



## WPLYW CIŚNIENIA HYDROSTATYCZNEGO NA SKUTECZNOŚĆ NAPRAW BETONOWYCH KONSTRUKCJI PODWODNYCH

ELŻBIETA HORSZCZARUK, [elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl](mailto:elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl)  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

TERESA STRYSZEWSKA  
Politechnika Krakowska

**Streszczenie:** Referat przedstawia wyniki badań podwodnych betonów naprawczych o zróżnicowanym składzie, pracujących w złączu pionowym w warunkach zmiennego ciśnienia hydrostatycznego. W celu zamodelowania warunków dojrzewania betonu na różnych głębokościach wykorzystano specjalną komorę ciśnieniową. Przeanalizowano wpływ ciśnienia hydrostatycznego oraz składu badanych betonów naprawczych na przyczepność do podłoża w układzie złącza pionowego. Badania prowadzono dla samozagęszczalnych betonów podwodnych poddanych w początkowym okresie dojrzewania (7 dni) oddziaływaniu ciśnienia hydrostatycznego o wartościach: 0,1; 0,3 i 0,5 MPa. Przyczepność betonów naprawczych do podłoża oznaczono metodą pull-off. Przeprowadzono również analizę SEM w obszarze płaszczyzny zespolenia betonu naprawczego z podłożem.

**Słowa kluczowe:** beton podwodny, ciśnienie hydrostatyczne, naprawy konstrukcji betonowych, przyczepność.

### 1. Wprowadzenie

Warunki wykonywania i realizacji napraw podwodnych części konstrukcji hydrotechnicznych należą do jednych z najtrudniejszych prac remontowych. Główną rolę odgrywają tu bardzo niekorzystne oddziaływania środowiska wodnego, które w przypadku bezpośredniego układania mieszanki betonowej pod wodą nie sprzyjają prawidłowemu rozwojowi wytrzymałości betonów naprawczych. Dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii betonów specjalnych, w tym betonów podwodnych, w Polsce coraz częściej naprawy podwodnych części obiektów hydrotechnicznych wykonuje się z zastosowaniem technologii betonowania podwodnego [7, 10] rezygnując z kosztownych prac w warunkach tzw. suchego doku, które wiążą się z całkowitym wyłączeniem konstrukcji z eksploatacji.

Niezależnie od przyjętej metody naprawy podwodnych elementów konstrukcji betonowych istotną rolę odgrywa przygotowanie podłoża przed wykonaniem naprawy. Do najczęściej stosowanych metod obróbki powierzchniowej w przypadku prac prowadzonych pod wodą zaliczyć można kucie i frezowanie. Rzadziej stosuje się obróbkę powierzchni strumieniem wody pod wysokim ciśnieniem czy piaskowanie, z uwagi na wysokie koszty specjalistycznego sprzętu do prac podwodnych.

Projektując mieszanki betonowe przeznaczone do układania pod wodą należy uwzględnić nie tylko wypłukiwanie zaczynu cementowego w trakcie układania mieszanki i rozsegregowanie się składników na skutek kontaktu z wodą, ale także metodę podawania mieszanki. Do tego celu najczęściej wykorzystuje się transport pompowy. Betony stosowane w naprawach podwodnych to najczęściej betony prawie samozagęszczalne (ASCC) lub samozagęszczalne (SCC), w których skład wchodzi superplastyfikatory oraz domieszki stabilizujące określane również w literaturze jako domieszki modyfikujące lepkość (ang. *viscosity*

*modifying agent* – VMA). W celu poprawy wytrzymałości i przyczepności betonu do podłoża stosuje się również różnego rodzaju włókna polipropylenowe i stalowe. Coraz częściej w naprawach podwodnych elementów konstrukcji wykorzystuje się betony i zaprawy polimerowo-cementowe [4, 8].

