

Ocena stanu betonu w elementach wiaduktu drogowego

Dr inż. Zdzisława Owsiak, Politechnika Świętokrzyska

1. Wprowadzenie

Ważnym zagadnieniem mającym decydujący wpływ w ocenie stanu technicznego całej konstrukcji jest ocena materiału wchodzącego w skład badanego obiektu. W wiaduktach drogowych eksploatowanych w środowisku powietrznym największe zagrożenie dla betonu stwarzają: dwutlenek węgla, zawarty w atmosferze, chlorki, pochodzące z soli powszechnie stosowanych do odładzania oraz związki siarki pochodzące ze spalin. W wyniku oddziaływania tych agresywnych czynników następuje albo zobojętnianie betonu albo skażenie go agresywnymi substancjami. Celem pracy jest ocena stanu betonu w elementach mostu w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych. Badaniem objęto rdzenie betonowe pobrane z tych elementów mostu, które w obserwacjach makroskopowych nie wykazywały uszkodzeń korozyjnych. Wykonano badania fizyko-mechaniczne betonu, określono jego skład oraz zawartości chlorków, siarczanów i zasięg karbonatyzacji. Przeprowadzono również badania mikrostruktury metodą mikroskopii skaningowej.

2. Przyczyny korozji mostowych elementów betonowych

Od konstrukcji budowlanych wymaga się, aby w przyjętym okresie eksploatacji zapewniona była ich zdolność do użytkowania przy zachowaniu określonych cech wytrzymałościowych. Ważnym aspektem jest, aby obiekt mógł spełniać określone warunki jakościowe, estetyczne, odpor-

nościowe na działanie różnych czynników mogących pogarszać żywotność konstrukcji. Na niektóre z tych czynników nie mamy wpływu, ale zdarza się również, że sami przyczyniamy się do degradacji budowli. Niemożliwe jest bowiem, aby konstrukcja była niezniszczalna. Zarówno ingerencja człowieka, jak i otaczające środowisko zewnętrzne ma wpływ na stan budowli. Przyczyną destrukcji mogą być także procesy korozji wewnętrznej.

W konstrukcjach mostowych, żelbetowych i sprężonych podstawową ochronę strukturalną zbrojenia spełnia beton i razem ze stalą jest głównym materiałem konstrukcyjnym. Występowanie wielu uszkodzonych, a nawet zniszczonych fragmentów lub całych elementów mostowych może prowadzić do utraty ich nośności. Uszkodzenia betonu obserwowane są we wszystkich elementach mostowych, znacznie więcej ich występuje w elementach betonowanych na placu budowy, przyczółkach, oczepach i płytach, a mniej w prefabrykacjach, belkach czy słupach [1]. Konieczność przedłużenia czasu eksploatacji obiektu wiąże się z koniecznością remontowania lub wzmacniania poszczególnych elementów konstrukcji mostowej. Jest to zadanie trudne i złożone, a przy tym gospodarczo ważne. Zagadnienie to wymaga współpracy specjalistów z różnych dziedzin – naukowców i praktyków, celem całościowego ujęcia problematyki od podstaw naukowych po zalecenia techniczne.

Beton (także wykonane z niego elementy konstrukcji) uważano przez wiele lat za materiał odporny na korozję. Wzrost agresywno-

ści środowiska, praca elementów mostowych w warunkach zamrażania i odmrażania oraz stosowanie soli odładzających, a także wiele błędów projektowych i wykonawczych sprawiły, że w ostatnich latach obserwuje się wyraźne zwiększenie korozji mostów z betonu (rys. 1). Destrukcyjne oddziaływanie środowiska na beton prowadzi do obniżenia jego właściwości użytkowych i rozpoczyna się zwykle zmianami zaatakowanej powierzchni, a następnie postępuje w głąb danego materiału wybiórco, drogą najefektywniejszego działania, niszcząc substancje najbardziej na nią podatne.

Do podstawowych przyczyn powodujących stosunkowo szybkie tempo korozji mostów betonowych



Rys. 1. Widok skorodowanych elementów mostu drogowego nad torami kolejowymi

można zaliczyć narażenie konstrukcji mostowej na bezpośrednie oddziaływanie środowiska podczas eksploatacji, to jest oddziaływanie zmiennych warunków temperaturowych i wilgotnościowych, duże gradienty cyklicznie zmiennych obciążeń, oddziaływanie toksycznych spalin, działanie soli odładzających itp. Destrukcyjne oddziaływanie na mosty może dotyczyć zarówno betonu, jak i stali zbrojenowej (rys. 2).



