

PARAMETRY ZAWIESIN TWARDNIEJĄCYCH STOSOWANYCH DO WYKONYWANIA PRZEGRÓD PRZECIWFILTRACYJNYCH W WAŁACH PRZECIWPOWODZIOWYCH

Magdalena BORYS, Joanna RYCHARSKA

Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Zakład Inżynierii Wodno-Melioracyjnej

Słowa kluczowe: metoda wglębnego mieszania, metoda wibracyjna, parametry zawiesiny samotwardniejącej, zawiesina samotwardniejąca

Streszczenie

W artykule omówiono wyniki badań laboratoryjnych parametrów zawiesin twardniejących wykorzystanych do budowy przegród przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych. Badaniom poddano zawiesiny sporządzone na podstawie sześciu receptur, które są stosowane w praktyce wykonawczej. Określono parametry samej zawiesiny w stanie płynnym (gęstość objętościową, lepkość, odstój dobowy, czas wiązania) i stałym (wytrzymałość na ściskanie, współczynnik filtracji). Podano również wyniki uzyskane w badaniach zawiesiny zmieszanej z gruntem pobranym z korpusu wału przeciwpowodziowego, w tym badań wytrzymałości na ściskanie po różnych okresach twardnienia mieszanki zawiesiny z gruntem (w zakresie 14–62 dni) i współczynnika filtracji po 14 i 28 dniach.

WSTĘP

W ostatnich latach do modernizacji wałów przeciwpowodziowych wprowadzono technologie, polegające na budowie pionowych przegród przeciwfiltracyjnych w korpusach i podłożu obwałowania z użyciem tzw. zawiesin twardniejących. W Polsce technologie te po raz pierwszy zastosowano w 1998 r. na wałach górnej Wisły w województwach śląskim i małopolskim [BORYS i in., 2005].

Adres do korespondencji: doc. dr hab. M. Borys, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Zakład Inżynierii Wodno-Melioracyjnej, Falenty, al. Hrabaska 3, 05-090 Raszyn; tel. +48 (22) 720-05-31 w. 232, e-mail: m.borys@imuz.edu.pl

Zgodnie z definicją podaną w normie PN-EN 1538:2002, zawiesina twardniejąca to: „zawiesina, która twardnieje z upływem czasu (...), zawierająca cement lub inne spoiwo oraz dodatkowe materiały, jak il (bentonit), granulowany żużel wielkopieczowy lub popioły lotne, wypełniacze i domieszki”. W normie nie podaje się szczegółowo składu zawiesiny ani jej parametrów.

Zawiesiny są sporządzane z mieszanin rozprowadzanych w postaci gotowej, przygotowanej przez producenta w wytwórni bądź też na miejscu budowy z dowiezionych komponentów. Wytwórcy tak dobierają skład zawiesin, aby spełniały one podstawowe wymagania stawiane przez projektantów przegrodami przeciwfiltracyjnymi wałów przeciwpowodziowych, tj. na ogół: współczynnik filtracji k rzędu $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i wytrzymałość $>0,5 \text{ MPa}$, a także wymagania technologiczne, dotyczące tzw. odstoju dobowego i możliwości przetłoczenia zawiesiny, najczęściej charakteryzowane lepkością umowną. Istotny jest również ilościowy udział poszczególnych składników i ich koszty jednostkowe, które decydują o cenie zawiesiny.

Przegrody przeciwfiltracyjne w wałach przeciwpowodziowych z zastosowaniem zawiesin twardniejących wykonuje się na ogół, wykorzystując jedną z trzech metod [BORYS, 2004]:

- w głębego mieszania, zwaną w praktyce DSM (ang. „deep soil mixing”), DMM (ang. „deep mixing method”) lub MP (ang. „mixing in place”), w której grunt rodzimy jest mieszany na mokro z zawiesiną, w rezultacie czego powstaje przegroda filtracyjna grubości 0,40–0,60 m;
- wibracyjną, zwaną w skrócie WIPS (wibracyjno-iniekowana przesłona szczelinowa), w której grunt rodzimy jest rozpychany, a na jego miejsce wtłaczana zawiesina, tworząca po stwardnieniu bardzo cienką przegrodę filtracyjną grubości 0,08–0,20 m;
- szczelinową, w której grunt wydobyty z wąskoprzestrzennego wykopu (szczeliny) jest zastępowany przez wtłoczoną zawiesinę, tworzącą po stwardnieniu przegrodę przeciwfiltracyjną o grubości 0,30–0,60 m, zależnie od narzędzia zastosowanego do kopania.

