]



Fot. 7. Typowe spękania siatkowe wywołane reakcją ASR, występujące w podporach dwóch nieeksploatowanych wiaduktów kolejowych w Australii. W betonie do ich budowy zastosowano żwiry rzeczne, zawierające krzemionkę [7]

Ekspansywna reakcja ASR rozpoczyna się wraz z powstaniem żelu, w otoczeniu ziarna reaktywnego lub w jego wnętrzu, w strukturze betonu. Ponieważ żel absorbuje wodę, w efekcie pęcznienia może występować znaczne ciśnienie nawet do 10-11 MPa, a niekiedy i więcej we wszystkich kierunkach konstrukcji betonowej [8]. Ciśnienie to przekracza wytrzymałość konwencjonalnego betonu na rozciąganie, w przybliżeniu wynoszącą około 10% jego wytrzymałości na ściskanie. Beton pęka z reguły wg 3- lub 4-ramiennego wzorca gwiaździstego (rys. 1).

W przypadku, gdy reakcjom podlega większa ilość ziaren kruszywa, spękania promieniujące z tych poszczególnych „gwiazdek” łączą się z innymi, tworząc wzór spękań przypominający siatkę (fot. 6-8).



Fot. 8. Spękania siatkowe powstałe wskutek reakcji ASR w filarze mostowym [7]

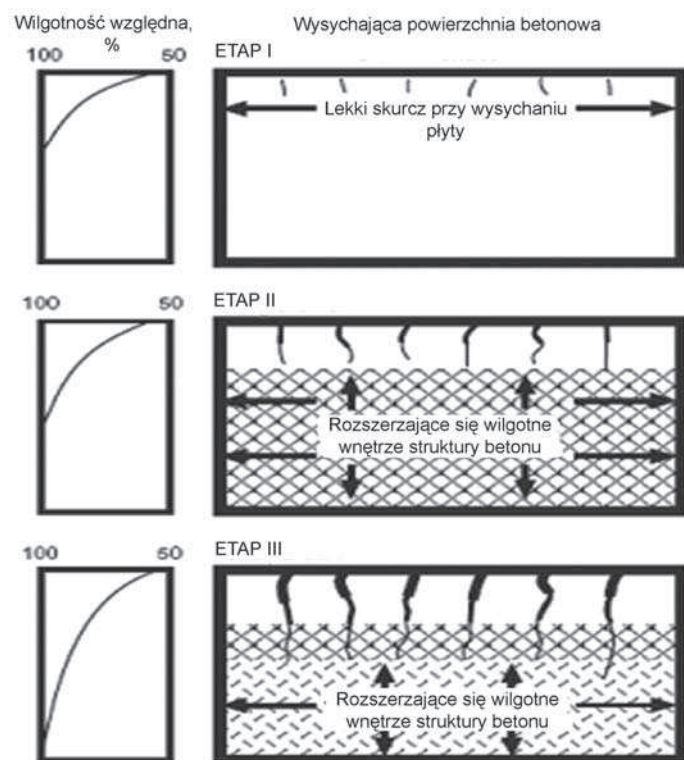
Nawierzchnie i płyty występujące na spadkach niwelety

W nawierzchniach i płytach zlokalizowanych na spadkach niwelety, spękania w wyniku reakcji ASR często zaczynają się w pobliżu krawędzi swobodnych, spoin konstrukcyjnych oraz w miejscach, gdzie występuje zawilgocenie konstrukcji [8]. Spękania wywołane reakcjami ASR przebiegają zazwyczaj prostopadle do szczelin poprzecznych i równoległe do krawędzi swobodnych wzdłuż pobocza drogi oraz na styku z nawierzchnią asfaltową, tam gdzie istnieją największe naprężenia rozciągające. Spękania te często rozwijają się wg wzorca siatkowego, a nawierzchnie o zbrojeniu ciągłym posiadają typowe spękania ASR przebiegające równoległe do zbrojenia w nawierzchni. Obciążenie ruchem pojazdów przyspiesza powstawanie spękań. Na rysunku 2 zilustrowano rozwój spękań w wyniku działania reakcji ASR, zachodzących w nawierzchniach betonowych.