W procesie projektowania betonów podwodnych weryfikację właściwości reologicznych mieszanek oraz badania wytrzymałościowe stwardniałych betonów przeprowadza się w warunkach laboratoryjnych najczęściej bez kontaktu z wodą. Modelowanie betonowania pod wodą jest zagadnieniem trudnym, dlatego też wpływ warunków zewnętrznych takich jak głębokość betonowania czy prędkości przepływającej wody na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu podwodnego jest w większości przypadków pomijany. Nieliczne badania naukowe dotyczą analizy wpływu ciśnienia hydrostatycznego i prędkości wody na właściwości mieszanek betonowych przeznaczonych do wykonywania napraw pod wodą [1, 9].

W pracy przedstawiono wyniki badań przyczepności trzech różnych podwodnych betonów naprawczych do powierzchni pionowej. Dzięki zastosowaniu specjalnej komory ciśnieniowej [5, 6] możliwe było symulowanie warunków dojrzewania betonu pod ciśnieniem hydrostatycznym już od momentu ułożenia betonu na pionowym podkładzie betonowym umieszczonym w formie. Wartość ciśnienia wynosiła: 0,1; 0,3 i 0,5 MPa, co odpowiada układaniu mieszanki betonowej na głębokościach: 10, 30 i 50 m. W składzie betonów naprawczych oprócz domieszki modyfikującej lepkość zastosowano dodatek włókien polipropylenowych oraz domieszkę kopolimeru styrenowo-akrylowego. Po 28 dniach dojrzewania w wodzie betony naprawcze zostały poddane badaniom przyczepności metodą pull-off. Dodatkowo pobrano próbki wszystkich betonów w celu przeprowadzenia analizy powierzchni zespolenia betonu naprawczego z podkładem, z wykorzystaniem technologii SEM.

## 2. Materiały i metodyka prowadzenia badań

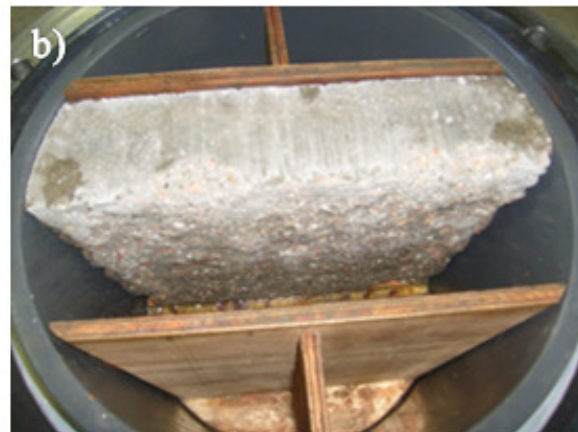
Projektując mieszanki betonowe założono, że badane betony naprawcze przeznaczone są do wykonywania drobnych napraw konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych cienkowarstwowych uzupełnień betonów w konstrukcjach hydrotechnicznych, których elementy są stale zanurzone w wodzie. Z tego względu ograniczono uziarnienie kruszywa do 8 mm. Mieszanki zaprojektowano w taki sposób, aby po godzinie od wymieszania składników, konsystencja mierzona metodą stożka opadowego wynosiła co najmniej 200 mm, a rozplływ co najmniej 400 mm. Straty wypłukiwania, oznaczone zgodnie z metodą wg amerykańskiej instrukcji CRD C61-89A [2], po godzinie od wymieszania składników betonu nie powinny przekraczać 12%. Ze względu na warunki środowiska (naprawiane konstrukcje hydrotechniczne zaliczane są do klas ekspozycji XS3 i XM3) założono minimalną klasę projektowanych betonów jako C35/45, a maksymalny stosunek  $w/c = 0,45$ . Do wykonania betonów użyto cementu portlandzkiego CEM I 42,5 N HSR/NA oraz kruszywa naturalnego otoczkowego. Zastosowany cement charakteryzuje się normalnym poziomem wydzielania ciepła hydratacji, co zmniejsza ryzyko powstawania rys skurczowych i umożliwia wykonywanie napraw masywnych konstrukcji obiektów hydrotechnicznych. Zaprojektowano 3 mieszanki betonowe o wskaźniku  $w/c = 0,4$ : referencyjną – BR oraz jej dwie modyfikacje: BW – z dodatkiem włókien polipropylenowych i BP – z domieszką dyspersji kopolimeru styrenowo-akrylowego. Składy badanych betonów przedstawiono w tabeli 1.

