



WITOLD ZAPASNIK

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 1. Przyczyny reakcji alkalia-kruszywa (AAR) w betonie

Kruszywa zawierające określone minerały reaktywne, mogą wchodzić w reakcje z alkalicznymi wodorotlenkami w betonie. Reaktywność ta jest potencjalnie niebezpieczna tylko wtedy, gdy powoduje znaczące zmiany objętościowe betonu [1],[2],[3].

Reaktywność alkalia-kruszywa (AAR) może przybierać dwie formy – w postaci reakcji alkalia-krzemionka (ASR) oraz w postaci reakcji alkalia-węglany (ACR, czasami nazywana reakcją alkalia-skały węglanowe lub ACRR). Reaktywność ASR jest częstszym problemem niż ACR, ponieważ częstsze jest występowanie kruszyw zawierających reaktywne minerały krzemowe. Kruszywa węglanowe, wchodzące w reakcje z alkaliami, posiadają specyficzny skład, który nie jest w Ameryce powszechny.

Reaktywność alkalia-krzemionka została rozpoznana jako potencjalne źródło zniszczeń w betonie już w latach 30. XX wieku. W 1938 roku w Kalifornii, z powodu nadmiernej ekspansji betonu, stwierdzono spękania nawierzchni betonowych oraz elementów konstrukcji mostowych w dolinie rzeki Salinas. Przyczynę tego zjawiska wyjaśnił w 1940 roku inżynier Kalifornijskiego Stanowego Wydziału Dróg Tomasz Stanton, przeprowadzając doświadczenia z zastosowaniem cementów o wysokiej zawartości K_2O i Na_2O oraz kruszywa z doliny ww. rzeki. Stwierdził on, że nadmierna ekspansja betonu spowodowana była reakcjami zachodzącymi pomiędzy alkaliami pochodzącymi z cementu, a kruszywem pozyskanym z doliny rzeki i stosowanym do produkcji betonu [5].

Chociaż potencjalnie reaktywne kruszywa występują w całej Ameryce Północnej, zjawisko zniszczeń betonu strukturalnego w wyniku reakcji ASR nie jest tutaj powszechnie spotykane, gdyż:

- większość kruszyw jest chemicznie stabilna w betonie, zawierającym cement jako spoiwo hydrauliczne.
- kruszywa o udokumentowanych, dobrych właściwościach eksploatacyjnych występują w dużych ilościach w wielu regionach Ameryki.
- beton w czasie eksploatacji jest wystarczająco suchy, co spowalnia potencjalne procesy reakcji ASR.
- zastosowanie pewnych rodzajów pucolan lub granulowanych żużli wielkopieczowych umożliwia ograniczenie i kontrolowanie procesów reakcji ASR.
- w wielu typach mieszanek betonowych zawartość alkaliów w betonie jest wystarczająco niska, tak aby kontrolować przebieg szkodliwego procesu reakcji ASR.
- niektóre formy reakcji ASR nie powodują znaczącej, szkodliwej ekspansji betonu.

W celu ograniczenia możliwości wystąpienia reakcji ASR należy przede wszystkim poznać jej mechanizm, wykonać odpowiednie badania pozwalające zidentyfikować kruszywa potencjalnie reaktywne i jeśli jest to potrzebne, podjąć kroki w celu zminimalizowania ryzyka ekspansji betonu oraz związanych z nią spękań [4].

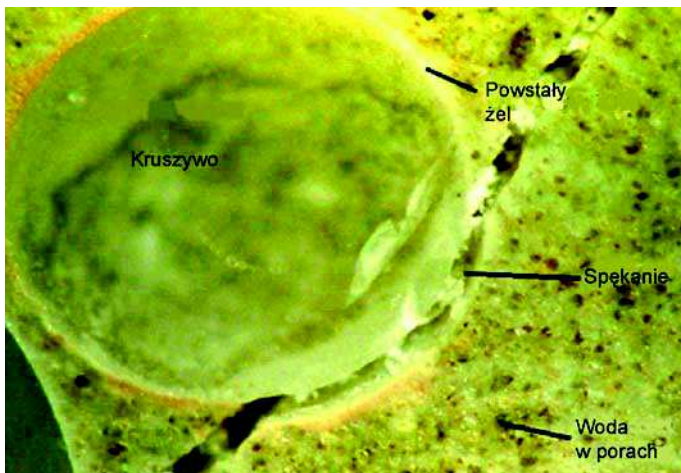
Reakcja typu alkalia-węglany (ACR) w betonie nie była udokumentowana aż do roku 1957, kiedy to proces ten opisał i zdiagnozował kanadyjski inżynier Swenson. Chociaż reakcja typu ACR w betonie zachodzi znacznie rzadziej niż typu ASR, w niniejszym artykule również opisano mechanizm jej przebiegu oraz wizualne symptomy uszkodzeń powstałe w jej wyniku.

Reakcja Alkalia-Krzemionka (ASR)

Mechanizm procesu reakcji ASR

Beton składa się z mieszanki kruszyw – z rozdrobnienia skał, naturalnych żwirów i piasków otoczonych matrycą zaczynu cementowego. Zaczyn cementowy zawiera połączone ze sobą mikroskopijne pory, poprzez które mogą migrować roztwory wodne lub jonowe. Woda w porach betonu jest roztworem alkalicznym (tzw. ciecz porowa), miarą jego alkaliczności jest wskaźnik pH.¹ Alkaliczne tlenki Na_2O i K_2O zawarte w cemencie ulegają rozpuszczeniu w wodzie i przechodzą do cieczy porowej w formie jonów Na^+ , K^+ i OH^- . Obecne są też jony Ca^{++} . Jeżeli krzemionka w ziarnach kruszywa jest reaktywna, to zachodzi reakcja z jonami hydroksylowymi, a następnie z jonami sodu i potasu Na i K. Reakcja alkalia-krzemionka zachodzi w cieczy porowej, a jej produktem jest żel krzemianu uwodnionego sodu i potasu (zawiera także wapń), który pęcznieje podczas pobierania wody z otaczającego go zaczynu cementowego. Żel tworzy się wokół i wewnątrz ziaren kruszywa.