Rys. 2. Przykłady skorodowanych elementów mostowych

Do zewnętrznych czynników wywołujących korozję betonu można zaliczyć fizyczne oddziaływanie środowiska, które powoduje łuszczenie i pęknięcie, a także reagujące z betonem substancje chemiczne (miękkie wody, kwasy, sole odładzające i siarczany) wywołujące korozję ługującą lub pęczniącą. Do wpływów wewnętrznych można zaliczyć działanie mechaniczne spowodowane zmęczeniem, naprężeniami, dochodzi wówczas do pęknięć i zarysowań konstrukcji, a także niewłaściwą jakością składników betonu (cement o nadmiernej zawartości siarczanów, alkaliów, glinianów oraz reaktywne kruszywo) powodującą także pęcznienie, rozsadzanie i łuszczenie betonu. Uszkodzenie mikrostruktury sprzyja wnikaniu czynników agresywnych w głąb elementu konstrukcji, prowadząc do strefowych zmian w składzie chemicznym betonu. Korozja wewnętrzna prowadzi do zmian zachodzących w całym przekroju elementu betonowego – w stwardniałym zaczynie cementowym lub w strefie kontaktowej

kruszywo-zaczyn, a powstające pęczniące produkty reakcji niszczą wewnętrzną mikrostrukturę. Obserwowane zniszczenie betonu może być w każdym przypadku różne, w zależności od jakości betonu, stopnia agresywności środowiska, ukształtowania konstrukcji. Mechanizm działania korozji ługującej związany jest z rozpuszczaniem i wymywaniem wodorotlenku wapniowego, a także innych składników stwardniałego zaczynu cementowego. Prowadzi to do zniszczenia mikrostruktury betonu i wzrostu jego porowatości. Szczelność betonu jest istotnym parametrem zmniejszającym podatność konstrukcji na tę korozję. Objawem tej korozji obserwowanym na powierzchni jest łuszczenie betonu oraz powstawanie wykwitów, tworzących się na powierzchni betonu w wyniku odparowania wody przesiąkającej przez niego i pozostawiającej naloty z wyfukanych soli.

Działanie korozji chlorkowej na elementy betonowe jest wywołane użyciem soli odładzających w czasie zimowego utrzymania mostu. Jeśli beton jest całkowicie nasycony wodą, chlorki przenikają przez otulinę zbrojenia w wyniku dyfuzji. W częściowo zawilgoconym betonie, migracja chlorków może być także wywołana w wyniku absorpcji i podciągania kapilarnego. Z chwilą, kiedy stężenie chlorków rozpuszczonych w cieczy porowej osiągnie wartość krytyczną, następuje uszkodzenie warstewek pasywnych na powierzchni stali i rozpoczyna się korozja, a postęp niszczenia zbrojenia jest w środowiskach chlorkowych bardzo szybki, a czas po którym chlorki osiągną powierzchnię zbrojenia jest równoznaczny z okresem użytkowania konstrukcji [5]. Główne mechanizmy niszczenia betonu przez roztwory chlorkowe to reakcja chlorków z wodorotlenkiem wapnia lub fazą C-S-H, w wyniku której tworzą się pęczniące zasadowe chlorki wapniowe lub magnezowe. Powstawanie soli Friedla

ostatnio uznaje się za czynnik korzystny, ze względu na wiązanie jonów chlorkowych i zmniejszenie ich zawartości w fazie ciekłej betonu.