Mieszanki betonowe układane były na podkładach pionowych (rys. 1a) w specjalnie przygotowanym szalunku (rys.1b), ułożonym w specjalnej formie. Na kształtowanie przyczepności warstwy naprawczej do podłoża istotny wpływ ma obróbka naprawianej powierzchni. W przeprowadzonych badaniach podkłady betonowe były piaskowane przed nałożeniem warstwy naprawczej (rys. 1a). Podkłady wykonano z mieszanki o tym samym składzie co beton BR. Przed nałożeniem warstw naprawczych oznaczono szorstkość powierzchni podkładów metodą

piaskową, zgodnie z PN-EN 1766, uzyskując wartość wskaźnika chropowatości  $SRI = 1,65$ . Głębokość obróbki wynosiła średnio 1 cm. Jak wykazały wcześniejsze badania [4] dla tego rodzaju obróbki powierzchni, w przypadku oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego uzyskano największą przyczepność betonu naprawczego do podłoża. Wynika to prawdopodobnie z równomiernego schropowacenia powierzchni, bez dużych różnic wysokości profilu [3]. Po ułożeniu mieszanki w formie (złącze pionowe), formę z betonem umieszczano w specjalnie skonstruowanej komorze ciśnieniowej i nalewano wody do poziomu 1 m ponad element próbny, a następnie zadawano określone programem badań ciśnienie, które wynosiło: 0,1; 0,3 i 0,5 MPa. Szczegóły konstrukcji oraz zasadę działania komory ciśnieniowej opisano w pracach [5, 6].

Tabela 1. Składy badanych betonów

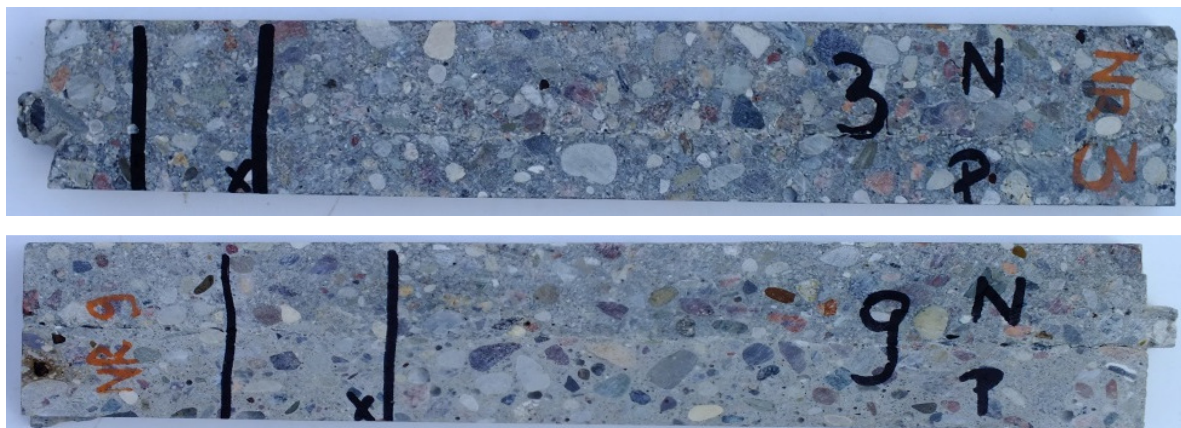
| Składnik                                          | Oznaczenie betonów |      |      |
|---------------------------------------------------|--------------------|------|------|
|                                                   | BR                 | BW   | BP   |
| Cement CEM I 42,5N-HSR/NA [kg/m <sup>3</sup> ]    | 429                | 429  | 429  |
| Woda [kg/m <sup>3</sup> ]                         | 171                | 171  | 171  |
| Kruszywo [kg/m <sup>3</sup> ]:                    | 1869               | 1869 | 1869 |
| – piasek 0–2 mm                                   | 754                | 754  | 754  |
| – żwir 2–8 mm                                     | 1115               | 1115 | 1115 |
| Superplastyfikator [l/m <sup>3</sup> ]            | 11                 | 13,9 | 6    |
| Domieszka AWA [kg/m <sup>3</sup> ]                | 4,3                | 4,3  | 6,5  |
| Kopolimer styrenowo-akrylowy [kg/m <sup>3</sup> ] | -                  | -    | 5    |
| Włókna polipropylenowe [kg/m <sup>3</sup> ]       | -                  | 0,9  | -    |



Rys. 1. Wykonywanie elementów próbnych – złącze pionowe: a) podkład betonowy po piaskowaniu, b) podkład w formie przed nałożeniem warstwy naprawczej, c) zdjęcie elementu próbnego po zakończeniu dojrzewania w komorze ciśnieniowej, d) układ krążków w badaniu pull-off.

