

WŁAŚCIWOŚCI PIASKÓW HYDROFOBIZOWANYCH EMULSJAMI ALKOKSYSILANOWYMI USTALONE W BADANIACH WSTĘPNYCH

Patrycja BARYŁA*, Marek WOJCIECHOWSKI, Marek LEFIK

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź

Streszczenie: Celem badań jest wstępne ustalenie parametrów wodoprzepuszczalności oraz wytrzymałościowych nowego materiału budowlanego, jakim jest grunt hydrofobizowany. Badania przeprowadzono dla dwóch naturalnych piasków średnich oraz dla czterech mieszanin grunt-emulsja hydrofobizująca. Stałą filtracji k wyznaczono z użyciem aparatu ZWK2 dla próbek przed dodaniem emulsji hydrofobizującej oraz w aparacie trójosiowym dla gruntów po hydrofobizacji. Kąt tarcia wewnętrznego ϕ , oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania. Gęstość właściwą ρ_s , wyznaczono z użyciem kolby Le Chateliera, a maksymalną gęstość objętościową $\rho_{d \max}$ – w cylindrze normowym. Badania wykazały, że dodatek środka hydrofobizującego obniżył współczynnik filtracji, przy jednoczesnym utrzymaniu parametrów wytrzymałościowych na poziomie parametrów piasków przed hydrofobizacją.

Słowa kluczowe: piaski hydrofobizowane, hydrofobizacja, właściwości piasków.

1. Wprowadzenie

W inżynierii budowlanej mianem hydrofobizacji określa się zabiegi polegające na zwiększaniu odporności zewnętrznych powłok istniejących bądź nowo wznoszonych obiektów na działanie wody. Zabiegi te polegają zwykle na impregnowaniu murów, tynków i przekryć dachowych środkami na bazie silanów i siloksanów. Potencjalne zastosowania środków hydrofobizujących w budownictwie, a w szczególności w geotechnice, są jednak znacznie szersze. Hydrofobizowany grunt mineralny (piasek) charakteryzujący się zredukowanym podciąganiem kapilarnym oraz niską przepuszczalnością można wykorzystać, na przykład jako podsypkę lub zasypkę dla fundamentów, posadzek i ścian kondygnacji podziemnych, co zmniejsza niebezpieczeństwo zawilgocenia obiektów. Hydrofobizacja gruntu przeprowadzana *in situ* (poprzez iniekcje środków hydrofobizujących) otwiera również drogę do wykonywania tymczasowych i trwałych nieprzepuszczalnych przegród w gruncie w budownictwie drogowym i mostowym. Umożliwia ona również wykonywanie zabezpieczeń przed rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń w ośrodku gruntowym, może służyć do zwiększania szczelności i wzmacniania zapór wodnych i wałów przeciwpowodziowych. Warunkiem skutecznego wdrożenia tych zastosowań: jest wystarczająco niska przepuszczalność gruntu poddanego hydrofobizacji, obserwowane ujemne ciśnienie kapilarne w porach

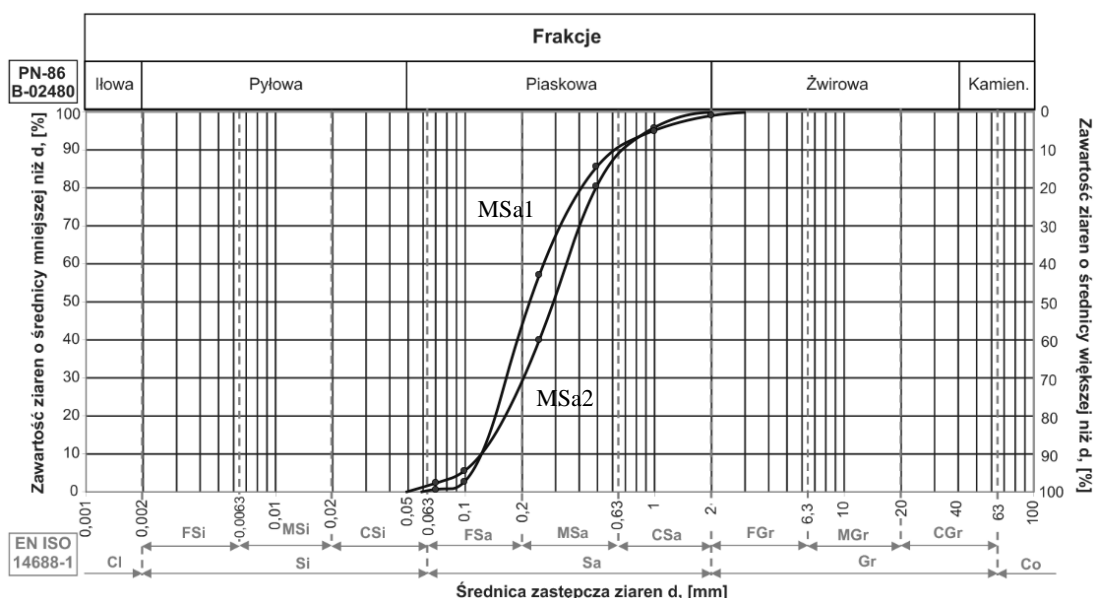
takiego gruntu, neutralny dla środowiska naturalnego charakter procesu hydrofobizacji oraz relatywnie niskie koszty realizacji. Zasadność hydrofobizacji piasków będzie potwierdzona najlepiej wtedy, gdy udowodni się, że proces hydrofobizacji nie wpływa ujemnie na właściwości wytrzymałościowe piasków i ich zagęszczalność.