W wyniku oddziaływania dwutlenku węgla z powietrza beton z upływem czasu ulega karbonatyzacji. Dwutlenek węgla wnikając w głąb betonu reaguje przede wszystkim z wodorotlenkiem wapnia, a także z innymi składnikami zaczynu cementowego tworząc kalcyt, wateryt czy aragonit. Krystalizujący w porach węglan wapnia zmniejsza porowatość całkowitą w obszarze skarbonatyzowanym, jednocześnie obniża pH roztworu w porach betonu powodując obniżenie pH i zdolności pasywacyjnych betonu wobec stali zbrojeniowej. Także powstający węglan wapnia reagując z dwutlenkiem węgla i wodą tworzy kwaśny węglan wapniowy podlegający procesowi ługowania. Korozja siarczanowa jest najgroźniejszym typem korozji betonu, a bezpośrednim jej źródłem mogą być spaliny pojazdów silnikowych czy dymy z zakładów przemysłowych lub ciepłowni. Przebieg korozji siarczanowej zależy od stężenia siarczanów oraz od zawartości glinianów w betonie. Podczas tego rodzaju korozji powstają, nierozpuszczalne krystaliczne produkty reakcji (ettringit, gips, thaumazyt), które przyłączając wodę zwiększają znacznie swoją objętość i powodują niszczenie mikrostruktury betonu. W elementach żelbetonowych następuje niszczenie otuliny zbrojenia (rysy, spękania, złuszczenia) oraz utrata jej zdolności ochronnych.

3. Wyniki badań

3.1. Metodyka badań

Zastosowane metody badań laboratoryjnych obejmują: określenie wytrzymałości betonu na ściskanie, gęstości objętościowej, składu jakościowego i ilościowego betonu (rodzaj kruszywa, zawartość kruszywa i cementu), głębokości zobojętnienia betonu, zawartości chlor-

Tabela 1. Skład betonu z kruszywem bazaltowym

Charakterystyka		Uzyskany wynik
Gęstość objętościowa betonu	γ_b	2816 kg/m ³
Zawartość w betonie części nierozpuszczalnych w HCl	K_{czn}	79,36%
Zawartość w betonie	kruszywa K_{4-16}	1490 kg/m ³
	piasku P	745 kg/m ³
Całkowita zawartość kruszywa w betonie	K_{kg}	2235 kg/m ³
Zawartość w betonie substancji przyłączonych w czasie wiązania i twardnienia	S_{kg}	173 kg/m ³
Zawartość cementu w betonie	C	410 kg/m ³

Tabela 2. Skład betonu z kruszywem węglanowym

Charakterystyka		Uzyskany wynik
Gęstość objętościowa betonu	γ_b	2588 kg/m ³
Zawartość w betonie części nierozpuszczalnych w HCl	K_{czn}	24,5%
Zawartość w betonie	kruszywa K_{4-16}	1411 kg/m ³
	piasku P	634 kg/m ³
Całkowita zawartość kruszywa w betonie	K_{kg}	2045 kg/m ³
Zawartość w betonie substancji przyłączonych w czasie wiązania i twardnienia	S_{kg}	166 kg/m ³
Zawartość cementu w betonie	C	377 kg/m ³

ków i siarczanów. Wytrzymałość na ścislenie betonu określono metodą niszczącą na próbkach walcowych ($d = h = 100$ mm) wyciętych z elementów konstrukcji [2]. Gęstość objętościową oznaczono również na pobranych odwiertach. Skład betonu, zawartość chlorków, siarczanów oznaczono na rozdrobionych próbkach pobranych z odwiertów [3]. Głębokość karbonatyzacji betonu oznaczono w otworach o średnicy 100 mm, niezwłocznie po ich wykonaniu w elementach betonowych. Badania wykonano określając zasięg karbonatyzacji za pomocą roztworu 0,2% tymoloftaleiny w 90% alkoholu etylowym [4]. Badania metodą mikroskopii skaningowej wykonano na świeżych przełamach próbek betonowych.

3.2. Wyniki badań właściwości i składu betonu

Wyniki badań wytrzymałości wykazały zróżnicowanie wartości w odniesieniu do poszczególnych elementów. Najwyższą wytrzyma-

łość miał beton belek i wynosiła ona od 65 do 87 MPa, a wytrzymałość betonu w elementach wylewanych na placu budowy była od 43 do 51 MPa. Wyniki badań wytrzymałości na ścislenie wyraźnie wskazują na zróżnicowanie betonu ze względu na wytrzymałość zarówno w poszczególnych elementach danego rodzaju, jak i między rodzajami elementów. Jednak beton pod względem wytrzymałości spełnia wymagania projektu co do klasy betonu B40 w prefabrykatach i B30 dla betonu monolitycznego.

