

Oporność na korozję chlorkową podwodnego betonu naprawczego dojrzewającego w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego

Elżbieta Horszczaruk¹, Piotr Brzozowski¹, Teresa Rucińska²

¹ Katedra Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu, Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, e-mail: elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl, piotr.brzozowski@zut.edu.pl

² Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, e-mail: trucinska@zut.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań podwodnego betonu naprawczego dojrzewającego w warunkach zmiennego ciśnienia hydrostatycznego, poddanego oddziaływaniu mgły solnej. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 14147. Próbkę betonu do badań korozyjnych pobrano z elementu próbnego, które przez okres pierwszych 7 dni dojrzewały w zbiorniku ciśnieniowym i poddane były oddziaływaniu ciśnienia hydrostatycznego o wartościach od 0,1 do 0,5 MPa. Stwierdzono korzystny wpływ ciśnienia hydrostatycznego na odporność korozyjną badanego betonu. Próbkę pobrane z warstw przypowierzchniowych badanych elementów wykazały nieznacznie większą odporność na działanie chlorków co znalazło potwierdzenie w badaniach charakterystyki rozkładu porów badanych betonów.

Słowa kluczowe: betony podwodne, ciśnienie hydrostatyczne, korozja

1. Wprowadzenie

Betonowe konstrukcje hydrotechniczne pracujące w środowisku oddziaływania wody morskiej podlegają różnorodnym oddziaływaniom chemicznym i fizycznym. Zaliczyć do nich możemy:

- agresję chemiczną,
- korozję zbrojenia w wyniku oddziaływania chlorków,
- destrukcję mrozową,
- erozję solną (tzw. wietrzenie solankowe),
- erozję abrazyjną w wyniku oddziaływania rumowiska transportowanego przez wodę morską.

Podstawowym skutkiem agresji chemicznej wywołanej chlorkami jest korozja zbrojenia, która z kolei jest najczęstszą przyczyną zniszczenia betonu. Innymi skutkami agresji chlorkowej jest spadek wytrzymałości i trwałości betonów oraz utrata walorów estetycznych powierzchni betonowych [1, 7]. Powierzchnia betonu poddawana powtarzającym się cyklicznie okresom nawilżania i wysychania narażona jest na tzw. wietrzenie solankowe. Sól z wody morskiej pozostaje na powierzchni betonu i w jego porach w postaci kryształów (głównie siarczanów), które przy kolejnych okresach nawilżania ulegają ponownej hydratacji zwiększając objętość i powodują postępujące zniszczenie powierzchni betonu [6]. Słona woda jest również podciągana kapilarnie. Kryształy soli osadzają się na powierzchni betonu powyżej stałego zwierciadła wody i przy kolejnych nawilżaniach mogą wywoływać pęcznienie betonu.

Metody badań penetracji betonu przez jony chlorkowe można podzielić na dwie główne grupy: metody długoterminowe i metody przyspieszone. Do metod długoterminowych możemy zaliczyć: metodę wg normy PN-EN 13396, metodę skandynawską NT Build 443 [13] czy metodę amerykańską wg ASTM C1543 [3]. Przykładami testów przyspieszonych badań odporności betonu na penetrację chlorków jest metoda skandynawska NT Build 492 [14], najczęściej stosowana w Europie oraz metoda

amerykańska wg ASTM C1202 [2]. Żadna z tych metod nie jest jednak dedykowana korozji betonu wywołanej oddziaływaniem wody morskiej. Jedynym normowym rozwiązaniem jest zastosowanie tzw. sztucznej wody morskiej (ang. Substitute Ocean Water), której skład podano w amerykańskiej normie ASTM D1141-98 [4]. Tak wykonana woda może być używana w różnych badaniach m. in. agresji wody morskiej na beton [1, 5, 7, 12, 15].

W prowadzonych badaniach trwałości podwodnych betonów naprawczych przy wybieraniu metody badań skutków agresji chlorkowej przyjęto założenie, że betony podwodne stosowane w konstrukcjach morskich to najczęściej betony z małą ilością zbrojenia, a przedmiotem badań mają być zjawiska korozyjne zachodzące w betonie, z wyłączeniem korozji stali zbrojeniowej. Wykorzystano metodę stosowaną w badaniach kamienia naturalnego przy oznaczaniu odporności na starzenie pod działaniem mgły solnej opisaną w normie PN-EN 14147. Metoda ta zaliczana jest do metod długotrwałych i zdaniem autorów może być wykorzystana do symulacji tzw. erozji solnej powodującej wietrzenie solankowe betonów.

