

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk¹⁾
ORCID: 0000-0003-0840-5048

Właściwości reologiczne betonów podwodnych z domieszkami stabilizującymi

Rheological properties of underwater concrete with stabilizing admixtures

DOI: 10.15199/33.2022.04.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu czterech domieszek stabilizujących, o różnym składzie chemicznym, na wybrane właściwości reologiczne mieszanek do betonów układanych pod wodą. Ich zawartość w mieszankach była stała i wynosiła 0,6% masy cementu. Przyjęty program badawczy obejmował badania konsystencji metodami opadu stożka i stolika rozpliwowego, a także oznaczenie strat wypłukania mieszanek. Badania mieszanek wykonano bezpośrednio po wymieszaniu składników oraz po upływie godziny. Wykazano przydatność metody badania strat wypłukania wg instrukcji CRD C61-89A, w połączeniu z badaniami konsystencji mieszanek wykonywanymi po 60 min od zakończenia mieszania składników, w procesie projektowania betonów podwodnych.

Słowa kluczowe: betony podwodne; domieszki stabilizujące; właściwości reologiczne; straty wypłukania.

Abstract. The paper presents an analysis of the influence of stabilizing admixtures of various compositions on the selected rheological properties of the underwater concrete mix. The admixtures' content in the concrete mixes was constant and equal to 0,6% of the cement mass. The testing program covered the determination of consistence by slump method and flow table method. Also, the wash-out losses of the concrete mixes were determined immediately after mixing and for one hour. It has been proven that the method of washout losses determination according to the Instruction CRD C61-89A, together with testing of consistence after 60 minutes from mixing, is useful in underwater concrete designing.

Keywords: underwater concrete; stabilizing admixtures; rheological properties; washout loss.

Trudno sobie wyobrazić współczesne betony cementowe, a przede wszystkim tzw. betony specjalne, bez domieszek chemicznych [1]. Tak jest w przypadku betonów podwodnych (ang. *underwater concrete*, *UWC*), gdzie domieszki chemiczne zapewniają stabilność właściwości reologicznych mieszanek betonowej podczas układania i dojrzewania pod wodą. Stosowane są domieszki stabilizujące (domieszki modyfikujące lepkość), których mechanizm działania polega na „sieciovaniu” ziaren cementu i drobnych frakcji kruszywa przez długie łańcuchy domieszki [2].

Rolą domieszek stabilizujących w betonach podwodnych jest zapobieganie segregacji składników mieszanek betonowej oraz maksymalne ograniczenie strat wypłukania podczas betonowania. Z tego powodu w literaturze zagranicznej określa się je również jako domieszki zapobiegające wymywaniu składników (ang. *antiwashout admixtures*, *AWA*) [3]. Na europejskim rynku pro-

ducentów chemii budowlanej znajdują się domieszki specjalnie dedykowane do wykonywania tylko betonów podwodnych.

W Polsce nadal nie mamy normowych wytycznych czy instrukcji, które pozwoliłyby na określenie ramowych zasad projektowania mieszanek do betonów UWC, szczególnie pod względem właściwości reologicznych. Technolodzy betonu korzystają głównie z wytycznych obowiązujących w innych krajach, przede wszystkim amerykańskich, niemieckich czy austriackich [4]. Podstawą badania właściwości reologicznych mieszanek UWC jest badanie konsystencji, a główną metodą ich projektowania metoda doświadczalna. W Polsce coraz częściej wykorzystuje się amerykańską metodę oznaczenia strat wypłukania opisaną w instrukcji CRD-C61-89A [5].

Celem badań było pokazanie, jak ważnym zagadnieniem jest ocena właściwości reologicznych mieszanek do betonowania pod wodą w funkcji czasu. Badaniom poddano cztery betony podwodne, w których składzie zastosowano różne domieszki chemiczne, przeznaczone do wykonywania tego typu betonów. Kon-

stytucję mieszanek UWC oraz straty wypłukania oznaczono bezpośrednio po wymieszaniu składników oraz po upływie godziny od zakończenia mieszania. Wyniki badań pokazały, że w celu prawidłowego zaprojektowania betonów UWC konieczne jest przeprowadzenie badań strat wypłukania oraz konsystencji mieszanek po godzinie od wymieszania składników.