¹ Wskaźnik pH jest w przybliżeniu obliczany wg koncentracji jonów wodorotlenowych (OH^-) w roztworze. Wskaźnik pH w roztworze w porach betonu wynosi co najmniej 12.5; roztwór jest w równowadze z wodorotlenkiem wapnia ($Ca(OH)_2$), obfitym produktem hydratacji obecnym w betonie. Wskaźnik pH w roztworze w porach betonu wzrasta wraz ze wzrostem zawartości alkaliów w cemencie. Alkalia sodowe (Na) i potasowe (K) obecne w betonie zasadniczo pochodzą z materiałów wiążących. Sole alkaliczne rozpuszczają się w roztworze w porach betonu i zwiększają jego alkaliczność.



Rys. 1. Tworzenie się ekspansywnego żelu krzemianu uwodnionego sodu i potasu w strukturze betonu (grafika)[3]

Produkty reakcji ASR mają dużą zdolność do wchłaniania wilgoci (tzw. powinowactwo wodne). W czasie absorpcji wody z otaczającego zaczynu cementowego, żełe ulegają ekspansji i mogą wytworzyć ciśnienie sięgające 11 MPa, co przy przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie zaczynu cementowego powoduje spękania kruszywa i otaczającego go zaczynu. Reakcję powyższą można opisać jako proces dwuetapowy²:

1. Alkalia + reaktywna krzemionka → żel alkaliczno-krzemionkowy,
2. Żel alkaliczno-krzemionkowy + wilgoć → zwiększanie objętości (pęcznienie) betonu.

Sama obecność żelu niekoniecznie wskazuje na 100% wystąpienie destrukcyjnego procesu ASR. Niektóre żełe pęczniają bardzo mało lub są całkowicie niepęczniące. Jeśli żel należy do nisko ekspansywnych, nie spowoduje on problemów. Natomiast wysoko ekspansywne żełe mogą spowodować wcześniej opisane spękania w matrycy cementowej i w konsekwencji uszkodzenie struktury betonu. Tempo migracji płynów w porach betonu do miejsca zajścia reakcji oraz temperatura również wpływają na wielkości wytworzonych ciśnień związanych z ekspansją żeli [4]. W ten sposób, aby właściwie zdiagnozować istnienie szkodliwie ekspansywnego procesu ASR, obecności żelu musi towarzyszyć występowanie niszczących spękań w betonie.

² Jony wodorotlenków, alkaliów i wapnia reagują z krzemionką zawartą w ziarnach kruszywa i tworzą żel. Reaktywna krzemionka rozpuszcza się w roztworze o wysokim pH. Rozpuszczona krzemionka reaguje z alkaliom i wapniem i tworzy uwodniony żel wapniowo-alkaliczno-krzemionkowy. Żel ma tendencję do pęcznienia poprzez absorpcję wody z otaczającego zaczynu. Pęczniący żel tworzy początkowe spękania w kruszywie i zaczynie cementowym. W pobliżu miejsc reakcji tworzą się mikrospękania, które propagują i łączą się ze sobą tworząc większe spękania, powodując uszkodzenia struktury betonu. Żele ASR o specjalnym, charakterystycznym składzie i lepkości (wiskozie) mają właściwości pęczniące. Ten charakterystyczny skład nie został jednoznacznie ustalony. W fazie początkowej żełe zawierające mniej wapnia pęcznią bardziej intensywnie, natomiast gdy żel przemieszcza się w strukturze betonu pobiera więcej wapnia, co może obniżyć jego pęcznienie.

Czynniki powodujące wystąpienie reakcji ASR

Aby doszło do reakcji typu ASR alkalia-krzemionka, muszą jednocześnie być spełnione następujące warunki:

- w kruszywie zastosowanym do betonu muszą występować reaktywne formy krzemionki,
- w porach betonu musi występować roztwór wysoko alkaliczny (o wysokim wskaźniku pH),
- musi występować wystarczająca ilość wody (wilgoci).

Ilość żelu tworzącego się w betonie zależy od ilości i typu reaktywnej krzemionki oraz stężenia wodorotlenków alkalicznych w roztworze występującym w porach betonu. Kruszywa naturalne zawierają różne formy składników zawierających krzem, które posiadają zmienną reaktywność – jest to miarą gotowości krzemionki do reakcji z alkaliom. Wewnętrzne źródła alkaliów (sód i potas) mogą pochodzić z cementu, pucolan, kruszyw, dodatków i wody zarobowej. W czasie reakcji alkaliów z krzemionką powstają produkty żelowe. Alkalia zewnętrzne mogą pochodzić z szeregu źródeł, jednakże w większości są to chemiczne środki odladzające lub przeciwbłodzeniowe. Ich skład może być różny, jednakże powstające żełe zawsze zawierają alkalia, wapń, krzemionkę i wodę [17].