Elementy próbne dojrzewały pod ciśnieniem przez okres 7 dni, a następnie po wyjęciu z komory (rys. 1c) i rozformowaniu dojrzewały w wodzie do czasu osiągnięcia wieku 28 dni. Po 28 dniach od nałożenia warstwy naprawczej odcinano nadmiar betonu, tak aby pozostała na podkładzie warstwa naprawcza grubości 3–5 cm. Następnie elementy próbne nawiercano w miejscach, w których zaplanowano przyklejenie krążków stalowych do badań pull-off, osuszano oraz wyrównywano powierzchnię górną poprzez szlifowanie. Na każdym elemencie próbnym naklejano 6 krążków stalowych do badań pull-off w dwóch poziomach (rys. 1d). Badania przyczepności wykonano za pomocą urządzenia DYNA 50 zgodnie z PN-EN 1542. Uzyskane wyniki badań przyczepności porównano z wynikami uzyskanymi dla próbek wykonanych w ten sam sposób, lecz dojrzewających przez 28 dni w wannie z wodą o temperaturze  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Badania mikroskopowe powierzchni stykowej warstwy naprawczej-podkład (płaszczyzna zespolenia) prowadzono z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego Zeiss EVO 10 wyposażonego w sondę EDS. Obraz SEM badanych materiałów uzyskiwano w oparciu o rejestrację elektronów wstecznie rozproszonych umożliwiającą otrzymanie kontrastu fazowego na granicy faz (detektor BSD). Obserwację strefy stykowej prowadzono na powierzchniach uzyskanych po cięciu próbek pobranych z fragmentów elementów próbnych (rys. 2). Badane powierzchnie zostały wyszlifowane i oczyszczone z cząstek pylastych.