W praktyce wykonawczej najczęściej stosuje się metodę w głębego mieszania i wibracyjną [BORYS i in., 2005], dlatego też w artykule omówiono wyniki badań laboratoryjnych właściwości zawiesin twardniejących stosowanych w tych metodach.

Ideą metody w głębego mieszania (fot. 1) jest poprawienie własności gruntów miejscowych (głównie wytrzymałości i szczelności) bez potrzeby ich wydobywania na powierzchnię przez ich wymieszanie z materiałami wiążącymi wprowadzanymi w postaci zawiesiny twardniejącej. Metoda ta polega na wykonywaniu pionowych pali z mieszaniny gruntu znajdującego się w korpusie lub podłożu i materiału uszczelniającego wprowadzanego w postaci płynnej zawiesiny twardniejącej. Pale wykonuje się, używając specjalnych mieszadeł w taki sposób, że zachodzą wzajemnie na siebie, tworząc przesłone przeciwfiltracyjną (fot. 2). Średnica pala



Fot. 1. Wykonywanie przesłony przeciwfiltracyjnej metodą wgłębnego mieszania (fot. J. Rycharska)

Phot. 1. Making a diaphragm wall with the deep soil mixing method (photo J. Rycharska)



Fot. 2. Pionowe pale tworzące przegrodę przeciwfiltracyjną wykonaną metodą wgłębnego mieszania (fot. J. Rycharska)

Phot. 2. Vertical stakes create a diaphragm wall made with the deep soil mixing method (photo J. Rycharska)

wynosi na ogół 0,6 m, a najcieńsze miejsce w przesłonie (występujące na połączeniu dwóch pali) ok. 0,4 m. Maksymalna głębokość przegrody wykonywanej w wałach maszynami stosowanych obecnie w Polsce wynosi ok. 12 m.

Podstawowymi zaletami ww. metody są:

- pewność, że po dokładnym wymieszaniu zawiesziny z gruntem nie wystąpią nieciągłości w przegrodzie przeciwfiltracyjnej;
- można ją stosować w przypadku bliskiego sąsiedztwa budynków;
- możliwość wykorzystania do budowy stosunkowo lekkiego sprzętu.

Podstawowe jej wady to:

- ograniczenia głębokości wykonania;
- mniejsza wydajność i wyższy koszt wykonania w stosunku do innych metod.

Metoda wibracyjna (fot. 3) polega na zagłębieniu kształtownika, w postaci teownika lub skrzydełka (fot. 4), w korpus lub podłoże wału z jednoczesnym nadaniem mu wibracji. Podczas wyciągania kształtownika następuje wypełnienie szczeliny zawiesziną uszczelniającą.



Fot. 3. Wykonywanie przesłony przeciwfiltracyjnej metodą wibracyjną (fot. *M. Borys*)

Phot. 3. Making a diaphragm wall with the vibration – grounding method (photo *M. Borys*)



Fot. 4. Końcówka skrzydła stosowanego w metodzie wibracyjnej (fot. *M. Borys*)

Phot. 4. The winglike end used in the vibration method (photo *M. Borys*)

Podstawowymi zaletami ww. metody są:

- znaczna głębokość (do 20 m);
- duża wydajność;
- niski koszt;
- efekt dogęszczenia podłoża (w gruntach niespoistych);
- likwidacja pustek i rozluźnień w podłożu na obszarze kilku metrów od przesłony.