Reaktywna krzemionka w kruszywie

Reaktywność jest funkcją typu i formy składników tworzących kruszywo.³ Minerale kwarcowe występujące w kruszywach są na ogół stabilne, jeśli ich budowa jest krystaliczna, i reaktywne, jeśli mają budowę amorficzną. Są także wyjątki, na przykład występuje kilka powszechnych form krystalicznych dwutlenku krzemu: kwarc, trydymit i krystobalit. Kwarc, jeśli nie ma budowy mikrokrystalicznej lub wysoce odkształconej, jest reaktywnie stabilny. Trydymit i krystobalit są także

³ Reaktywne minerale: krzemionka, SiO_2 mogą istnieć w różnych teksturach i strukturach krystalicznych. Formy krzemionki są ogólnie związane z tempem stygnięcia magmy wulkanicznej podczas procesu formowania się skał. Formy minerałów krzemowych w kruszywach zmieniają się od amorficznych lub szklistych (nie krystalicznych) do kryptokrystalicznych, mikrokrystalicznych i krystalicznych, wymienionych w kolejności malejącej szybkości stygnięcia. Podczas tworzenia się kryształów kwarcu, mogą wystąpić pewne odkształcenia (pęknięcia). Można je zaobserwować pod mikroskopem w świetle spolaryzowanym. Kruszywo zawierające pęknięty kwarc ma tendencję do bycia reaktywnym. Krystobalit i trydymit są krystalicznymi formami krzemu, które istnieją w wyższych temperaturach i są „zamrożone” jako takie z powodu gwałtownego chłodzenia. Te formy krystaliczne są niestabilne (metastabilne) w normalnych temperaturach, a skały zawierające je są reaktywne. Opal jest amorficzną formą krzemu o zmiennej ilości wody w swej strukturze. Jest to bardzo reaktywna forma krzemu. Norma amerykańska ASTM C294 zawiera opis minerałów krzemowych.

Reaktywność krzemionki jest łączona ze stopniem uporządkowania sieci krystalicznej. Jej formy zmieniają się od bardzo reaktywnego szkła krzemowego lub opalu do niereaktywnego niespękanego kwarcu. Jednym ze stosowanych sposobów klasyfikacji minerałów krzemowych jest następujący podział:

- grupa metastabilna: opal, trydymit, krystobalit, szkło przejściowe (52% - 66% SiO_2), szkło kwaśne (ponad 66% SiO_2),
- kwarc: kwarc krypto-krystaliczny, kwarc mikrokrystaliczny, grupa chalcedonowa, która zawiera chalcedon, agat, rogowiec, krzemień, jaspis oraz optycznie odkształcony lub spękany kwarc. Kruszywa zawierające minerale kwarcowe w grupie metastabilnej, z reguły reagują bardziej gwałtownie niż te z grupy kwarcowej.

strukturami krystalicznymi, lecz mają niską gęstość, są porowate i wrażliwe na oddziaływanie wodorotlenków alkalicznych. Kruszywa, które wykazują dużą powierzchnię do wystąpienia reakcji – a więc są słabo wykrystalizowane, mają dużo defektów w sieci krystalicznej, są amorficzne, szkliste, mikroporowate – z tego powodu są podatne na reakcje [2].

Skład mineralogiczny kruszywa określa się na podstawie analizy petrograficznej. Niektóre typy skał zawierają krytyczne ilości potencjalnie reaktywnych form krzemionki, jak np. rogowiec i krzemień zawierające chalcedony, kwaśne i pośrednie skały wulkaniczne takie jak ryolit, dacyt, latyt i andezyt oraz związane porfiry i tufy, łupki, piaskowiec i piaskowiec drobnoziarnisty, kwarcyt, kwarcowe skały węglanowe, szarogłaz, argility, fility, granity i gnejsy grano-diorytowe. Powyższa lista nie jest zamknięta, a wiele kruszyw wyżej wymienionych może być reaktywnych i wywołać proces ASR również w betonie, który zawiera więcej niż wystarczającą ilość alkaliów. Drobne i grube kruszywa zawierające więcej niż poniżej podane ilości wymienionych składników są uważane za potencjalnie reaktywne (przyjęte wg NRMCA 1993):

- opal – więcej niż 0,5% [m/m],
- rogowiec lub chalcedon – więcej niż 3,0% [m/m],
- trydymit lub krystobalit – więcej niż 1,0% [m/m],
- optycznie odkształcone lub mikrokrystaliczne odmiany kwarcu – więcej niż 5,0% [m/m] (jak stwierdzono to w granitach, gnejsach granitowych, szarogłazach, argilitach, filitach, piaskowcach drobnoziarnistych oraz niektórych piaskach naturalnych i żwirach),
- naturalne szkła wulkaniczne – więcej niż 3,0% [m/m].

Powyższe należy także sprawdzić w normach ASTM 33 (AASHTO M 6/M 80), C 294, C 295.

Roztwór w porach betonu (roztwór porowy) o wysokiej zawartości alkaliów

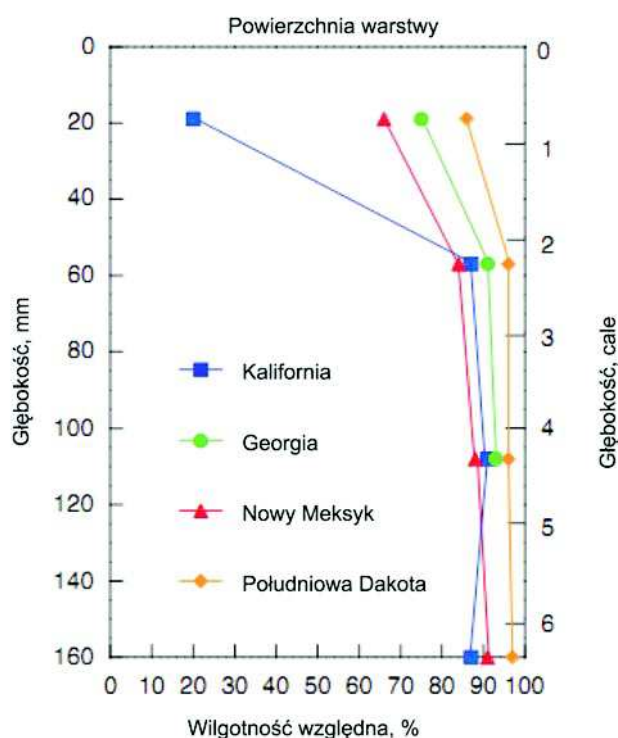
Wodorotlenki alkaliczne w roztworze porowym mogą łatwo reagować z reaktywnymi formami krzemionki w kruszywie. Gdy reaktywność kruszywa wzrasta, żelowe produkty reakcji mogą tworzyć się przy mniejszym stężeniu alkaliów. Z tego powodu stosowanie samych tylko cementów niskoalkalicznych nie gwarantuje dostatecznej kontroli nad przebiegiem reakcji ASR w przypadku kruszyw wysoce reaktywnych.