Celem badań zaprezentowanych w niniejszym artykule jest wybranie spośród czterech różnych emulsji alkosysilanowych, najlepszych pod względem właściwości hydrofobizujących, a także zbadanie wpływu dodatku emulsji na właściwości wytrzymałościowe i zagęszczalność mieszanin. Wyboru dokonano porównując wyniki badania przepuszczalności czterech mieszanin emulsja hydrofobizująca – grunt z wynikami uzyskanymi dla piasków bez dodatków. W dalszym etapie badań wyznaczono kąt tarcia wewnętrznego i maksymalną gęstość objętościową dla mieszanin, w przypadku których efekt hydrofobizacji był najbardziej widoczny. Wyniki tych badań przybliżają do opracowania mieszaniny o składzie optymalnym pod względem właściwości hydrofobizujących i opłacalności produkcji.

2. Materiał badawczy

Właściwości filtracyjne zbadano dla dwóch piasków średnich MSa1 i MSa2, różniących się od siebie uziarnieniem (rys. 1). Następnie właściwości te zbadano

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: patrycja.baryla@p.lodz.pl



Rys.1. Uziarnienie badanych piasków

dla czterech typów mieszanin grunt – emulsja hydrofobizująca (MSa1+E1, MSa1+E2, MSa2+E3, MSa2+E4). Dodane emulsje hydrofobizujące są alkoksylanowymi emulsjami wodnymi, w których skład wchodzi alkiloalkoksylany (90-100%), dinery (0-10%), środek powierzchniowo czynny oraz emulgator (Stańczyk i in., 2012). Użyte typy emulsji (E1 – E4) różniły się od siebie stosunkiem poszczególnych składników i rodzajem alkiloalkoksylanu (tab. 1).

Badania kąta tarcia wewnętrznego, gęstości właściwej oraz maksymalnej gęstości objętościowej wykonano na próbkach piasków naturalnych oraz próbkach dwóch piasków hydrofobizowanych, dla których współczynnik filtracji, wyznaczony w pierwszej części badania był najniższy.

3. Metodyka badań

3.1. Przepuszczalność gruntu

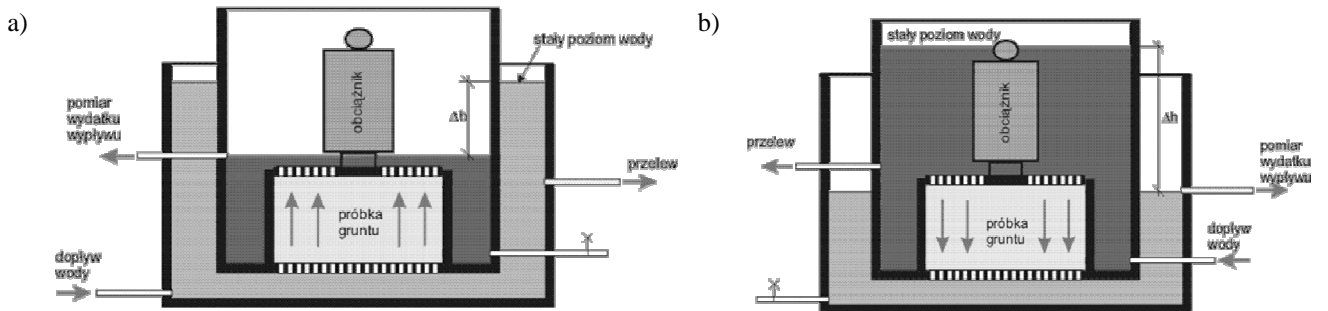
Właściwości filtracyjne opisano za pomocą dwóch wielkości: wysokości podciągania kapilarnego i stałej filtracji. Wysokość podciągania kapilarnego wyznaczono dla piasków przed i po hydrofobizacji z wykorzystaniem standardowego aparatu do badania kapilarności czynnej. Współczynnik filtracji k wyznaczano dla piasków MSa1 i MSa2 za pomocą aparatu ZWK2. Spadki hydrauliczne,

możliwe do uzyskania w tym aparacie są jednak zbyt niskie aby wywołać przepływ w gruncie hydrofobizowanym, dlatego dla piasków po hydrofobizacji, stałą k wyznaczono w aparacie trójosiowym. Ponieważ różnice wartości mierzonych k są bardzo duże, zmiana narzędzia pomiaru jest naturalna i nie może być uważana za błąd metodyczny.