Podstawowe jej wady to:

- ryzyko zaciśnięcia szczeliny i sedymentacji zawiesiny;
- oddziaływanie wibracji na obiekty istniejące w pobliżu przesłony;
- konieczność użycia ciężkiego sprzętu.

METODY BADAŃ

Badaniom poddano zawiesiny sporządzone według sześciu receptur, stosowanych w praktyce wykonawczej (tab. 1). Wszystkie oznaczenia wykonano w trzech powtórzeniach. Próbki przygotowane do badań wytrzymałości na ściskanie i współczynnika filtracji przechowywano w temperaturze 20°C, w warunkach pełnego nasycenia. Niezbędne parametry przebadano zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1538:2002 odnoszącymi się do przegród przeciwfiltracyjnych z zawiesin. Badania wykonano zgodnie z metodyką podaną w normach PN-EN 12390-1:2002, PN-EN 12390-3:2002.

W świeżo sporządzonych zawiesinach (mieszane mechaniczne z prędkością 1200 obr.·min⁻¹) wykonano badania:

- gęstości objętościowej,
- lepkości umownej (lejkiem Marsha),
- odstoju dobowego,

Tabela 1. Skład badanych zawiesin twardniejących**Table 1.** Composition of the tested self-hardening slurries

Zawiesina Slurry	Zawartość, % Content, %				
	mielony żużel wielkopiecowy blast-furnace grind slag	bentonit bentonite	cement cement	popiół ash	woda water
I	36	7	–	–	57
II	29	7	–	–	65
III	32	3	–	–	65
IV	–	3	32 (hutniczy) (smelting)	–	65
V	39	–	2 (portlandzki) (Portland)	7	52
VI	43	–	2 (portlandzki) (Portland)	7	48

- czasu wiązania (aparatem Vicata),
- granicy płynności (harfą kulkową).

W zawiesinach stwardniałych (po 28 dniach twardnienia) wykonano badania:

- współczynnika filtracji,
- wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe,
- gęstości objętościowej i wilgotności próbek poddanych ścisnaniu.

W celu określenia parametrów przegrody, powstającej z gruntu zmieszanego z zawiesiną twardniejącą z zastosowaniem technologii wglębnego mieszania, badano również mieszanki zawiesin z gruntem. Do wykonania mieszanek użyto piasku średniego. Ilość zawiesiny w stosunku do gruntu w mieszance wynosiła 40%, co jest zbliżone do wartości występujących w terenie, w przegrodach wykonanych w wałach metodą wglębnego mieszania. W zawiesinach wymieszanych z gruntem badano:

- gęstość objętościową w stanie świeżym,
- współczynnik filtracji (po 14 i 28 dniach twardnienia),
- wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe (po 14, 28 i 60 dniach twardnienia), wraz z oznaczeniem gęstości objętościowej i wilgotności próbek poddanych ścisnaniu.

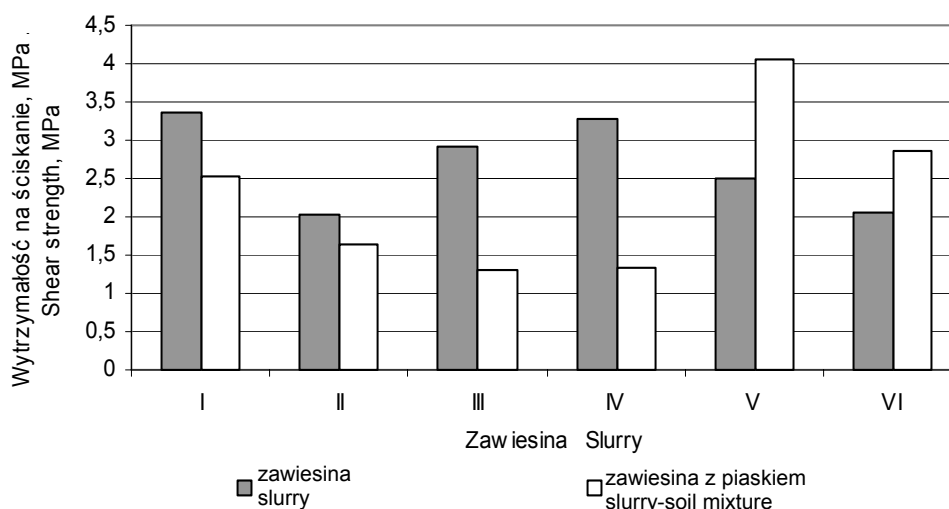
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Lepkość umowna badanych zawiesin zawierała się w granicach od 35 do 43 s. Czynnikiem wpływającym na większe wartości lepkości, obserwowane w zawiesinach wykonywanych wg receptur I i II, była większa zawartość bentonitu.