Zastosowane materiały i metoda badań

Plan badań obejmował zaprojektowanie betonów UWC na bazie różnych domieszek podwodnych. Projektowana klasa wytrzymałości betonu wynosiła C20/25. W badaniach wykorzystano cztery domieszki stabilizujące dedykowane do betonów podwodnych dostępne na rynku polskim. Do wykonania mieszanek betonowych zastosowano jako spoiwo cement portlandzki CEM I 42,5N oraz mieszanek piasku i żwiru o uziarnieniu od 0 do 16 mm. Założono stałą, możliwie najmniejszą ilość domieszki AWA we wszystkich mieszankach UWC na poziomie 0,6% masy cementu. Zastosowano również superplastyfika-

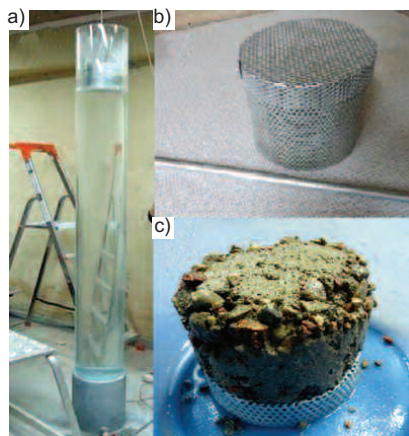
¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl

tor w ilości 1% masy cementu dobrany tak, aby pochodził od tego samego producenta co domieszka AWA. Skład mieszanek UWC zestawiono w tabeli.

Skład mieszanek betonowych [kg/m³]
Composition of concretes [kg/m³]

Składniki	Zawartość [kg/m ³]			
	UWC1	UWC2	UWC3	UWC4
Cement CEMI 42,5 N	350	350	350	350
Woda	170	170	170	170
Piasek 0/2	630	630	630	630
Żwir 2/8	363	363	363	363
Żwir 8/16	817	817	817	817
Superplastyfikator	3,5	3,5	3,5	3,5
Baza chemiczna superplastyfikatora	etery polikarboksylanowe	modyfikowane polikarboksylaty	polimery PCE	polimery akrylowe
Domieszka AWA	2,1	2,1	2,1	2,1
Baza chemiczna domieszki AWA	polimery naturalne i syntetyczne	roztwory polisacharydów	polioksyetylen, eter celulozy	brak danych
Postać domieszki AWA	żółtobrazowy proszek	biały proszek	jasnoszary proszek	biały proszek

Wszystkie mieszanki UWC wykonano w betoniarni laboratoryjnej. Badanie konsystencji mieszanek UWC wykonano metodą opadu stożka wg PN-EN 12350-2 [6] oraz metodą stolika rozplwowego wg PN-EN 12350-3 [7]. Konsystencję mieszanek UWC oznaczono bezpośrednio po zakończeniu mieszania składników w betoniarni (czas t = 0 min) oraz po 1 h od zakończenia mieszania (czas t = 60 min). W takim samym przedziale czasowym wykonano oznaczenie strat wyplukania metodą wg [5]. W badaniu wykorzystano przezroczystą rurę z akrylu o średnicy 190 mm i wysokości 2000 mm, do której wlewo wodę do poziomu 1700 mm (fotografia). W specjalnym stalowym perforowanym pojemniku umieszczano mieszankę UWC (o masie nieznacznie przekraczającej 2000 g), zagęszczając ją prętem stalowym o długości 300 mm i średnicy 10 mm, po czym uderzano w bok pojemnika 10 – 15 razy. Masa mieszanki betonowej wynosiła 2000 ± 20 g. Pojemnik z mieszanką umieszczano tak, by dno pojemnika stykało się z powierzchnią zwierciadła wody w rurze. Swobodnie opuszczano pojemnik



Badanie strat wyplukania wg instrukcji CRD-C61-89A: a) rura z wodą; b) pojemnik na próbkę i pręt do zagęszczania mieszanki; c) próbka mieszanki po zakończeniu badania

Washout loss test according to CRD-C61-89A instruction: a) water pipe; b) a sample cup and a mix compactor; c) a sample of the mixture after completion of the test

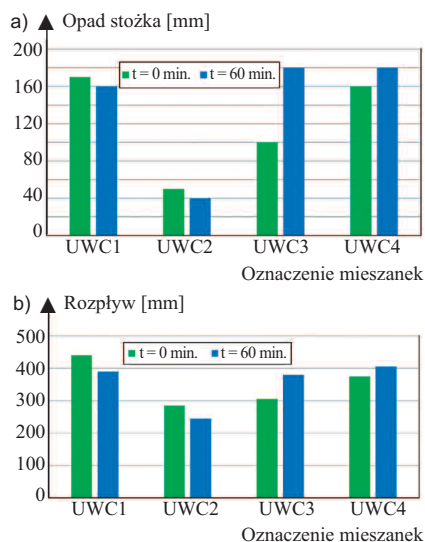
na dno rury, a po upływie 15 s wyciągano go z rury ruchem jednostajnym w czasie 5 s. Odstawiano pojemnik do odcieknięcia z wody na 2 min, przechylając nieznacznie, by umożliwić spłynięcie wody z próbki. Po tym czasie wyznaczano masę mieszanki po wyplukaniu i obliczano straty wyplukania D w procentach. Badanie tej samej próbki mieszanki powtarzano jeszcze dwukrotnie. Jako wynik badania podano wartość D uzyskaną po trzecim zanurzeniu próbki.