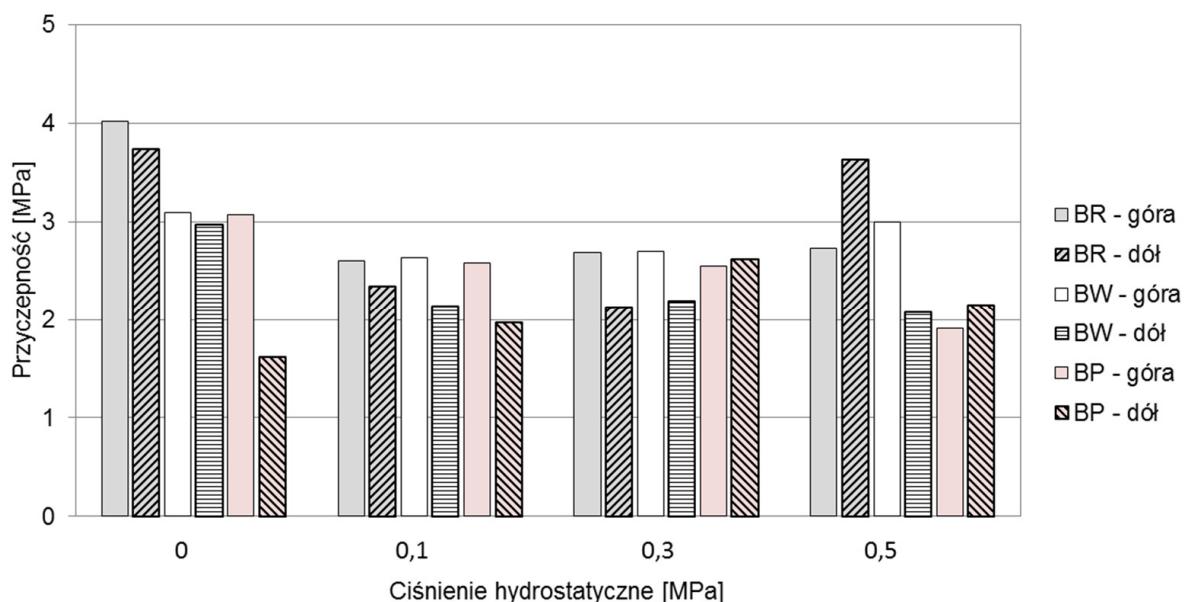


Rys. 2. Przekrój przez warstwę stykową pomiędzy betonem naprawczym (N) a podkładem (P). Czarnymi liniami zaznaczono miejsce pobrania próbki do analizy SEM powierzchni zespolenia. Zdjęcie górne – próbka pobrana z betonu BR (ciśnienie 0,5 MPa), zdjęcie dolne – próbka pobrana z betonu BP (ciśnienie 0,5 MPa)

### 3. Wyniki badań przyczepności

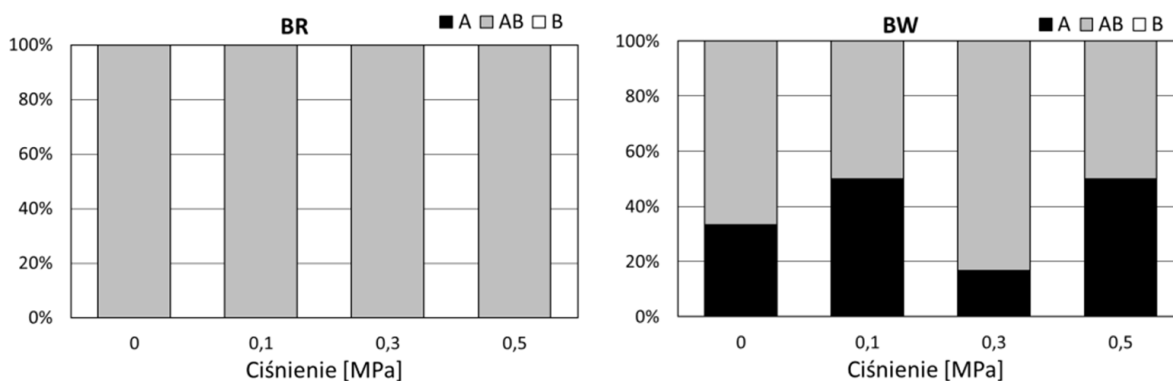
Wyniki pomiarów przyczepności badanych betonów naprawczych do powierzchni pionowych, z uwzględnieniem położenia punktu pomiarowego w elemencie próbnym (rys. 1d) przedstawiono na rys. 3. W przypadku wszystkich badanych betonów naprawczych zauważono negatywny wpływ ciśnienia hydrostatycznego na ich przyczepność do betonu naprawczego w złączu pionowym. Najniższe wartości przyczepności zaobserwowano w przypadku betonu BP modyfikowanego kopolimerem styrenowo-akrylowym.

Wartość zadanego ciśnienia nie miała tak znacznego wpływu na wartość uzyskanej przyczepności. Zaobserwowano wyraźne różnice pomiędzy przyczepnością betonów naprawczych w warstwie górnej, narażonej bezpośrednio na oddziaływanie ciśnienia i w warstwie dolnej złącza. W większości przypadków próby wykonane w górnej części elementu dawały wyższe wartości przyczepności.



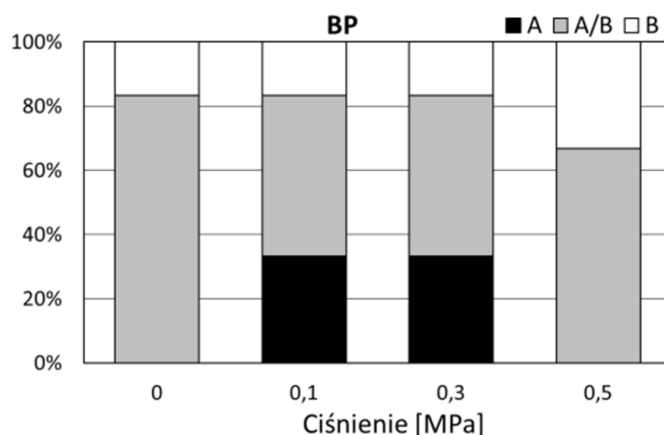
Rys. 3. Przyczepność betonów naprawczych do podkładów pionowych