Dobowy odstęp zawiesin wynosił od 1 do 23%. Większe wartości odstępu dobowego zanotowane w zawiesinach wykonanych wg receptur III, IV, V i VI można tłumaczyć mniejszą zawartością bentonitu a większą cementu lub mielonego spoiwa żuźlowego.

Początek czasu wiązania wynosił od 33 do 115 h, a jego koniec od 36 do 150 h, tj. od 2 do 6 dni.

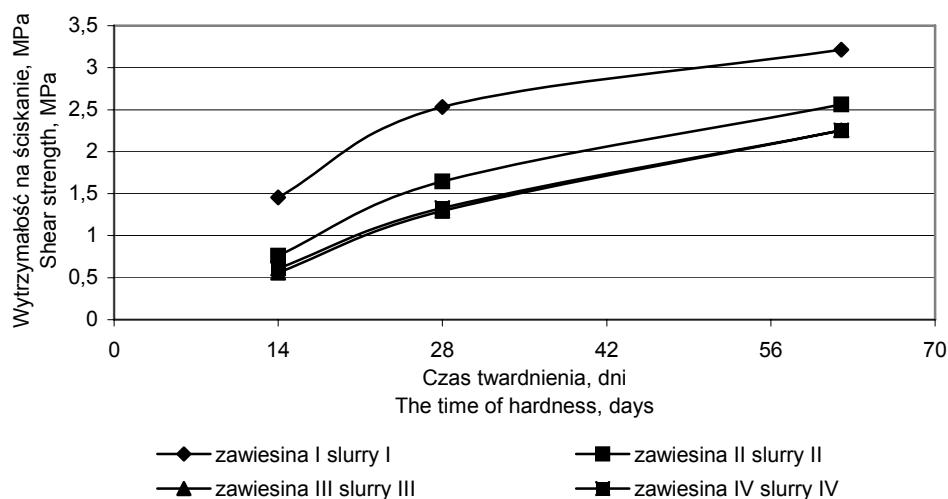
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe po 28 dniach twardnienia zawiesin twardniejących wynosiła od 2,02 do 3,36 MPa i była tym większa, im więcej było w zawiesinie cementu lub mielonego spoiwa żuźlowego. Wytrzymałość zawiesin z piaskiem po 28 dniach twardnienia zawierała się w granicach od 1,38 do 4,05 MPa; wartości te były przeważnie mniejsze niż w tych samych zawiesinach bez domieszki piasku, co widać wyraźnie na rysunku 1.



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie zawiesiny twardniejącej i zawiesiny zmieszanej z piaskiem po 28 dniach twardnienia

Fig. 1. Comparison of the shear strength of self-hardening slurry with that mixed with sand after 28 days of hardening