Poniższy model został opracowany przede wszystkim dla nawierzchni drogowych, cykl występowania zjawisk jest podobny także w przypadku obiektów inżynierskich. Spękania wywołane reakcjami ASR należy odróżniać od spękań w kształcie litery D, które są kojarzone z uszkodzeniami w wyniku cyklu zamarzania-rozmarzania. Uszkodzenia powstające w wyniku zamarzania-rozmarzania zazwyczaj mają formę spękań równoległych do spoin poprzecznych i krawędzi swobodnych w nawierzchni.

W pierwszym etapie procesu, wilgoć paruje z powierzchni płyty betonowej. Powoduje to skurcz w wyniku jej wysychania oraz drobne spękania na powierzchni betonu. Na tym etapie nie zachodzą zaawansowane reakcje krzemionka-alkalia lub też ekspansja betonu, co powoduje, że beton może pozostać w stanie nieuszkodzonym.

Etap 2. może wystąpić już w parę miesięcy po ułożeniu betonu lub też znacznie później (nawet kilka lat). Kruszywa reaktywne i roztwory w porach betonu o wysokim wskaźniku pH przyspieszają rozwój procesu charakterystycznego dla etapu 2., którego inicjacja zaznacza się tworzeniem reaktywnego żelu i następującym jego pęcznieniem. Zazwyczaj żel tworzy się w spękaniach ziaren kruszywa, ale niekiedy powstaje również na obrzeżach ziaren. Tworzenie się żelu może powodować początkową redukcję objętości struktury betonu, ale wraz z absorpcją wilgoci, żel pęcznieje i oddziałuje na otaczający beton. Swobodna powierzchnia betonu nie ma możliwości przeciwdziałania pęcznieniu, wskutek tego spękania na powierzchni betonu zaczynają oddzielać się. Rozszerzanie się spękań jest znakiem, że reakcja ASR postępuje.



Rys. 2. Model spękań spowodowanych reakcją ASR w płytach nawierzchni swobodnie podpartych na gruncie. Skurcz przy wysychaniu powierzchni pojawia się w etapie 1., reakcja i ekspansja betonu wewnętrznego w etapie 2., a trwające nadal wysychanie na powierzchni betonu połączone z trwającą reakcją w jego wnętrzu w etapie 3. Po lewej stronie rysunku przedstawiona jest zależność wilgotności względnej od głębokości konstrukcji nawierzchni [2]

Rozszerzające się spękania powierzchniowe umożliwiają większy dostęp wilgoci do wnętrza betonu, podtrzymując tworzenie się żelu i jego pęcznienie. Podczas tego etapu, żel może wydzielić się z rozszerzających się spękań.

W etapie 3. postępujące wysychanie spowalnia reakcję w strefie przypowierzchniowej betonu. Reakcja postępuje dalej w wilgotnej strefie wnętrza betonu, przyczyniając się do powstawania i ekspansji żelu oraz wywierania ciśnienia na powierzchnię i rozszerzania się spękań powierzchniowych betonu.

Reakcja ASR trwa aż do wyczerpania się zasobu krzemionki w kruszywie, do znacznej redukcji jonów alkalicznych lub wskaźnika pH w roztworze porowym betonu lub też do ostatecznego wyschnięcia betonu, co zahamuje tworzenie i pęcznienie żelu. Proces opisany przez trzyetapowy model przebiegu reakcji ASR może być czasowo lub trwale przerwany, na przykład podczas okresów suszy. W przypadku, gdy na nowo wystąpią warunki sprzyjające reakcji ASR, zostanie ona wznowiona.

Inne uszkodzenia obiektów inżynierskich

Najintensywniejszy rozwój spękań obserwuje się zwykle w tych strefach obiektów i nawierzchni jezdni, w których beton cały czas jest „zasilany” w wilgoć, takich jak strefy filarów zlokalizowane blisko przy poziomie zwierciadła wody gruntowej, pod poziomem gruntu w ścianach oporowych, poniżej płyt nawierzchni lub w wyniku podciągania wilgoci przez filary lub podpory [4].