W celu kontroli jakości wykonanych mieszanek przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie betonów UWC po 28 dniach na kostkach sześciennych o boku 10 cm, wlewając mieszankę do formy stalowej, która była umieszczona w naczyniu z wodą. Poziom wody w naczyniu wynosił 20 cm powyżej górnego brzegu formy. Podajnik z mieszanką znajdował się na krawędzi lustra wody. W formach umieszczano mieszanki po 60 min od wymieszania składników. Próbkę rozformowano po 48 h i do czasu badania wytrzymałości przechowywano w wannie z wodą w temperaturze 20 ± 2°C.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badania konsystencji mieszanek UWC pokazano na rysunku 1. W przypadku wszystkich mieszanek uwidocznił się wpływ domieszki stabili-

zującej na konsystencję. Największy spadek konsystencji zanotowano w przypadku mieszanki UWC1, niezależnie od czasu badania. W mieszankach UWC1 i UWC2 większy wpływ domieszki stabilizującej na konsystencję obserwowano po 60 min od wymieszania składników. Wówczas opad stożka wynosił 160 i 40 mm, a rozplw odpowiednio 390 i 245 mm. Zgodnie z wymaganiami amerykańskimi [8], w betonach podwodnych zwykłych opad stożka po 60 min powinien być większy niż 125 mm, a średnica rozplwu musi przekraczać 255 mm. W tym przypadku wszystkie badane mieszanki, poza UWC2, spełniły te wymagania. W przypadku mieszanek UWC3 i UWC4 wpływ domieszki stabilizującej na konsystencję był większy zaraz po wymieszaniu składników. Po 60 min obie mieszanki uzyskały zbliżoną konsystencję, opad stożka obu mieszanek wynosił 180 mm, natomiast rozplw w przypadku UWC3 wyniósł 380 mm, a UWC4 – 405 mm. Należy podkreślić, że ze względu na brak możliwości zagęszczania mieszanek pod wodą najlepiej, aby mieszanka UWC miała duży rozplw przy możliwie niewielkim opadzie stożka. Z wytycznych normy niemieckiej DIN 1045-2 [9] wynika, że rozplw mieszanek UWC powinien wynosić minimum 400 mm. W normie tej nie podano zaleceń dotyczących czasu badania konsystencji. Zgodnie z ty-

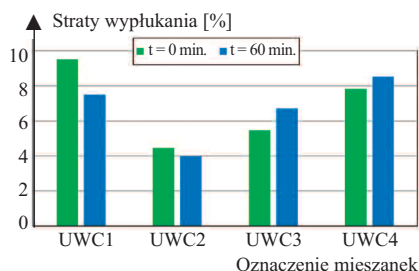


Rys. 1. Wyniki badania konsystencji mieszanek UWC: a) metoda opadu stożka; b) metoda stolika rozplwowego

Fig. 1. Results of the consistency test of UWC mixtures: a) slump-test; b) flow table test

mi wytycznymi tylko mieszanka UWC4 uzyskała właściwy rozptyw (rozptyw mieszanek UWC1 i UWC3 był bliższy 400 mm).

Wyniki badania strat wyplukania badanych mieszanek UWC przedstawia rysunek 2. Wytyczne [8] ograniczają straty wyplukania oznaczane po 60 min od wymieszania składników

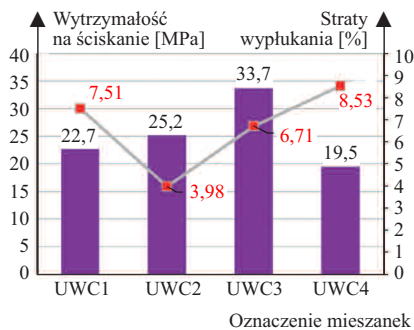


Rys. 2. Wyniki badania strat wyplukania mieszanek UWC

Fig. 2. Test results of washout loss of the UWC mixtures

do 12% w przypadku betonów zwykłych. Wszystkie badane mieszanki spełniły to wymaganie, niezależnie od ich składu chemicznego. Najmniejsze straty wyplukania zanotowano w przypadku mieszanki UWC2, która jako jedyna utrzymała konsystencję S1 wg normy [6] po 60 min. Bezpośrednio po wymieszaniu składników wartość strat wyplukania poszczególnych mieszanek zwiększała się wraz ze wzrostem wartości opadu stożka. Największe straty wyplukania zanotowano w przypadku mieszanki UWC1. W przypadku mieszanek UWC3 i UWC4 zanotowano wzrost strat wyplukania w porównaniu z wartościami uzyskanymi bezpośrednio po wymieszaniu składników. Należy wybierać takie domieszki modyfikujące lepkość, które pozwalają na utrzymanie założonej konsystencji w czasie, gdyż prace związane z układaniem betonu pod wodą wymagają zwykle wydłużonego czasu działania domieszki. Z tego powodu, zgodnie z wymaganiami [8], zaleca się kontrolne badania konsystencji mieszanek UWC po 60 min, a nawet po 90 min od wymieszania składników.