W sytuacji, gdy wskaźnik pH lub alkaliczność roztworu w porach wzrasta, większa jest wówczas możliwość wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka. Przy wyższym stężeniu wodorotlenków alkalicznych, nawet bardziej stabilne formy krzemionki są podatne na oddziaływanie alkaliów [17]. Gdy stężenie alkaliów jest wystarczająco wysokie, wodorotlenki alkaliczne rozbijają nawet silniejsze wiązania krzemowe stwierdzone w mniej reaktywnych kruszywach i tworzą żelowe produkty reakcji. Tłumaczy to, dlaczego kruszywa uważane za niereaktywne, niekiedy są podatne na reakcje ASR.

Powtarzalne cykle namakania i wysychania betonu mogą spowodować wysokie, niekiedy lokalne stężenia alkaliów. Przy ruchach wilgoci w obrębie struktury betonu, rozpuszczone alkalia przemieszczają się wraz z nią i pozostają po odparowaniu wilgoci z powierzchni betonu. Proces ten, znany jako migracja alkaliów, może spowodować wysokie lokalne stężenia alkaliów na powierzchni parowania nawet wtedy, gdy stężenie alkaliów w betonie jest niskie.

Dostateczna wilgotność

Wilgoć umożliwia migrację jonów alkalicznych do miejsc potencjalnej reakcji a powstający żel absorbuje wilgoć, co prowadzi do jego pęcznienia. Szkodliwe reakcje ASR z tego powodu nie występują w betonach nie narażonych na zawilgocenie w czasie eksploatacji. Badania wykazały, że ekspansywny proces ASR może wystąpić w betonie o wilgotności względnej ponad 80% [10,16]. Jednakże w przypadku betonów dobrze pielęgnowanych w suchych rejonach, możliwe jest, aby wilgotność względna utrzymywała się w nich stale na poziomie ponad 80% zaraz pod ich powierzchnią, nawet po upływie kilku dekad (Rysunek 2 [3]).



Rys. 2. Wilgotność względna w stosunku do głębokości betonu nawiązanej w różnych klimatach stanowych [3]

Każde zmniejszenie przepuszczalności betonu poprzez zastosowanie niskiego współczynnika wodno-cementowego, dodatkowe materiały wiążące (SCMs) lub inne metody, redukują ruch wilgoci i alkaliów do i w głąb betonu. Stwierdzono, że bardziej szczelne betony w wieku do 19 miesięcy, o niższym współczynniku wodno-cementowym (0,35), ulegają niższej ekspansji, niż betony o wyższym współczynniku wodno-cementowym [19].

Całkowita zawartość alkaliów w betonie

Możliwość wystąpienia procesu ASR wzrasta wraz ze wzrostem zawartości alkaliów w betonie. Na przykład metoda prognozowania ww. procesu stosowana w Kanadzie, odnosi się do całkowitego „obciążenia” alkalicznego betonu [6, 28]. Przyjmując zachowanie się danego rodzaju betonu w terenie jako referencyjne, ustala się granice alkaliów w betonie tak,

aby móc kontrolować proces ASR. Podejście to ma największe zastosowanie w przypadku betonów zawierających jako jedyne materiały wiążące tylko cementy portlandzkie. Może mieć również zastosowanie (z określoną poprawką) do betonów zawierających także dodatkowe materiały wiążące (SCMs).

Idealnie, całkowite obciążenie alkaliami powinno uwzględniać tego rodzaju związki ze wszystkich składników betonu. Jednakże, powszechne jest uwzględnianie tylko alkaliów z cementu i czasami innych materiałów wiążących, ponieważ wpływ alkaliów z innych składników betonu jest zazwyczaj niewielki. Dlatego zawartość alkaliów w betonie jest obliczana wg poniższego wzoru:

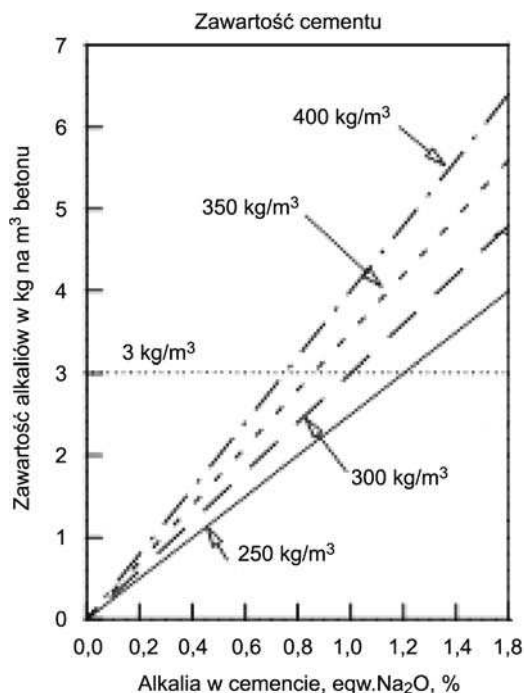
$$\frac{(\text{kg cement/m}^3) \times (\% \text{Na}_2\text{O ekwiwalentne}^4 \text{ w cemencie})}{100} = \text{kg alkaliów/m}^3$$

Uwaga: W przypadku obecności dodatkowych materiałów wiążących w betonie, część alkaliów z nich pochodzących może być dodana do ww. równania. W pewnych krajach europejskich, takich jak Wielka Brytania, efektywna zawartość alkaliów jest sumą całkowitego ekwiwalentnego tlenu sodu zawartego w cemencie portlandzkim, naturalnej pucolanie, pyłe krzemionkowe oraz procentu zawartości całkowitego ekwiwalentnego tlenu sodu w popiele lotnym i żuźlu (17% popiół lotny i 50% żuźel). Inne kraje, takie jak Kanada, nie przyjmują dodatkowych materiałów wiążących do obliczeń.