W przypadku braku kierunkowego podparcia lub utwierdzenia obiektu, w wyniku reakcji ASR, beton pęka wg. wzorca przypadkowego. W konstrukcjach betonowych utwierdzonych, takich jak większość obiektów, spękania będą zorientowane wzdłuż kierunków występujących naprężeń [5], na przykład jak pionowe spękania powstałe w słupach (fot. 9).



Fot. 9. Spękania powiązane są z kierunkami naprężeń. Przeważające spękania w tej podporze są zorientowane podłużnie [2]

Ponieważ zbrojenie jest równoległe do kierunku występujących naprężeń głównych, liniowe spękania wskutek reakcji ASR występują w przybliżeniu równoległe do prętów stalowych. Odwrotnie niż w przypadku spękań spowodowanych korozją zbrojenia, które występują bezpośrednio nad prętami, liniowe spękania wskutek reakcji ASR zwykle zlokalizowane są pomiędzy prętami. Prostokątny wzór spękań pojawia się w przybliżeniu, gdy zbrojenie jest rozmieszczone równomiernie w konstrukcji w dwóch kierunkach [8].

W betonie niezbrojonym, zewnętrzne utwierdzenie (ograniczenie przemieszczeń) wpływa na orientację spękań. W przypadku hydrologicznych tam grawitacyjnych, przemieszczenia tych konstrukcji są mniej ograniczone w kierunku górnym i dlatego występujące w nich spękania są przeważnie poziome.

Naloty powierzchniowe (wykwity)

Pozostałości żelu pochodzące z reakcji ASR lub węglanu wapnia z węglanowych roztworów w porach betonu mogą występować wzdłuż spękań w betonie. Dają one różny kolor powierzchni, od białego aż po ciemno szary. Są one często nazywane wykwitami lub wyciekami. Materiał wyciekający ze spękań może być biały, żółtawy lub bezbarwny oraz posiadać konsystencję lepłą, płynną, woskową, gumiąstą lub stwardniałą (fot. 10).



Fot. 10. Naloty powierzchniowe (wykwity) spowodowane wyciekaniem ze spękań i gromadzeniem się żelu ASR na powierzchni ściany oporowej tamy [7]

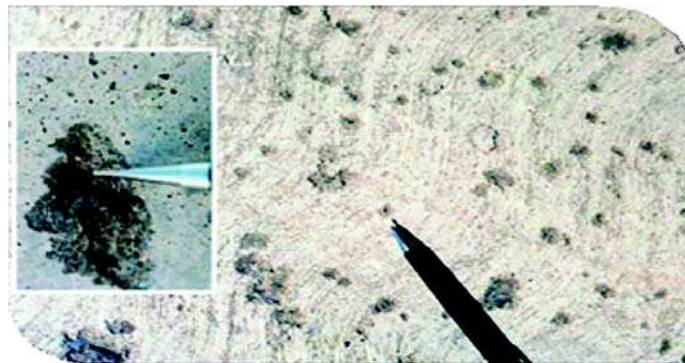
Zjawisku ekspansywnej reakcji ASR mogą lecz nie muszą towarzyszyć depozyty powierzchniowe żelu. Ich obecność, nie jest jednakże indykatoryna dla wystąpienia reakcji ASR, ponieważ inne mechanizmy, np. takie jak działanie mrozu lub przepływ wody przez beton, również mogą spowodować wykwity (bez obecności żelu wywołanego reakcją ASR).

Dobłą praktyką badawczą podczas inspekcji w terenie obiektów i nawierzchni betonowych jest rejestracja zakresu i lokalizacji wykwitów powierzchniowych wraz z ich kolorem, teksturą, zawilgoceniem i twardością. Pomocna jest także analiza chemiczna w celu określenia, czy w nalocie obecny jest żel będący produktem reakcji ASR.

Odpryski betonu

Odpryski są spowodowane poprzez punktowe spękania i następnie wypadanie fragmentów nawierzchni betonu, co

pozostawia otwory o zmiennej wielkości; zwykle od 25 mm do 50 mm. Odpryski spowodowane przez wypadanie drobin o rozmiarach frakcji ziaren piasku mogą być znacznie mniejsze (fot. 11).