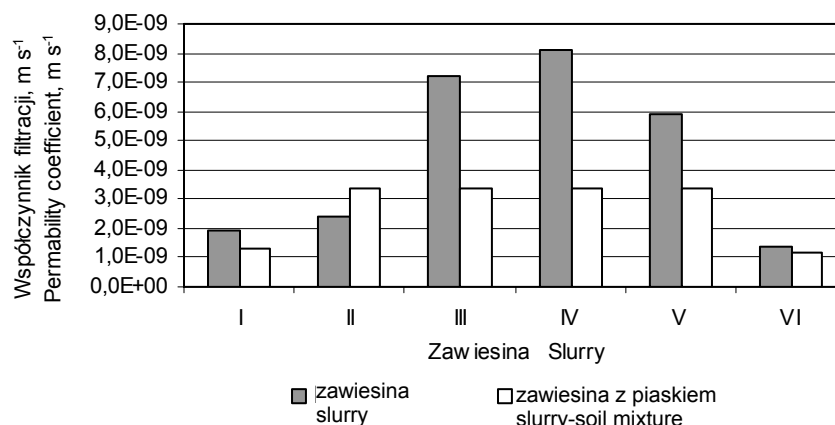
Wystąpił bardzo duży przyrost wartości wytrzymałości na ściskanie w czasie twardnienia, co przedstawiono na rysunku 2. Wymagane wartości wytrzymałości na ściskanie ($>0,5$ MPa) w badanych mieszankach zawiesin z piaskiem zostały osiągnięte już po 14 dniach twardnienia. Po 28 dniach wartości te zostały praktycznie podwojone, a po 60 dniach zaobserwowano dalszy, bardzo znaczny ich przyrost.



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie zawiesin z piaskiem po różnym czasie twardnienia

Fig. 2. Shear strength of soil-slurry mixtures after different periods of hardening

Współczynniki filtracji k w zawiesinach twardniejących bez dodatku piasku zawierały się w granicach od $1,35 \cdot 10^{-9}$ do $8,13 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 2). W zawiesinach zmieszanych z piaskiem współczynnik ten przyjmował również wartości rzędu $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, na ogół jednak nieco niższe w zawiesinach bez piasku, co przedstawiono na rysunku 3.

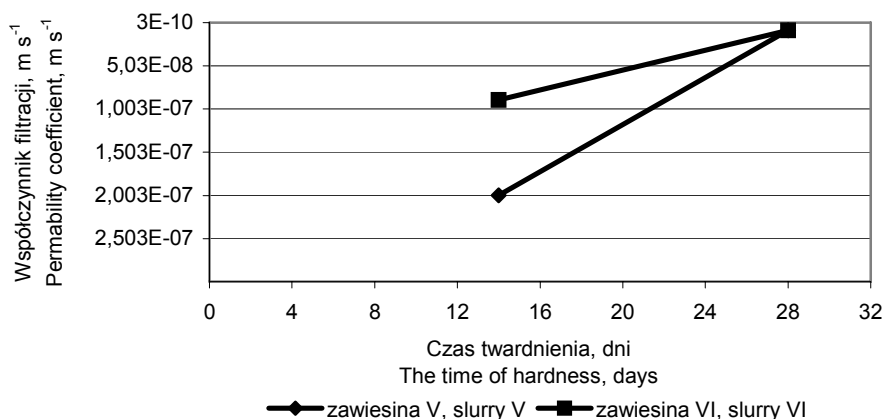


Rys. 3. Współczynnik filtracji zawiesiny twardniejącej bez domieszek i zawiesiny zmieszanej z piaskiem po 28 dniach twardnienia

Fig. 3. Permeability coefficient of self-hardening slurry and that mixed with sand after 28 days time of hardening

W projektach modernizacji wałów przeciwpowodziowych przyjmuje się na ogół, że współczynnik filtracji k zawiesiny po 28 dniach powinien wynosić $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że zarówno sama zawiesina, jak i jej mieszanina z piaskiem po 28 dniach czasu twardnienia spełniają określone wymagania – k osiąga wartości rzędu $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Wartości współczynnika filtracji w czasie twardnienia maleją (podobnie jak wartości wytrzymałości na ściskanie), co pokazano na przykładzie dwóch zawiesin na rysunku 4. Współczynnik filtracji w badanych mieszankach zawiesin z piaskiem po 14 dniach twardnienia przyjmował wartości rzędu $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast po 28 dniach twardnienia – $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Rys. 4. Współczynnik filtracji w zawiesinach z piaskiem po różnym czasie twardnienia

Fig. 4. Permeability coefficient of soil-slurry mixtures after different periods of hardening

PODSUMOWANIE

Badania parametrów zawiesin twardniejących wykazały przede wszystkim znaczny wpływ domieszki gruntu w mieszaninie tworzącej materiał powstałej przegrodzie przeciwfiltracyjnej oraz czasu wiązania na wytrzymałość na ściskanie i współczynnik filtracji.