W trakcie prowadzenia badań przyczepności analizowano również przebieg zniszczenia w badaniu pull-off (rys. 4). W przypadku betonu referencyjnego BR uzyskano tylko zniszczenia adhezyjne na powierzchni rozdziału pomiędzy podkładem a materiałem naprawczym.



Najlepszą jakość zespolenia z podłożem wykazał beton BW z dodatkiem włókien polipropylenowych, o czym świadczy duży udział zniszczeń kohezyjnych w podłożu betonowym. Dla betonu modyfikowanego kopolimerem styrenowo-akrylowym zaobserwowano zniszczenia kohezyjne w warstwie naprawczej. Niezależnie od wartości ciśnienia hydrostatycznego beton naprawczy BP z kopolimerem wykazał się najniższą przyczepnością do podkładu pionowego. Również podczas pobierania próbek betonu BP do analizy SEM zaobserwowano w wielu miejscach na długościach styku pustki powietrzne przy wszystkich wartościach ciśnienia (patrz rys. 2, zdjęcie dolne). Zastosowany w badaniach polymer był stosowany do wzmacniania konstrukcji hydrotechnicznych przy prowadzeniu prac naprawczych bez kontaktu z wodą. W prowadzonych badaniach mógł on zostać częściowo wypłukany przez

wodę. Przyczyną spadku przyczepności mogła być również niższa konsystencja betonu BP z kopolimerem, co spowodowało, że zaczyn nie wypełnił szczelnie nierówności i pozostawił pustki w płaszczyźnie zespolenia. Zagadnienie to wymaga dalszej weryfikacji doświadczalnej.

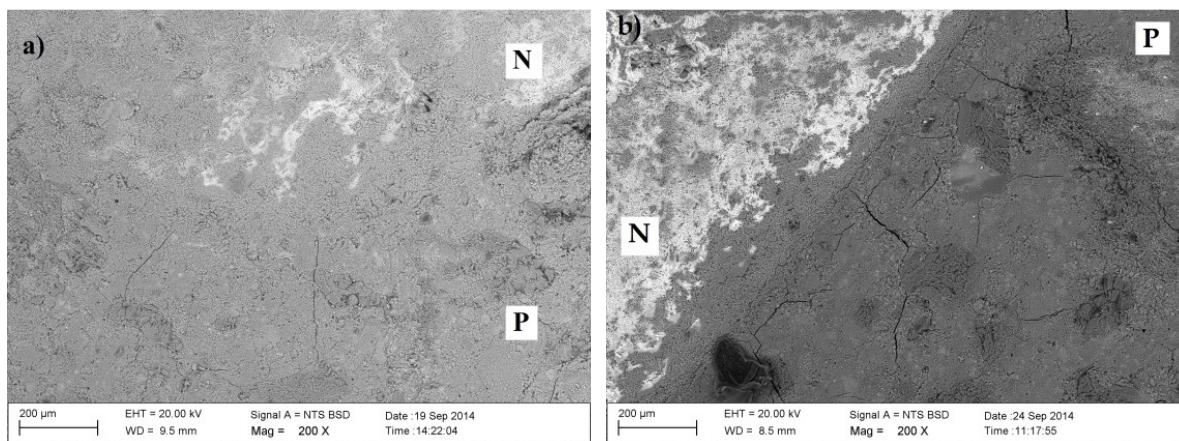


Rys. 4. Procentowy udział typów zniszczeń uzyskany w badaniach przyczepności metodą pull-off: A – zniszczenie kohezyjne w podłożu betonowym, A/B – zniszczenie adhezyjne na powierzchni rozdziálu pomiędzy podkładem a materiałem naprawczym, B – zniszczenie kohezyjne w warstwie naprawczej