2. Metodyka badań

Badaniom korozyjnym poddano wyselekcjonowany na etapie wcześniejszych badań beton podwodny przeznaczony do wykonywania nowych konstrukcji hydrotechnicznych oraz napraw tych konstrukcji, szczególnie w przypadku konieczności dokonywania reprofilacji wymagających uzupełnień betonu konstrukcyjnego o znacznej objętości. Skład podwodnego betonu naprawczego, z którego pobrano próbki do badania odporności betonu na działanie mgły solnej był następujący: cement CEM I 42,5N – HSR/NA (530 kg), woda 212 l, piasek (593 kg), żwir 2-16 (1024 kg), domieszka do betonów podwodnych (4 kg) i superplastyfikator (5 l). Przyczepność betonu naprawczego do podłoża betonowego oznaczona metodą pull-off zgodnie z normą PN-EN 12626 wynosiła każdorazowo powyżej 3 MPa, niezależnie od wartości ciśnienia hydrostatycznego, w jakim dojrzał beton naprawczy. Wyniki właściwości mechanicznych badanego podwodnego betonu naprawczego przedstawiono w pracy [11]. W celu oznaczenia odporności podwodnego betonu naprawczego na korozję chlorkową wywołaną działaniem mgły solnej wykorzystano metodę stosowaną w badaniach kamienia naturalnego przy oznaczaniu odporności na starzenie pod działaniem mgły solnej. Badanie przeprowadzono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 14147.

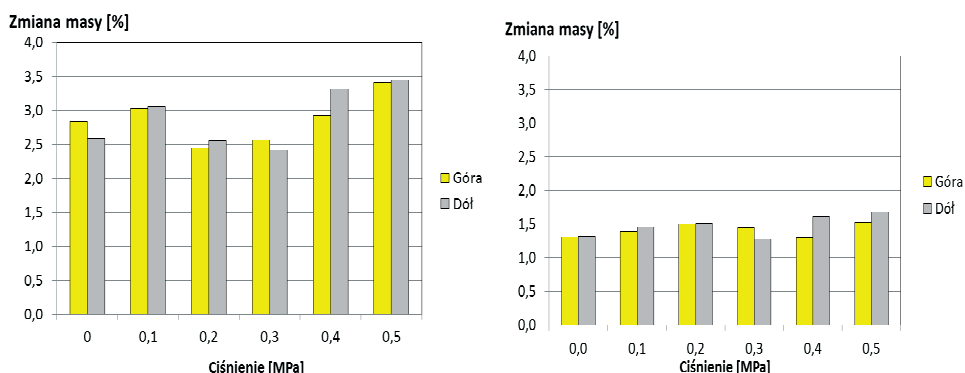
Próbki do badań korozyjnych pobrano z betonowych elementów próbnych, które wykonano z betonu o składzie 1 m³ mieszanki betonowej: cement CEM I 42,5N – HSR/NA (530 kg), woda (piasek (593 kg), żwir 2-16 (1024 kg), domieszka do betonów podwodnych (4 kg) i superplastyfikator (5 l). Elementy próbne o objętości ok. 21 litrów, betonowano w specjalnym zbiorniku ciśnieniowym, podając mieszankę betonową grawitacyjnie przez rurę zasypową. Mieszanka była układana w formie PVC, która znajduje się na dnie zbiornika wypełnionego wodą do poziomu 1 m. Po załadowaniu mieszanki górna pokrywa zamykająca rurę zasypową zbiornika była zamykana. Następnie zadawano robocze ciśnienie o wartościach od 0,1 do 0,5 MPa. Tak uformowane elementy próbne dojrzywały w zbiorniku przez okres 7 dni pod zadaniem ciśnieniem. Po 7 dniach były wyciągane ze zbiornika i po rozformowaniu dojrzywały w wodzie do czasu osiągnięcia wieku 28 dni. Szczegółowy opis zbiornika ciśnieniowego oraz metodyki wykonywania elementów próbnych i prowadzenia badań betonów podwodnych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego przedstawiono w pracy [8]. Z elementów próbnych wycinano próbki do badań wytrzymałościowych, mikrostrukturalnych oraz do badań korozyjnych. Próbkę do badań korozyjnych w komorze solnej miały kształt kostek o boku 50 mm. Kostki do badań korozyjnych pobierano z warstw dolnej i górnej elementu próbnego, oznaczając ich położenie w trakcie dojrzewania w komorze: D – dół, G – góra. Łącznie do badań korozyjnych przygotowano 60 kostek pobranych z elementów próbnych dojrzewających w zbiorniku ciśnieniowym przez 7 dni pod ciśnieniem: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5 MPa oraz formowanych i dojrzewających pod ciśnieniem atmosferycznym.