Fot. 11. Odpryski spowodowane przez wypadanie ziaren wielkości piasku. Szczegół wewnątrz zdjęcia po lewej stronie pokazuje powiększenie takiego odprysku [2]

Liczba, wielkość oraz lokalizacja odprysków dostarczają ważnych informacji o jakości kruszywa w betonie. Najczęściej odpryski są spowodowane pęcznieniem i skurczem kruszyw porowatych podczas cykli zamarzania-odmarzania. Inną przyczyną odprysków jest wystąpienie ekspansywnej reakcji ASR: odpryski występują podczas redukcji naprężeń, wywołanych działaniem ekspansywnego żelu, powstałego bezpośrednio pod powierzchnią betonu.

W późniejszych stadiach reakcji ASR, odpryski mogą tworzyć się pod nakładkami przykrywającymi warstwy wierzchnie nawierzchni. Szczególnie na płytach posadowionych na zawilgoconych gruntach spoistych, pod nakładką może wystąpić zjawisko kondensacji i spowodować odpryski. Badanie kruszywa na spodzie powstającego w ten sposób wyboju może zazwyczaj wyjaśnić przyczynę odprysku.

Odpryski są z reguły niewielkimi uszkodzeniami i zazwyczaj nie wpływają na eksploatację lub trwałość betonu, jednakże istnieją sposoby na ograniczenie ich występowania w wyniku postępującej reakcji ASR [4]:

- tam gdzie nie jest to konieczne, nie należy stosować zatarczych na gładko powierzchni ze zbrojeniem ze stalą twardą, tak jak w przypadku zewnętrznych płyt zbrojonych;
- należy wybierać metody pielęgnacji betonu na mokro, takie jak ciągłe zwilżanie wodą, zwilżanie mgławicowe lub pokrycia nawilżoną tkaniną zamiast poli-filmów, papierów do pielęgnacji lub chemicznych związków pielęgnacyjnych. Powierzchnię należy spłukać wodą przed ostatecznym wyschnięciem;
- należy stosować cementy wieloskładnikowe lub cementy z dodatkowymi spoiwami, takimi jak popioły lotne, przy zastosowaniu których stwierdzono że powodują spowolnienie lub wyeliminowanie (zatrzymanie) reakcji ASR.

Należy pamiętać, że obecność odprysków powstałych w wyniku reakcji ASR nie oznacza koniecznie, że struktura betonu w dalszym etapie procesu rozszerzy się i powstaną spękania siatkowe lub inne uszkodzenia typowe dla reakcji ASR.

Odpryski mogą także powstawać bez działania reakcji ASR w czasie cykli zamarzania i odmarzania nawierzchni, zawiera-

jących porowate kruszywo niskiej gęstości, na powierzchni betonu lub w jego sąsiedztwie. Przykładem takiego kruszywa jest rogowiec porowaty, który może absorbować wodę i w czasie zamarzania rozszerzać się, powodując odpryski w strukturze betonu.

Zmiana barwy na powierzchni betonu

Odbarwienie się powierzchni betonu powszechnie towarzyszy spękanom [9]. Obszary zaciemnione lub plamiste są często kojarzone z reakcją ASR. Obszary wzdłuż spękań mogą być wybielone, różowawe lub brązowe i występować w strefie kilkunastu milimetrów wokół spękania (fot. 12).



Fot. 12. Zmiana barwy wzdłuż spękań na powierzchni belki mostowej w wyniku postępującej reakcji ASR [7]

Podsumowanie

- W celu jednoznacznego stwierdzenia, że występujące uszkodzenia w konstrukcji są spowodowane reakcjami AAR, a nie innymi przyczynami, należy dokonać szczegółowej analizy wszystkich występujących okoliczności, wykorzystując do tego celu wyniki inspekcji terenowych konstrukcji obiektów i nawierzchni betonowych.
- Identyfikacja reakcji AAR jako przyczyny uszkodzeń w betonie jest ważna nie tylko dlatego, że klasyfikuje użyte w nim kruszywo do obserwacji oraz zaleca jego ostrożne stosowanie w przyszłości, ale także z powodu iż utrzymanie obiektów poddanych działaniu reakcji AAR może być znacząco inne niż obiektów, poddanych działaniu innych rodzajów uszkodzeń.
- Zachowanie się kruszywa w betonie w rzeczywistych warunkach jego eksploatacji w terenie jest cennym źródłem informacji. Jeśli warunki eksploatacji i składniki, a także całkowita zawartość alkaliów w betonie są te same w istniejących i planowanych konstrukcjach betonowych, wówczas nie ma potrzeby badania kruszywa posiadającego dobrą statystykę eksploatacyjną. Natomiast w sytuacji, gdy składniki kruszywa zmieniają się znacznie w obszarze kamieniołomu lub gdy warunki ekspozycji planowanej konstrukcji będą bardziej wymagające niż w obiektach spełniających dane założenia, względnie też składniki betonu znacznie różnią się od pierwotnych, kruszywo powinno być przebadane ponownie.