#### 4. Analiza SEM płaszczyzny zespolenia

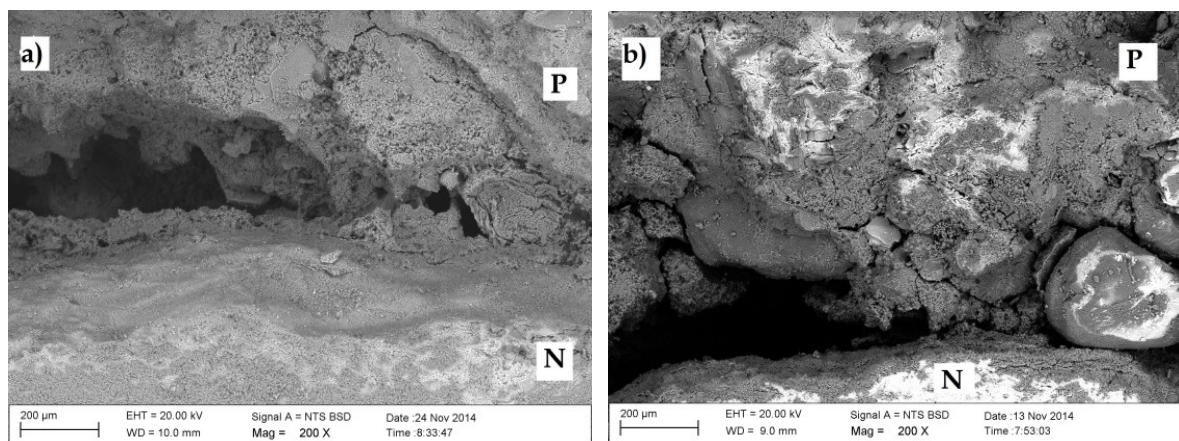
Rodzaj zastosowanej obróbki powierzchniowej ma wpływ nie tylko na stopień schropowacenia podkładu, ale powoduje również powstanie rys często niewidocznych gołym okiem. Mikrorysy mogą stanowić źródło uszkodzeń podczas użytkowania obiektu po naprawie. W prowadzonych badaniach zastosowano obróbkę powierzchni podkładu przez piaskowanie jako metodę mniej „inwazyjną” w przypadku ilości powstających mikrorys niż w przypadku obróbki z zastosowaniem kucia czy frezowania. W analizie SEM warstwy stykowej beton naprawczy – podkład zaobserwowano w podkładzie piaskowanym mikrorysy ułożone prostopadle do płaszczyzny zespolenia (rys. 5a). Dla porównania na rys. 5b przedstawiono obraz powierzchni zespolenia betonu naprawczego BR na podkładzie kutym młotem.

Stwierdzono występowanie w podkładzie wielu mikrorys o nieregularnym ułożeniu. Najbardziej niebezpieczne są rysy równoległe do płaszczyzny zespolenia, gdyż w przypadku obciążenia złącza to właśnie w tym miejscu może dojść do odspojenia warstwy naprawczej od podkładu. W praktyce przy remontach prowadzonych na powierzchniach pionowych poddanych intensywnej obróbce powierzchniowej (kucie, frezowanie) obserwuje się bardzo często odspojenia w górnej części złącza pionowego już w początkowym okresie dojrzewania. Na skutek różnicy gęstości materiału naprawczego i podkładu w płaszczyźnie zespolenia powstają naprężenia ścinające będące wynikiem różnicy odkształceń pod wpływem ciśnienia i dochodzi do odspojenia betonu naprawczego.



Rys. 5. Przykładowe widoki płaszczyzn zespolenia z wykorzystaniem betonu BR dojrzewającego pod ciśnieniem 0,3 MPa: a) podkład po piaskowaniu, b) podkład kuty; N – materiał naprawczy, P – podkład betonowy

W badaniach SEM uwidoczniły się również różne wady powierzchni zespolenia. Najwięcej pustek zaobserwowano w płaszczyźnie zespolenia dla betonów z kopolimerem BP (rys. 6a). Widoczne były również większe pęknięcia i luźne fragmenty podkładu (rys. 6 b).