Oznaczenie odporności na starzenie pod działaniem mgły solnej przeprowadzono w komorze solnej Ascott 450 XP. Badanie obejmowało 60 cykli. Jeden cykl obejmuje czterogodzinną ekspozycję próbek na działanie mgły solnej oraz 8 godzin suszenia.

Podczas całego cyklu utrzymywana jest w komorze temperatura $35\pm 5^{\circ}\text{C}$. Po każdym 15 cyklach próbki wyjmowano z komory w celu oceny wizualnej. Po zakończeniu badania próbki zanurzono w pojemniku z wodą destylowaną w celu wypłukania soli. Objętość wody była trzy razy większa od objętości badanych próbek. Wodę wymieniano codziennie do momentu, gdy przewodność roztworu w kontakcie z próbkami nie przekroczyła dwukrotnej wartości dla wody pierwotnie użytej do płukania. Następnie próbki suszono do stałej masy, poddawano ocenie wizualnej i ważono z dokładnością do 0,1 g, w celu oznaczenia ubytku masy.

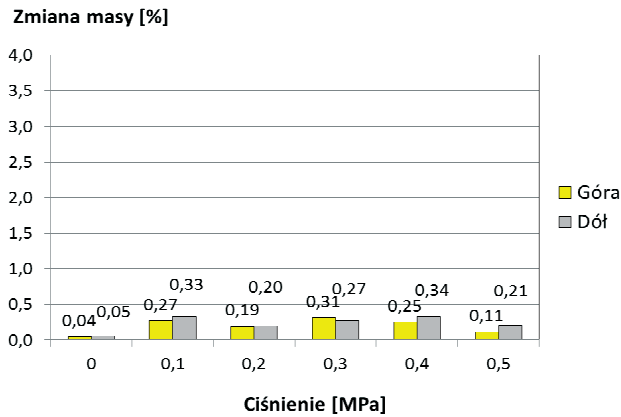
3. Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki przyrostu masy próbek betonowych po 30 i 60 cyklach napyłania mgłą solną w komorze. Zarówno po 30 jak i 60 cyklach napyłania stwierdzono nieznacznie mniejszy przyrost masy próbek pobranych z górnych części elementów próbnych niż z dolnych części elementów (za wyjątkiem próbek pobranych z elementów dojrzewających pod ciśnieniem 0,3 MPa). W przypadku wysokich wartości ciśnienia wody 0,4 -0,5 MPa różnice pomiędzy ilością wchłoniętej solanki dla próbek pobranych z części górnej i dolnej elementu próbnego są bardziej wyraźne. Końcowe wyniki badań próbek podwodnego betonu naprawczego w mgle solnej przedstawiono na rys. 2.



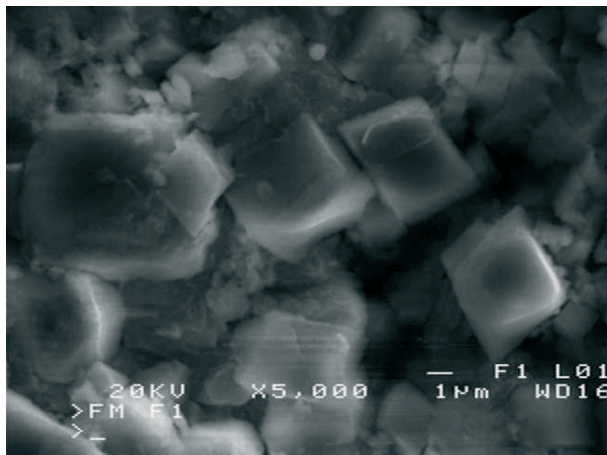
Rys. 1. Zmiana masy próbek po 30 cyklach (z lewej) i 60 cyklach (z prawej) napyłania w komorze solnej

Po 60 cyklach w komorze solnej próbki nie wykazywały wizualnych oznak zniszczenia powierzchni. Nie zaobserwowano żadnych rysów ani złuszczeń powierzchni badanych próbek. Z analizy rys. 2 zamieszczonego poniżej wynika, że nie cała sól wprowadzona i wchłonięta przez próbki w trakcie badań w komorze solnej została wypłukana, bowiem wszystkie próbki wykazały nieznaczny przyrost masy. Potwierdziły to badania SEM próbek betonu pobranych z kostek po zakończeniu badań w komorze solnej oraz procesów płukania i suszenia próbek.