- Obiekty inżynierskie poddane działaniu reakcji AAR mogą być budowane z betonu niezbrojonego, zbrojonego, prefabrykowanego lub sprężonego. Jednakże niezależnie od rodzaju zastosowanego betonu, konstrukcje bardziej narażone na działanie wilgoci są bardziej podatne na szybsze wystąpienie uszkodzeń (spękań) wskutek wystąpienia reakcji AAR.
- Spękania w betonie w danej konstrukcji mogą przyjąć różne formy, w zależności od jej projektu, ukształtowania oraz oddziaływujących na konstrukcję sił i naprężeń. W betonie niezbrojonym lub lekko zbrojonym mogą powstawać spękania siatkowe, natomiast w betonie o dużej ilości zbrojenia lub betonie sprężonym, spękania przyjmują formę kierunkową, rozwijając się zgodnie z kierunkiem największego przyłożonego obciążenia (naprężenia). Gdy sprężenie konstrukcji zanika wraz z jej wiekiem, wtedy spękania kierunkowe mają tendencję do przyjęcia formy siatkowej, ponieważ w dalszym ciągu pojawiają się spękania nieuporządkowane (przypadkowe). Intensywność spękań jest funkcją intensywności i zakresu reakcji AAR w betonie.
- Niektóre symptomy uszkodzeń wskutek reakcji AAR są oczywiste, jednak w części przypadków sama inspekcja w terenie nie wystarcza do postawienia jednoznacznej diagnozy, w takich sytuacjach niezbędne jest przeprowadzenie zaawansowanych badań laboratoryjnych.

Bibliografia

- [1] A. Danay, "Structural Mechanics Methodology in Diagnosing and Assessing Long-Term Effects of Alkali-Aggregate Reactivity in Reinforced Concrete Structures", *ACI Materials Journal, American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, January-February 1994
- [2] A. Farny James, B. Kerkhoff, "Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete", *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, 2007, USA
- [3] J. Figg, "ASR – Inside Phenomena and Outside Effects (Crack Origin and Pattern)", *Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7th International Conference, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications*, Park Ridge, New Jersey, 1987
- [4] R. Landgren, D.W. Hadley, *Surface Popouts caused by Alkali-Aggregate Reactions, RD 121, PCA*, Skokie, Illinois, 2002
- [5] T.C. Liu, "Causes of Deterioration, Lesson 201, Maintenance and Repair of Concrete Structures, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station", Vicksburg, Mississippi, 1981
- [6] M.A. Ozol, "Alkali Carbonate Rock Reaction", *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete – Making Materials, ASTM STP 169D, edited by Lamond J.F and Pielert, J.H., American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, 2006, Also PCA Publication LT205
- [7] A. Shayan, *An Illustrated Guide to the Identification of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Structures, Commonwealth Scientific & Industrial Research Organization (CSIRO) Division of Building, Construction & Engineering, Technical Report TR94/2*, 2002 Australia
- [8] D. Stark, *Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, SHRP-C/FR-91-101, Strategic Highway Research Program*
- [9] D. Stark, "Effects of Water-Cement Ratio on Expansion Due ASR", *Concrete Technology Today, PL951*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, March 1955
- [10] J.G. Wood, J.S. Young and D. Ward, "The Structural Effects of Alkali-Aggregate Reaction in Reinforced Concrete" in *Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7th International Conference, edited by Graham-Bellew, Patrick E. Noyes Publications*, Park Ridge, New Jersey 1987