Rys. 6. Wady płaszczyzny zespolenia uzyskane dla betonów naprawczych BP z kopolimerem (ciśnienie 0,5 MPa): pustka powietrzna w płaszczyźnie zespolenia: zaczyn-podkład betonowy, b) widoczne luźne fragmenty podkładu niepowiązane z zaczynem; N – materiał naprawczy, P – podkład betonowy

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że ciśnienie hydrostatyczne ma negatywny wpływ na przyczepność podwodnych betonów naprawczych w złączu pionowym. Nie stwierdzono jednak wyraźnej zależności pomiędzy wartością zadanego ciśnienia hydrostatycznego a przyczepnością betonu do podłoża.

Przyczyną słabej przyczepności betonu naprawczego z kopolimerem do podkładu mogła być niska konsystencja betonu naprawczego. W takim przypadku luźno związane mikro-fragmenty betonu podkładu powstające podczas obróbki powierzchniowej nie zostały związane przez zaczyn. Niska konsystencja betonu naprawczego nie sprzyja wypełnianiu nierówności powierzchni podkładu i może być przyczyną powstawania pustek w płaszczyźnie zespolenia.

Badania SEM potwierdziły, że znaczącą rolę w kształtowaniu przyczepności betonu naprawczego do podłoża odgrywa stopień agresywności obróbki powierzchniowej podkładu.

### Literatura

1. Assaad J.J., Daou Y., Khayat K.H. Simulation of Water Pressure on Washout of Underwater Concrete Repair. *ACI Materials Journal* Vol.106/2009.
2. CRD C61-89A. Test method for determining the resistance of freshly-mixed concrete to washing out in water. US Army Experiment Station, Handbook for Concrete, Vicksburg, Mississippi; 1989. p. 3.
3. Garbacz A., Courard L., Bissonnette B. A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-technical sciences*, Vol. 61/2013.
4. Hong S, Park S.K. Behavior of Concrete Columns Repaired with Polymer Mortar and Epoxy Fiber Panel. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2013/2013, Article ID 748294.
5. Horszczaruk E., Brzozowski P. Bond strength of underwater repair concretes under hydrostatic pressure, *Construction and Building Materials*, Vol. 72/2014.
6. Horszczaruk E., Brzozowski P., Rudnicki T. Urządzenie do badań betonów podwodnych w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego, *Przegląd Budowlany*, nr 6/2012.
7. Kańka S., Sołytsik R., Przykłady napraw i wzmocnień budowli hydrotechnicznych wykonywanych w technologii betonowania pod wodą, XXVI Konferencja Naukowo--Techniczna Awarie Budowlane, Międzyzdroje 2009.
8. Known H.W. Maintenance and Repair of Concrete Underwater. 11<sup>th</sup> International Operation & Maintenance Conference in the Arab Countries. Jeddah 2013.
9. Müller H.S., Bohner E., Vogel M., Kvitsel Solichin V. Innovative solutions for the construction and the repair of hydraulic. *Procedia Engineering* Vol. 54/ 2013.
10. Tracz T., Kańka S., Radło W. Betonowanie podwodne betonem samozagęszczalnym jako jeden z etapów remontu zapory w Porąbce. Konferencja „Dni betonu. Tradycja i nowoczesność”. Wisła 2006.

### INFLUENCE OF HYDROSTATIC PRESSURE ON THE EFFECTIVENESS OF REPAIRING OF UNDERWATER CONCRETE STRUCTURES

**Abstract:** The paper deals with the results of research on the underwater repair concretes. The tested concretes of various compositions were applied in the vertical joints under variable hydrostatic pressure. Special pressure chamber was used for modelling the concrete hardening at the various depths. The influence of the hydrostatic pressure and repair concrete composition on the adhesion of the material to the substrate in the vertical joint was analysed. The self-compacting underwater concretes were tested in the initial period of curing (7 days) under hydrostatic pressure: 0.1, 0.3 and 0.5 MPa. The bond strength of the repair concretes to the substrate was determined using pull-off method. Also, the SEM analysis has been carried out in the area of connection of the repair concrete with the substrate.

**Keywords:** underwater concrete, hydrostatic pressure, repair of concrete structures, adhesion.