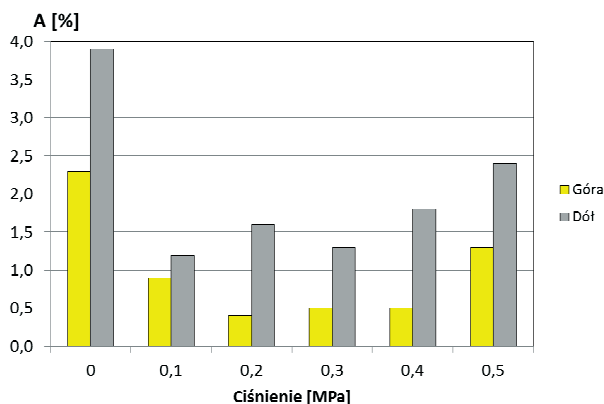
Rys. 2. Wyniki badań próbek metodą PN-EN 14147 po zakończeniu procesu wypłukiwania NaCl

Na rys. 3 przedstawiono zdjęcie powierzchni próbki pobranej z kostki betonowej po zakończeniu badań na oddziaływanie mgły solnej) z wyraźnie widocznymi kryształami NaCl (próbka pobrana z kostki wyciętej z dolnej części elementu dojrzewającego pod ciśnieniem 0,3 MPa).



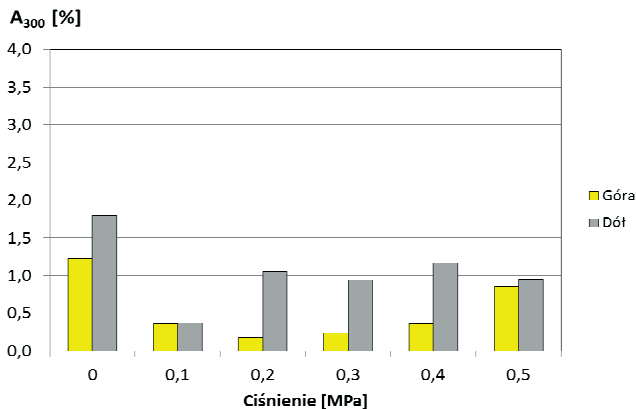
Rys. 3. Zdjęcie SEM powierzchni próbki betonu podwodnego po zakończeniu badań w komorze solnej – widoczne kryształy NaCl

Oporność na agresję chemiczną w tym agresję chlorkową związana jest ściśle z porowatością betonu. Dla badanych podwodnych betonów naprawczych dojrzewających w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego przez pierwsze 7 dni wykonano dodatkowe badania charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie zgodnie z normą PN-EN 480-11. Szczegółowe wyniki badań w zakresie ilości i rodzaju porów w badanych betonach zamieszczono w [10]. Na rys. 4 i 5 przedstawiono wyniki badań zawartości powietrza wg PN-EN 480-11 w próbkach pobranych z elementów próbnych podwodnych betonów naprawczych, które dojrzewały pod różnym ciśnieniem hydrostatycznym przez 7 dni. Próbki betonów naprawczych badane w komorze solnej były wycięte z tych samych elementów próbnych.



Rys. 4. Całkowita zawartość powietrza próbek pobranych z elementów betonowych poddanych oddziaływaniu ciśnienia hydrostatycznego przez 7 dni, określona zgodnie z PN-EN 480-11 (na podstawie [10])