W przypadku istnienia możliwości wystąpienia reakcji ASR, dopuszczalne granice zawartości alkaliów w betonie przyjęte w Kanadzie [6] wahają się pomiędzy 1,8 kg/m³ a 3,0 kg/m³, uwzględniając reaktywność kruszyw, wymiary elementów betonowanych oraz charakterystyki środowiska (CSA-A23.1 2004). Rysunek 3 przedstawia całkowitą zawartość alkaliów w betonie, w zależności od różnych zawartości cementu oraz stopnia alkaliczności cementu, wraz z pokazaną graniczną wartością 3,0 kg/m³.

W USA często stosowaną metodą kontroli zawartości alkaliów w betonie jest wymaganie zastosowania w nim cementu niskoalkalicznego (wyspecyfikowanego w normie ASTM C150 [AASHTO M85]), który posiada zawartość ekwiwalentnego tlenu sodu nie więcej niż 0,60%). Beton wyprodukowany z cementem niskoalkalicznym może nadal wykazywać ekspansywny proces ASR, w przypadkach gdy ruch wilgoci spowoduje koncentrację alkaliów w jednym miejscu [28], gdy kruszywo jest wyjątkowo reaktywne, alkalia pochodzą z pewnych dodatkowych materiałów wiążących i domieszek chemicznych, jak również z kruszyw i wody do mieszanki lub gdy całkowita zawartość alkaliów w betonie jest wysoka z powodu wysokiej zawartości cementu w mieszance betonowej. Alkalia ze źródeł zewnętrznych mogą również przyczynić się do wzrostu zawartości alkaliów w betonie.

⁴ Całkowita (rozpuszczalna w kwasach) zawartość alkaliów w cemencie portlandzkim obejmuje zarówno tlenek sodu (Na₂O), jak i tlenek potasu (K₂O), ale jest zwyczajowo wyrażana jako ekwiwalentny tlenek sodu wg wzoru: ekwiwalentny Na₂O^{eqv} = Na₂O + 0,658 (K₂O). Tlenki sodu i potasu mogą być określone jako część badań chemicznych wg metody ASTM C 114. Ekwiwalentny Na₂O^{eqv} jest rutynowo podawany w raporcie z badania zmielenia danego cementu.



Rys. 3. Alkalia (jako ekwiwalentny Na₂O) na metr sześcienny (jard sześcienny) betonu w funkcji zawartości cementu w betonie oraz alkaliów w cemencie [3]

Źródła zewnętrzne

Alkalia zewnętrzne mogą zwiększyć ekspansję betonu z powodu ASR, szczególnie gdy beton jest spękany lub przepuszczalny [9]. Najczęstszymi źródłami alkaliów zewnętrznych są sole odladzające, woda morska, woda gruntowa oraz woda pochodząca z procesów przemysłowych. W szczególności stosowanie środków do odladzania nawierzchni może przyczynić się znacznie do wzrostu zawartości alkaliów. Roztwory odladzające z wykorzystaniem chlorku sodu oraz woda morska mogą dostarczać zasadniczo nieograniczonej ilości alkaliów [23]. Zanurzając w roztworze chlorku sodu graniastosłupy betonowe zawierające kruszywa reaktywne, możliwe jest stwierdzenie zwiększania się odkształceń i uszkodzeń betonu, szczególnie w podwyższonej temperaturze [15]. Obecnie trwają badania innych chlorkowych środków odladzających, takich jak octany potasu lub mrówczany sodu, odnośnie ich wpływu na intensywność reakcji ASR.

Istnieją sposoby redukcji wnikania alkaliów zewnętrznych. Zalicza się do nich odpowiednie wytwarzanie mieszanki betonowej, układanie i pielęgnację betonu, zastosowanie dodatkowych materiałów wiążących oraz materiałów wiążących o niskiej zawartości wody. Dzięki podanym sposobom obniżona jest przepuszczalność betonu, spowolnione wnikanie alkaliów zewnętrznych i zredukowana możliwość ekspansji wskutek reakcji ASR. Zabezpieczające powłoki i uszczelnienia stanowią barierę dla wody morskiej, środków odladzających i innych źródeł alkaliów. W niektórych przypadkach, regularne czyszczenie powierzchni betonu może być równie przydatne, tak aby występujące na niej substancje chemiczne (głównie sole) nie były przenoszone

i nie miały szans do wnikania w beton i wywołania reakcji ASR. Niestety, niektóre z ww. sposobów mogą nie być praktycznymi rozwiązaniami w przypadku nawierzchni drogowych.

Nawilgocenie i wysychanie

Suchy stan betonu obniża możliwość jego ekspansywnego pęknięcia wskutek reaktywności alkaliczno-krzemowej. Beton wewnątrz konstrukcji jest zazwyczaj bardziej suchy niż zewnętrzny. Beton, który ma wysoką początkową zawartość wody, może jednak utrzymywać wysoką wewnętrzną wilgotność względną, gdy nie ma możliwości przeschnięcia. Wyższe wartości wilgotności betonu mogą podtrzymywać reakcję ASR, ale nie jest do końca wiadome, czy częste nasycanie lub cykle nawilgocenia i wysuszania powodują więcej uszkodzeń w betonie [2]. Wiadomo natomiast, że migracja alkaliów może wystąpić przy zmiennym nawilgacaniu i wysychaniu, koncentrując alkalia obok strefy wysychania i powodując tam wystąpienie reakcji [6]. W związku z tym, należy ograniczyć ilość dostępnej wilgoci, jak też i liczbę cykli namakania – wysuszania betonu konstrukcji, poprzez zapewnienie jej dobrego systemu odwodnienia.