Ma to istotne znaczenie praktyczne. W materiałach informacyjnych dotyczących parametrów zawiesin twardniejących podawane są na ogół (m. in. przez ich wytwórców) wartości tych parametrów osiągnięte w zawiesinie po 28 dniach twardnienia. Tymczasem parametry te w mieszaninie gruntu z zawiesiną przyjmują wartości zmienne w czasie. Nasuwa się więc wniosek, że przed przystąpieniem do inwestycji na konkretnym obiekcie powinno się określać parametry wytrzymałościowe i filtracyjne w warunkach tam występujących, tj. w mieszaninie gruntu miejscowego z zawiesiną twardniejącą planowaną do zastosowania.

LITERATURA

- BORYS M., 2004. Przegląd technologii wykonywania przegród przeciwfiltracyjnych z zastosowaniem zawiesin twardniejących w wałach przeciwpowodziowych. Falenty: IMUZ maszyn.
- BORYS M., MOSIEJ K., RYCHARSKA J., 2005 Ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych i podstawowych budowli wodno-melioracyjnych oraz utworzenie systemu monitorowania urządzeń przeciwpowodziowych. Pr. na zlecenie MRiRW BMzp.-2915A-29/05). Falenty: IMUZ maszyn.
- PN-EN 1538: 2002. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Ściany szczelinowe.
- PN-EN 12390-1:2002. Badania betonu. Cz. 1. Kształt, wymiar i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form.
- PN-EN 12390-3:2002. Badania betonu. Cz. 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.

Magdalena BORYS, Joanna RYCHARSKA

PARAMETERS OF SELF-HARDENING SLURRIES FOR DIAPHRAM WALLS BUILD DURING THE MODERNIZATION OF RIVER LEVEES

Key words: deep soil mixing method, self-hardening slurry, slurry parameters, vibration – grounding slurry wall method

S u m m a r y

The article presents results of laboratory studies on parameters of self-hardening slurries (for six slurries) used to construct diaphragm walls in flood embankments. Parameters of the slurry in fluid state (bulk density, viscosity, sedimentation after 24 hours, the time of setting) and in solid state (shear strength, permeability coefficient) were estimated. The article presents also the results for self-hardening slurry mixed with the soil taken from flood embankment including shear strength after different time of hardening (14–62 days) and permeability coefficient after 14 and 28 days.

Recenzenci:

prof. dr hab. Waldemar Mioduszewski
prof. dr hab. Ryszard Walczak

Praca wpłynęła do Redakcji 19.10.2005 r.

Tabela 2. Parametry zawiesin twardniejących**Table 2.** Parameters of self-hardening slurries

Zawiesina Slurry	Świeża zawiesina Fresh slurry		Czas wiązania Time of fixing h		Odstój dobowy po 24h Sedimentation %	Zawiesina stwardniała po 28 dniach Slurry hardened after 28 days	
	gęstość objętościowa bulk density $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	lepkość umowna viscosity s	początek start	koniec finish		wytrzymałość na ściskanie shear strength MPa	współczynnik filtracji permeability coefficient $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
I	1,4	43	40	73	1	3,36	$1,92\cdot 10^{-9}$
II	1,3	40	72	93	4	2,02	$2,44\cdot 10^{-9}$
III	1,3	35	115	150	23	2,91	$7,24\cdot 10^{-9}$
IV	1,3	35	115	150	23	3,28	$8,13\cdot 10^{-9}$
V	1,4	35	34	37	21	2,35	$5,94\cdot 10^{-9}$
VI	1,5	35	33	36	21	2,05	$1,35\cdot 10^{-9}$