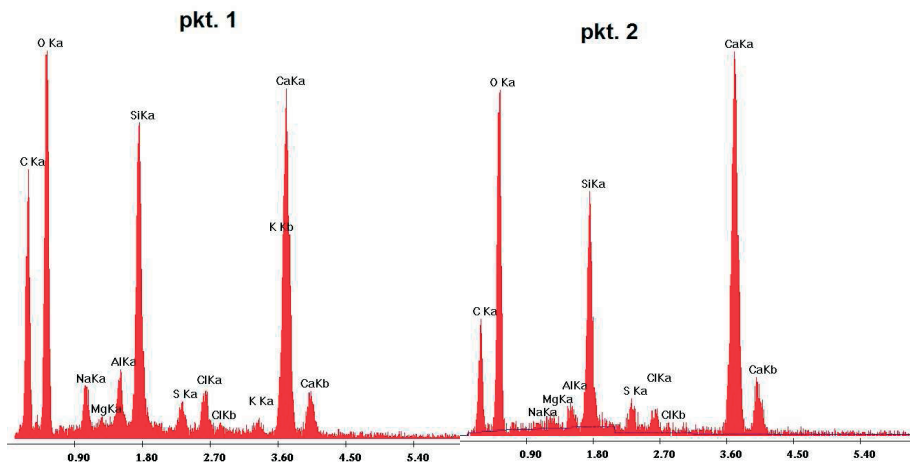
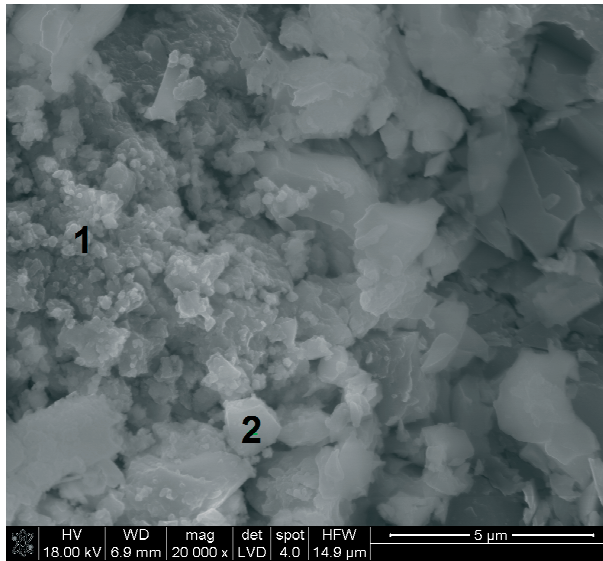
Analizując wyniki badań próbek w komorze solnej (rys. 1-2) oraz strukturę porów powietrznych badanego betonu (rys. 4-5) można zauważyć korelację pomiędzy porowatością betonu (ilością powietrza i mikroporów) a ilością NaCl zaabsorbowaną przez próbki betonowe w trakcie testu w komorze solnej. Próbki betonowe pobrane z górnej części elementów próbnych wykazały we wszystkich etapach badania metodą PN-EN 14147 większą odporność na działanie mgły solnej niż próbki pobrane z dolnych partii elementów próbnych.



Rys. 5. Zawartość mikroporów (A_{300}), próbek pobranych z elementów betonowych poddanych oddziaływaniu ciśnienia hydrostatycznego przez 7 dni, określona zgodnie z PN-EN 480-11 (na podstawie [10]):

Wyjątkiem są próbki betonu dojrzewające pod ciśnieniem 0,3 MPa, jednak różnice w przyroście masy pomiędzy warstwą górną a dolną są nieznaczne. Większą odporność korozyjną próbek pobranych z warstw górnych badanych betonów tłumaczy ich mniejsza porowatość i niższa zawartość mikroporów w stosunku do próbek pobranych z warstwy dolnej elementów betonowych. Wszystkie badane betony cechowały się dużą szczelnością. Ciśnienie hydrostatyczne wpływa korzystnie na odporność korozyjną warstw powierzchniowych badanych betonów. Jest to związane z mniejszą ilością porów powietrznych w warstwach przypowierzchniowych. Jak wykazały badania charakterystyki porów powietrznych [6], w górnych warstwach elementów betonowych zmniejsza się liczba dużych porów (powyżej 1000 μm) wraz ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego, co

jak pokazały badania [9, 10] znalazło odzwierciedlenie w zwiększonej wytrzymałości na ściskanie próbek z warstw przypowierzchniowych w stosunku do warstw dolnych. Obecność niewypłukanej soli w próbkach betonowych potwierdziły badania mikroskopowe i analiza EDS. Rys. 6 przedstawia przykładowy obraz z mikroskopu skaningowego dla próbki pobranej ze środka kostki po zakończeniu badań w komorze solnej (ciśnienie hydrostatyczne 0,4 MPa).



Rys. 6. Przykładowy obraz z mikroskopu skaningowego wraz z analizą EDS podwodnego betonu naprawczego (ciśnienie hydrostatyczne 0,4 MPa) po zakończeniu badań w komorze solnej

4. Podsumowanie

Analizując uzyskane wyniki badań korozyjnych podwodnych betonów naprawczych na oddziaływanie mgły solnej stwierdzono, że do badań betonów hydrotechnicznych narażonych na oddziaływanie wody morskiej można wykorzystywać metodę normową PN-EN 14147.