Temperatura

Obiekty wykonane z betonu, poddane działaniu wyższych temperatur, są bardziej podatne na proces ASR niż te w niższych temperaturach, ponieważ tempo procesu ASR zazwyczaj wzrasta ze wzrostem temperatury [9]. W przypadku większości kruszyw wyższe temperatury również oznaczają wyższe odkształcenia końcowe. Niektóre wyniki badań wskazują, że niższe temperatury, 13°C i 20°C w stosunku do 38°C, spowodowały znacznie większe końcowe odkształcenia w przypadku pewnych kruszyw [10]. Wpływ wysokiej lub niskiej temperatury na rozszerzalność końcową betonu zależy od zastosowanego kruszywa, w większości przypadków reakcje te występują z większą intensywnością w podwyższonej temperaturze.

Reakcja Alkalia-Węglany (ACR)

Mechanizm procesu ACR

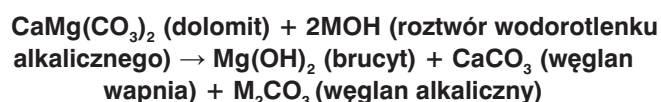
Reakcje obserwowane w niektórych typach skał dolomitowych są klasyfikowane jako reakcje alkalia-węglany (ACR). Tego rodzaju reaktywne skały zwykle zawierają w tym przypadku większe kryształy dolomitu, rozproszone i otoczone przez drobnoziarnistą matrycę kalcytu i itu. Kalcyt jest jedną z form mineralogicznych węglanu wapnia, natomiast dolomit to powszechna nazwa węglanu wapniowo-magnezowego. W praktyce reakcje ACR występują raczej rzadko, ponieważ kruszywa podatne na tego rodzaju reakcje są niezalecane do betonu również z innych powodów, jak na przykład z powodu zbyt niskiej wytrzymałości.

Ilasty wapień dolomitowy zawiera kalcyt oraz dolomit z niewielką ilością itu, a także może zawierać śladowe ilości reaktywnej krzemionki. Reaktywność alkaliczna skał węglanowych zazwyczaj nie zależy od składu minerałów ilastych [14]. Kruzywa są potencjalnie podatne na ekspansywny zjawisko ACR, gdy posiadają następujące charakterystyki litologiczne [21], [22] i [24]:

- zawartość itu lub zawartość nierozpuszczalnych części stałych, w granicach od 5% do 25% (m/m),
- zawartość dolomitu (procent frakcji węglanowej) od 40% do 60%,
- wzajemnie zaklinowane ziarna dolomitowe (podczas ostatnio obserwowanego odkształcenia),
- mały wymiar (25 do 30 μm) nieciągniętych kryształów dolomitu (romby), rozproszonych w matrycy itowej.

Dedolomityzacja (rozkład dolomitu)

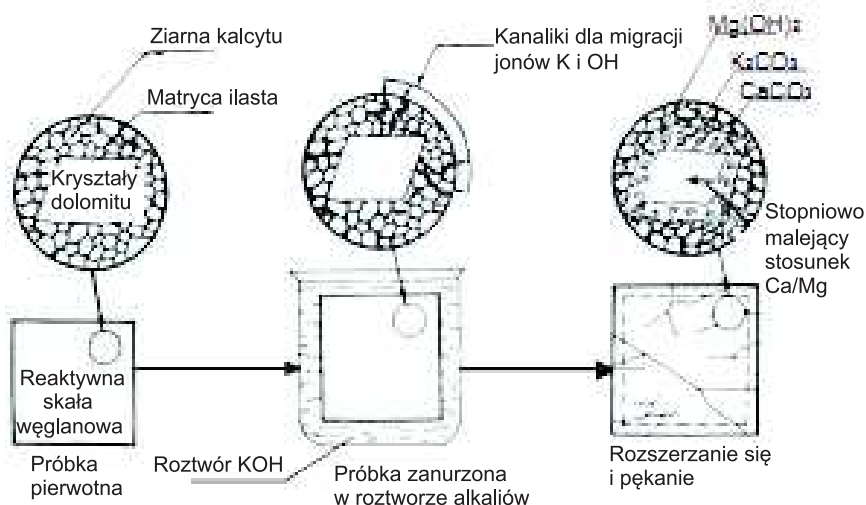
Dedolomityzacja oznaczająca rozpad dolomitu zwykle jest kojarzona z ekspansywną formą reakcji ACR [7]. Beton, który zawiera kruszywo dolomitowe i uległ ekspansji także zawiera brucyt (wodorotlenek magnezu, $Mg(OH)_2$), który tworzy się w procesie dedolomityzacji. Dedolomityzacja przebiega wg następującego równania [7]:



Gdzie: M symbolizuje pierwiastek alkaliczny, taki jak potas, sód lub lit.

Na rysunku 4 przedstawiono proces dedolomityzacji.

Ekspansja może być spowodowana kombinacją migracji jonów alkalicznych i molekuł wody do ograniczonej przestrzeni matrycy drobnoziarnistej, otaczającej romb dolomitu, migracją tych materiałów w głąb rombu oraz wzrostem i zmianą ułożenia produktów dedolomityzacji, szczególnie brucytu, który wywiera ciśnienie w czasie, gdy krystalizuje.