Beton różnił się również ze względu na gęstość objętościową, która wynosiła dla betonu w elementach prefabrykowanych 2816 kg/m³ i 2588 kg/m³ dla betonu w elementach betonowanych na placu budowy. Wykonane badania składu fazowego metodą analizy rentgenowskiej wykazały, że beton w prefabrykatach został wykonany z kruszywa bazaltowego, a elementy betonowane na placu budowy z kruszywa węglanowego,

co uzasadnia tak duże zróżnicowanie gęstości objętościowej betonu. Oznaczony skład betonu zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Zawartość chlorków oznaczono w laboratorium w sproszkowanych próbkach betonu pobranych z określonych głębokości elementu. Wyniki badań zawartości chlorków w odniesieniu do zawartości cementu w betonie zamieszczono w tabeli 3.

Oznaczona zawartość chlorków w stosunku do masy cementu w próbkach pobranych z elementów betonowych zależy od głębokości pobrania próby i na głębokości 35 do 50 mm wynosi od 0,02 do 0,14%; na głębokości od 20 do 35 mm wynosi od 0,02 do 0,15 %, a na głębokości 5 do 20 mm wynosi 0,03 do 0,27%. Podobne zawartości chlorków w stosunku do masy cementu występują w betonie z kruszywem bazaltowym i węglanowym.

Korozja zbrojenia może się rozpocząć wtedy, gdy stężenie jonów chloru przy powierzchni stali osiągnie wartość krytyczną, według zaleceń amerykańskich (ACI) krytyczna zawartość chlorków określana jest w zawartości procentowej jonów chloru rozpuszczonych w wodzie w stosunku do masy cementu i nie może przekraczać 0,15% dla betonu sprężonego i 0,20% dla żelbetu. W normie europejskiej, podobnie jak w brytyjskiej, a także zgodnie z zaleceniami RILEM przyjęto całkowitą zawartość chlorków nie przekraczającą 0,40% masy cementu. W zależności od różnych warunków, równowaga pomiędzy zawartością chlorków występujących w fazie ciekłej i chlorków związanych może się zmieniać, w badaniach stwierdzono, że wolne chlorki mogą stanowić od 35 do 80% masy całkowitej zawartości chlorków w betonie [6]. Dla oceny właściwości ochronnych betonowej otuliny zbrojenia, na podstawie pomiaru zawartości chlorków, przyjęto dla betonu zbrojonego 0,4% zawartości chlorków w stosunku do masy cemen-

Tabela 3. Wyniki badań zawartości chlorków w elementach betonowych wiaduktu drogowego

Głębokość pobrania próby, mm	Zawartość chlorków, % masy cementu								
	beton z kruszywem bazaltowym				beton z kruszywem węglanowym				
5-20	0,032	0,270	0,120	0,030	0,200	0,140	0,180	0,080	0,030
20-35	0,020	0,150	0,080	0,030	0,150	0,120	0,150	0,020	0,020
35-50	0,018	0,120	0,018	0,030	0,120	0,120	0,140	0,020	0,020

tu, powyżej której, szczególnie w betonie skarbonatyzowanym, istnieją warunki do chlorkowej korozji stali zbrojeniowej. W przypadku skarbonatyzowanego betonu zbrojonego każda zawartość chlorków, zwłaszcza w strefach cyklicznego nawilżania betonu wodami powierzchniowymi oraz w przypadku pogorszonej szczelności betonu, sprzyja korozji stali zbrojeniowej. Zawartość chlorków w elementach betonowych nie przekracza wartości dopuszczalnej powodującej zagrożenie zbrojenia korozją chlorkową.

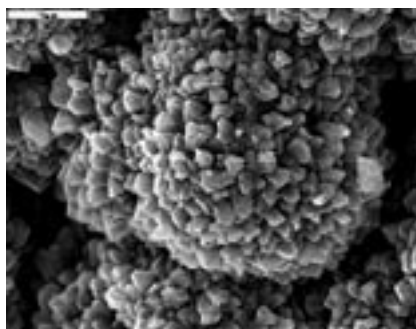
Głębokość karbonatyzacji betonu w badanych próbkach wyniosła od 3 do 9 mm, średnio 5,7 mm. Uzyskane wyniki badań mają charakter orientacyjny ze względu na wieloczynnikowy charakter procesu. Wyniki te wskazują, że głębokość karbonatyzacji betonu nie grozi korozją zbrojenia, gdyż jest znacząco mniejsza od grubości otuliny zbrojenia. Oszacowany niewielki zasięg karbonatyzacji związany jest z dobrą jakością betonu spełniającego wymagania dla projektowanej wytrzymałości B30 dla elementów wylewanych czy B40 dla elementów prefabrykowanych.