Na rysunku 3 porównano straty wyplukania mieszanek UWC uzyskane po czasie $t = 60$ min z 28-dniową wytrzymałością na ściskanie próbek wykonanych z tych mieszanek układa-



Rys. 3. Porównanie zależności między stratami wyplukania mieszanek i 28-dniową wytrzymałością na ściskanie betonów UWC

Fig. 3. Comparison of the relationship between the washout loss of the mixtures and the 28-day compressive strength of UWC concretes

nych pod wodą. Wynika z nich, że wytrzymałość na ściskanie betonów UWC jest odwrotnie proporcjonalna do strat wyplukania mieszanek UWC. Wyjątek stanowi beton UWC2, w przypadku którego przy najniższych stratach wyplukania uzyskano wytrzymałość na ściskanie 25 MPa, co stanowi 75% najwyższej wytrzymałości betonu UWC3, który jako jedyny uzyskał założoną klasę wytrzymałości C20/25. Mieszanki UWC były układane przez warstwę wody i zagęszczano tylko pod własnym ciężarem. Wpływ zastosowanych w badaniach domieszek AWA na konsystencję mieszanek po wymieszaniu składników i po 60 min od zakończenia mieszania był zróżnicowany. Niektóre domieszki wykazują pełne właściwości dopiero w dłuższym okresie od aplikacji. W przeprowadzonych badaniach były to domieszki zastosowane w mieszankach UWC1 i UWC2. Domieszka na bazie polisacharydów ograniczyła znacznie straty wyplukania mieszanki UWC2. Wpłynęło to jednak niekorzystnie na konsystencję mieszanki, powodując jej nadmierne zagęszczenie po 60 min od wymieszania składników i zaowocowało zmniejszeniem wytrzymałości na ściskanie próbek UWC2 pomimo najniższych strat wyplukania (rysunek 3). Z tego powodu, w przypadku betonów UWC, uzyskanie konsystencji mieszanek zbliżonej do betonów samozagęszczalnych, przy maksymalnym ograniczeniu strat wyplukania, stanowi duże wyzwanie dla technologa betonu.

Podsumowanie

Przedstawione badania pokazały, jak złożonym zagadnieniem jest projektowanie mieszanek do betonowania podwodnego. W składzie mieszanek UWC występują najczęściej dwie domieszki: stabilizująca i upłynniająca (redukcja wody), których działania są przeciwstawne. Z badań wynika, że zastosowanie wyłącznie domieszki stabilizującej (w ilości minimalnej zalecanej przez producenta), w składzie mieszanek UWC, nie gwarantuje uzyskania projektowanej wytrzymałości betonu podwodnego. Wszystkie zastosowane w badaniach domieszki stabilizujące ograniczyły straty wyplukania mieszanek poniżej założonego poziomu, ale uzyskana konsystencja mieszanek miała istotny wpływ na końcową wytrzymałość betonu podwodnego.

W artykule przedstawiono jedynie podstawowe badania, które wykonuje się przy projektowaniu betonów UWC. Wykazano przydatność metody badania strat wyplukania opisaną w instrukcji [5] w połączeniu z badaniami konsystencji mieszanek wykonywanymi po 60 min od zakończenia mieszania składników w procesie projektowania betonów UWC.

Literatura

- [1] Łukowski P. Rola domieszek we współczesnej technologii betonu. *Materiały Budowlane*. 2015; 10: 106 – 108. DOI: 10.15199/33.2015.10.32.
- [2] Łukowski P. Współczesne osiągnięcia w dziedzinie polimerowych domieszek do betonu. *Materiały Budowlane*. 2014; 11: 16 – 17.
- [3] Horszczaruk E. Domieszki i dodatki do betonów podwodnych. *Materiały Budowlane*. 2009; 3: 42 – 43.
- [4] Horszczaruk E, Łukowski P. Betony podwodne – badania i dobór składu. *Inżynieria i Budownictwo*. 2009; 5: 274 – 278.
- [5] CRD C61-89A. Test Method for Determining the Resistance of Freshly-Mixed Concrete to Washing Out in Water.
- [6] PN-EN 12350-2:2019-07. Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [7] PN-EN 12350-5:2019-08. Badania mieszanki betonowej – Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozpliwowego.
- [8] „Assessment of Underwater Concrete Technologies for In-the-Wet Construction of Navigation Structures”. Technical Report INP-SL-1., U. S. Army Corps of Engineers. Washington 1999.
- [9] DIN 1045-2. Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, performance, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1.

Przyjęto do druku: 18.03.2022 r.