Rys. 4. Schemat mechanizmu reakcji alkalia-węglany (ACR). Kryształ dolomitu łączy się z alkaliami w roztworze, aby utworzyć brucyt oraz węglany potasu i wapnia [3]

Reakcja dedolomityzacji i następująca potem krystalizacja brucytu może spowodować znaczną ekspansję betonu. Kwestia, czy dedolomityzacja powoduje ekspansję bezpośrednio czy pośrednio, jest to zwykle warunek wstępny do dalszych procesów zmian wymiarów betonu [24]. W wykonanym badaniu zniszczonej nawierzchni dolomit nie wykazywał zmian, ponieważ nie wykryto brucytu. Stwierdzono, że spękania powstały wskutek sił rozszerzających, powstałych w wyniku reakcji chemicznej i pęcznienia minerałów ilastych w matrycy kruszywowej [25].

Inne czynniki powodujące zajście procesu ACR

Nominalny maksymalny wymiar kruszywa reaktywnego wpływa na wielkość i zakres reakcji. Badania wykonane ze skałą podatną na ACR i cementem wysokoalkalicznym wykazały, że zarówno zakres, jak i stopień ekspansji zmniejszał się wraz ze zmniejszaniem się nominalnego maksymalnego wymiaru kruszywa [22]. Beton może zawierać pewien procent węglanowych kruszyw reaktywnych bez wystąpienia w nim szkodliwych zjawisk ekspansji.

Na intensywność reakcji alkalia-węglany wpływa także alkaliczność roztworu w porach betonu. Proces ACR może wystąpić w roztworze o względnie niskim odczynie pH. Gdy wskaźnik pH roztworu w porach wzrasta, wzrasta także skłonność do reakcji alkalia-węglany. Podczas procesu ACR, wodorotlenek wapnia utworzony poprzez hydratację cementu portlandzkiego może łączyć się z węglanami alkalicznymi wytworzonymi w początkowej reakcji (patrz poprzednie równanie) i odtwarzać wodorotlenek alkaliczny oraz węglan wapnia. Reakcja ta nie tylko odtwarza alkalia, ale także redukuje koncentrację jonów węglanowych i przyspiesza reakcję dedolomityzacji. Cementy niskoalkaliczne i dodatkowe materiały wiążące – nawet przy dużych ich zawartościach – w efektywny sposób nie redukują procesu ACR do akceptowalnego poziomu [24, 25].

Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych w artykule doświadczeń amerykańskich i australijskich dotyczących analizy przyczyn występowania szkodliwych procesów AAR, można sformułować następujące wnioski:

- Większość kruszyw stosowanych do produkcji betonów jest chemicznie stabilna.
- Beton w trakcie eksploatacji nie podlegający zawilgoceniu zasadniczo zmniejsza ryzyko wystąpienia reakcji AAR.
- Pewne formy reakcji AAR nie wywołują uszkodzeń (ekspansji) betonu.
- W celu ograniczenia możliwości wystąpienia reakcji ASR należy przede wszystkim poznać jej mechanizm, wykonać odpowiednie badania pozwalające zidentyfikować kruszywa potencjalnie reaktywne i jeśli jest to potrzebne, podjąć kroki w celu zminimalizowania ryzyka ekspansji betonu i związanych z nią spękań.
- Reakcja typu alkalia-węglany (ACR) w betonie została udokumentowana i opisana znacznie później od reakcji typu alkalia-krzemionka (ASR).

- Nie należy mylić uszkodzeń w konstrukcjach betonowych spowodowanych przez reakcje chemiczne typu AAR z innymi uszkodzeniami powstającymi z powodu cykli zjawisk wielokrotnego zamrażania-odmrażania w regionach zimnego klimatu, skurczu betonu, działań obciążeń mechanicznych, osiadania konstrukcji, a także innych oddziaływań chemicznych na beton: jak agresja chlorkowa czy siarczkowa, mogąca doprowadzić do korozji zbrojenia betonu.
- W celu jednoznacznego stwierdzenia, że za występujące uszkodzenia w konstrukcji odpowiada wyłącznie reakcja AAR, należy dokonać szczegółowej analizy wszystkich występujących okoliczności, wykorzystując do tego celu m. in. wyniki inspekcji terenowych konstrukcji i nawierzchni betonowych.
- Zachowanie się kruszywa w betonie w rzeczywistych warunkach eksploatacji 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. Jednakże, jeśli skład kruszywa zmienia się znacznie w obszarze danego kamieniołomu lub gdy warunki ekspozycji planowanej konstrukcji będą bardziej ostre niż w obiektach wykazujących dobre cechy, lub gdy składniki betonu znacznie różnią się, wtedy kruszywo powinno być przebadane.
- Obiekty inżynierskie poddane działaniu reakcji AAR mogą być budowane z betonu normalnego, zbrojonego, prefabrykowanego lub sprężonego. Niezależnie od rodzaju zastosowanego betonu, konstrukcje bardziej narażone na działanie wilgoci są bardziej podatne na szybsze wystąpienie uszkodzeń wskutek reakcji AAR.
- Spękania w betonie 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 w betonie sprężonym, spękania przyjmują formę kierunkową, rozwijając się zgodnie z kierunkiem największego przyłożonego obciążenia. Gdy sprężenie konstrukcji zaniknie wraz z wiekiem, wtedy spękania kierunkowe mają tendencję do przyjęcia formy siatkowej, ponieważ w dalszym ciągu procesu pojawiają się spękania nieuporządkowane. Intensywność spękań jest funkcją intensywności i zakresu reakcji AAR w betonie.
- W czasie przeprowadzanych inspekcji w terenie, należy brać pod uwagę wszystkie aspekty środowiskowe oraz wszystkie elementy konstrukcji, mogące mieć wpływ na stan w jakim się ona znajduje. Funkcja obiektu oraz charakterystyki obciążeniowo-naprężeniowej jego poszczególnych elementów mają duży wpływ na wystąpienie spękań, co należy uwzględnić w przeprowadzonej analizie wytrzymałościowej. Przekroje obiektu, które narażone są na częstsze nasiąkanie/wysychanie, nagrzewanie, obciążenia, wykazują bardziej widoczne oznaki zniszczenia. Również elementy konstrukcji poddane mniejszym ograniczeniom pod względem odkształceń, wykazują bardziej oczywiste oznaki spękań AAR niż elementy pozbawione

możliwości przemieszczeń (utwardzone, ograniczone); może to być obserwowane w belkach, które wykazują więcej spękań na końcach niż w środkowej ich części.