Próbki do badań korozyjnych pobrane z górnej części elementów próbnych wykazały we wszystkich etapach badania metodą PN-EN 14147 większą odporność na działanie mgły solnej niż próbki pobrane z dolnych partii elementów próbnych. Wyjątkiem są próbki betonu dojrzewające pod ciśnieniem 0,3 MPa, jednak różnice w przyroście masy pomiędzy warstwą górną a dolną są nieznaczne. Większą odporność korozyjną próbek pobranych z warstw górnych badanego betonu podwodnego tłumaczy ich mniejsza porowatość oraz niższa zawartość mikroporów w stosunku do próbek pobranych z warstwy dolnej elementów betonowych. Zaobserwowano korzystny wpływ ciśnienia hydrostatycznego na odporność korozyjną warstw przypowierzchniowych badanego betonu naprawczego.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N506 233139.

Literatura

- 1 Angst U., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - A review. *Cement and Concrete Research*, Vol. 39 (2009) 1122–1138.
- 2 ASTM C 1202-12. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to resist Chloride Ion Penetration. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, 2012, 7 pp.
- 3 ASTM C1543 - 10a. Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, 2012, 4 pp.
- 4 ASTM D1141 – 98. Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, 2012, 3 pp.
- 5 Erdogdu E., Bremner T.W., Kondratova I.L. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31 (2001) 861–867.
- 6 Fiertak M., Małolepszy J. Beton jako materiał kompozytowy podlegający wpływowi czynników środowiskowych. *Symposium Nauk. Techn. „Trwałość betonu”*, Kraków 2005, s. 5-39.
- 7 Giergiczny Z., Dąbrowska M. Korozja betonu. Przegląd metod badawczych. XII *Symposium Nauk. Techn. „Reologia w Technologii Betonu*. Gliwice 2010, s. 25-44.
- 8 Horszczaruk E., Brzozowski P., Rudnicki T. Urządzenie do badań betonów podwodnych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego, *Przegląd Budowlany*, nr 6 (2012) 36-38.
- 9 Horszczaruk E., Brzozowski P. Wpływ ciśnienia hydrostatycznego na wytrzymałość na ścislenie betonów podwodnych. *Zesz. Nauk. Polit. Rzeszowskiej*, Nr 283, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* z 59 (2012), 197-204.
- 10 Horszczaruk E., Brzozowski P., Adamczewski G. Influence of Hydrostatic Pressure on Compressive Strength of Self-Consolidating Underwater Concrete. *Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago 2013.
- 11 Horszczaruk E., Brzozowski P., Adamczewski G. Wpływ ciśnienia hydrostatycznego na rozwój wytrzymałości betonów cementowych układanych pod wodą, *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 5 (2013), 263-266.
- 12 Montes P, Bremner T.W., Lister D.H. Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26 (2004), 243–253.
- 13 NT Build 443 Concrete, hardened: Accelerate chloride penetration. *NORDTEST*. 1995, 5 pp.
- 14 NT Build 492 Concrete, Mortars and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady migration experiments. *NORDTEST*. 1999, 8 pp.
- 15 Safiuddin Md., Soudki K. A. Sealer and coating systems for the protection of concrete bridge structures. *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 37 (2011), 8188-8199.

Chloride corrosion resistance of underwater repair concrete in terms of the cutting effects of hydrostatic pressure

Elżbieta Horszczaruk¹, Piotr Brzozowski¹, Teresa Rucińska²

¹ *Department of Reinforced Concrete Structures and Concrete Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture, West Pomeranian University of Technology Szczecin, e-mail: elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl, piotr.brzozowski@zut.edu.pl*

² *Department of Roads, Bridges and Building Materials, Faculty of Civil Engineering and Architecture, West Pomeranian University of Technology Szczecin, e-mail: trucińska@zut.edu.pl*

Abstract: The paper presents the results of the study of underwater repair concrete under the effect of the salt mist. The research was conducted in accordance with the standard PN-EN 14147. Concrete samples for testing the corrosive elements of that test were taken during the first 7 days of insight in the pressure vessel and were subjected to hydrostatic pressure effects from 0,1 to 0,5 MPa. The beneficial effect of hydrostatic pressure on the corrosion resistance of tested concrete repair was. Was observed samples taken from the surface layers of the tested elements showed slightly higher resistance to chlorides which confirmed the characteristics of pore distribution of concrete in the studies.

Keywords: underwater concrete, hydrostatic pressure, corrosion