Zawartość siarczanów określono procentowo w stosunku do masy betonu. Jako dopuszczalną zawartość siarczanów przyjęto 0,5%. Większa ilość siarczanów stanowi zagrożenie dla stali i w betonie może powodować korozję siarczanową. Zbadana zawartość siarczanów w próbkach betonowych pobranych z elementów wiaduktu, nie przekroczyła 0,2% i była mniejsza od wartości dopuszczalnej

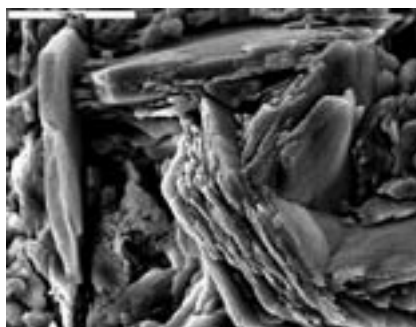
wynoszącej 0,5%. Można przyjąć, że w betonie nie występuje zagrożenie korozją siarczanową.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono mikrostrukturę betonu obserwowaną w mikroskopie skaningowym. Badania wykazały, że w skarbonatyzowanych warstwach betonu obserwuje się produkty uwęglanowania będące głównie waterytem (rys. 3). W efekcie nie występuje w tym przypadku uszczelnienie betonu, a wzrost porowatości sprzyja ztuszczaniu powierzchni betonu w warunkach zamrażania i odmrażania [7].

Działanie soli odladzających powodujące większą rozpuszczalność odmian polimorficznych węgla-



Rys. 3. Produkty uwęglanowania występujące na powierzchni elementów betonowych – wateryt



Rys. 4. Produkty uwęglanowania – kalcyt i aragonit

nu wapnia waterytu i aragonitu może również sprzyjać ztuszczaniu powierzchni betonu. Natomiast w elementach betonowych o powierzchni wykazującej w obserwacjach makroskopowych brak uszkodzeń, w warstwie skarbonatyzowanej występuje głównie kalcyt powodując zmniejszenie porowatości (rys. 4). Wyjaśnienie tych zagadnień wymaga dalszych badań.

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że:

- elementy wiaduktu zostały wykonane z dwóch rodzajów betonu: elementy prefabrykowane z betonu klasy B40 z kruszywa bazaltowego, a elementy wylewane z betonu klasy B30 z kruszywa węglanowego;
- oznaczona zawartość siarczanów w betonie nie stwarza zagrożenia z powodu korozji siarczanowej;
- agresja chlorkowa i węglanowa nie przekroczyła głębokości otuliny zbrojenia, zawartość chlorków w betonie jest mniejsza od dopuszczalnej;
- wyniki badań mikrostruktury wykazały, że w wyniku karbonatyzacji na powierzchni betonu powstała oprócz kalcytu znaczna ilość odmian polimorficznych węgla wapnia waterytu i aragonitu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Piasta J., Owsiak Z. i inni, „Trwałość betonu w istniejących wiaduktach A-4. Materiały XLII Konf. Nauk., Krynica, s. 79-86, 1996
- [2] PN-EN 12504-1 Badania betonu. Część 1: 2001 Badania betonu w konstrukcjach – część 1: Odwierty rdzeniowe – wycinanie, ocena i badania wytrzymałości na ściskanie
- [3] British Standard 1881: Part 124: 1998, Methods for analysis of hardened concrete
- [4] Moczko A. i inni, Zalecenia dotyczące oceny jakości betonu „in situ” w istniejących obiektach mostowych, IBDiM, Wrocław-Żmigród, 1998
- [5] Ściślewski Z., Ochrona konstrukcji żelbetonowych, Arkady, Warszawa, 1999
- [6] Lea F. M., The Chemistry of Cement and Concrete, ED. By Peter C. Hawlett, 2001
- [7] Stark J., Wicht B., Dauerhaftigkeit von Beton der Baustoff als Werkstoff. Bau Praxis. Weimar 2001