- Niektóre objawy uszkodzeń wskutek reakcji AAR są oczywiste, sama inspekcja w terenie nie wystarcza jednak do postawienia jednoznacznej diagnozy, niezbędne są wtedy zaawansowane badania laboratoryjne. Może temu służyć opracowana w USA metoda octanu uranylowego, która polega na oznaczeniu próbki betonu tym preparatem i następnie jej obserwacji w świetle UV w ciemni. Preparat ten jest absorbowany przede wszystkim przez produkty reakcji AAR, które następnie świecą w świetle UV. W celu określenia własności tych produktów należy stosować badanie petrograficzne betonu za pomocą mikroskopii konwencjonalnej i elektronicznej.

W drugiej części artykułu zostaną przedstawione przykłady występowania reakcji AAR opisane na podstawie doświadczeń amerykańskich i australijskich.

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, pages 54 to 62
- [2] S. Diamond, R.S. Barneyback Jr and L.J. Struble, On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reactions, *Proceedings of the Fifth Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, National Building Research Institute, Pretoria, South Africa, 1981, pages 1 to 11
- [3] A. Farny James, B. Kerkhoff, Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, 2007, USA
- [4] 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, pages 152 to 156
- [5] M. Glinicki, Reakcje Alkalii-Kruszywa w Betonie i Zapobieganie, *Materiały Konferencyjno-Szkoleniowe, Józefów marzec 2015*, IPPT PAN Warszawa
- [6] P.E. Grattan-Bellew, Alkali-Silica Reaction – Canadian Experience, in The Alkali-Silica Reaction in Concrete, edited by Swamy, R.N., Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, pages 223 to 248
- [7] D.W. Hadley, - Alkali Reactivity of Carbonate Rocks - Expansion and Dedolomitization, *Research Department Bulletin RX221, Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, 1961
- [8] D.W. Hadley, Field and Laboratory Studies on the Reactivity of Sand-Gravel Aggregates, *Research Department Bulletin RX221, Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, 1968
- [9] R. Helmuth, Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research, SHRP-C342, *Strategic Highway Research Program*, Washington D.C., 1993, Also PCA Publication LT 177
- [10] T.N. Jones and A.B. Poole, "Alkali-Silica Reaction in Several U.K. Concretes: The Effect of Temperature and Humidity on Expansion and the Significance of Ettringite Development" in Concrete Alkali-Aggregate Reactions, *Proceedings of the 7th International Conference*, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pages 446 to 450
- [11] R. Landgren and D.W. Hadley, Surface Popouts caused by Alkali-Aggregate Reactions, *RD 121, PCA*, Skokie, Illinois, 2002, 20 pages.
- [12] 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
- [13] B. Mather, "New Concern over Alkali-Aggregate Reaction", *Joint Technical Paper by National Aggregates Association and National Ready Mixed Concrete Association, NAA, Circular No.122 and NRMCA Publication No 149*, Silver Spring, Maryland, 1975
- [14] 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, pages 410 to 424. Also PCA Publication LT205
- [15] D. Palmer, Chairman, The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction, *Report of a Working Party, 2nd edition, British Cement Association*, Slough, Great Britain, 1992, Also PCA Publication LT 166
- [16] W.F. Perenchio, I. Kaufman, R.J. Krause, "Concrete Repair in a Desert Environment", *Concrete International, American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, February 1991, pages 23 to 26
- [17] A.B. Poole, "Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, "The Alkali-Silica Reaction in Concrete, edited by Swamy, R.N., VanNostrand, R., New York, New York, 1992
- [18] 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
- [19] D. Stark, "Effects of Water-Cement Ratio on Expansion Due ASR", *Concrete Technology Today, PL951*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, March 1955a
- [20] D. Stark, Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, *SHRP-C/FR-91-101, Strategic Highway Research Program*
- [21] E.G. Swenson and J.E. Gillott, "Characteristics of Kingston Carbonate Rock Reaction", Concrete Quality Control, Aggregate Characteristics and the Cement –Aggregate Reaction, *Bulletin No. 275, Highway Research Board*, Washington D.C., 1960, pages 18 to 31
- [22] E.G. Swenson and J.E. Gillott, "Alkali Reactivity of Dolomitic Limestone Aggregate", *Magazine of Concrete Research, Vol.19 No. 59, Cement and Concrete Association*, London, June 1967, pages 95 to 104
- [23] R.N. Swamy and M.M. Al-Asali, "New Test Methods for Alkali-Silica Reaction" in Concrete Alkali-Aggregate R, *Proceedings of the 7th Conference*, edited by Graham-Bellew, Patrick E. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey 1987, pages 324 to 329
- [24] M. Tang, M. Deng and X. Lon, and S. Han, "Studies on Alkali-Carbonate Reaction, *ACI Materials Journal, American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, January-February 1994, pages 26 to 29
- [25] M. Tang, Z. Liu and S. Han, "Mechanism of Alkali-Carbonate Reaction" in Concrete Alkali-Aggregate Reactions, *Proceedings of the 7th International Conference*, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pages 275 to 279
- [26] S. Wong, Investigation of Concrete from I-20 near Monroe, Louisiana, *Army Corps of Engineers Report to Louisiana Transport Research Center, PCA R & D*
- [27] 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, pages from 157 to 162
- [28] H. Xu, "On the Alkali Content of Cement in AAR", in Concrete Alkali-Aggregate Reactions, *Proceedings of the 7th International Conference*, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1987, pages 451 to 455