Badanie współczynnika filtracji w aparacie ZWK2 wykonano zgodnie z PN-55/B-04492 *Grunty budowlane. Badania właściwości fizycznych. Oznaczenie wskaźnika wodoprzepuszczalności*. Po wysuszeniu próbki, wsypaniu partiami do wewnętrznego cylindra, wstępnym zagęszczeniu i obciążeniu, ustalono przepływ wody odpowietrzonej w kierunku z dołu do góry (rys. 2a). Celem usunięcia powietrza z porów w pierwszej fazie badania prędkość przepływu wody kontrolowano tak, aby czas wypływu wody przez próbkę do cylindra wewnętrznego wynosił minimum 20 minut. Po ustaleniu spadku hydraulicznego (badania prowadzono przy spadku 0,8), zbadano objętość wody przepływającej przez próbkę w czasie. Na podstawie odczytów, przekształcając równanie Darcy'ego, wyznaczono współczynnik k . W ostatniej fazie badania stałą k wyznaczono przy odwróconym kierunku przepływu (rys. 2b), z zachowaniem spadku hydraulicznego jak w przepływie w pierwszym kierunku.

Tab. 1. Składy emulsji hydrofobizujących użytych do badań

Nr emulsji	Rodzaj silan	Silan [g]	Środek powierzchniowo czynny [g]	Emulgator [g]
E1	MeSi(OMe) ₃	80	2	0,72
E2	MeSi(OMe) ₃	80	0,4	0,36
E3	MeSi(OMe) ₃	40	0,4	0,36
E4	Me ₂ Si(OMe) ₂	40	0,4	0,36

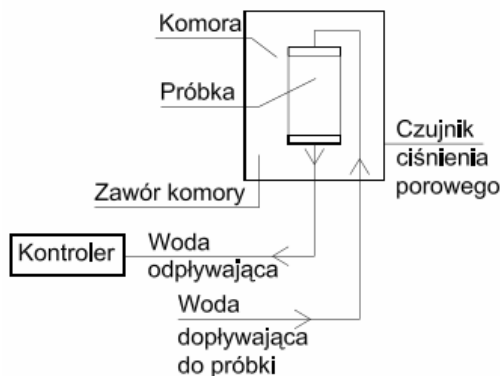


Rys. 2. Schemat badania przepuszczalności gruntu w aparacie ZWK2 przy kierunku przepływu: a) z dołu do góry b) z góry do dołu

Stałą filtracji dla gruntów hydrofobizowanych wyznaczono w komorze trójosiowej (rys. 3) przystosowanej do badania właściwości filtracyjnych gruntów (Carpenter i Stephenson, 1986). W komorze umieszczano próbki suchego gruntu o średnicy 38 mm i wysokości ~71 mm. Nasywanie prowadzono w dwu etapach. Pierwszy etap polegał na działaniu niewielkim ciśnieniem hydrostatycznym rzędu 10-20 kPa i wypełnieniu makroporów wodą przy jednoczesnym usuwaniu z nich powietrza. Na tym etapie badania zapowietrzoną wodę odprowadzono do zewnętrznego naczynia. Dalsze nasywanie przeprowadzono używając metody ciśnienia wyrównawczego opartej na dwóch prawach: prawie Boyla, opisującego ściśliwość płynów i prawie Henrygo, opisującego rozpuszczalność gazów w cieczach. Metoda polega na jednoczesnym podnoszeniu ciśnienia w komorze trójosiowej oraz ciśnienia wyrównawczego w próbce, tak aby ciśnienie efektywne działające na próbkę pozostawało niezmiennie (Lipiński i Wdowska, 2010). Wzrost ciśnienia powoduje rozpuszczanie pozostającego w porach gruntu powietrza. Odpowiedź zmiany ciśnienia porowego na zmianę ciśnienia całkowitego jest indykatorem postępu procesu nasywania, dlatego też, dla każdego kroku zmiany ciśnienia w komorze, odczytywano zmianę ciśnienia porowego. Za miarę nasywania przyjęto parametr Skemptona (1954) wyznaczony jako:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (1)$$

gdzie: Δu jest zmianą ciśnienia porowego, a $\Delta \sigma$ jest zmianą ciśnienia w komorze.



Rys. 3. Schemat komory trójosiowej przystosowanej do pomiaru właściwości filtracyjnych gruntów

Uznaje się, że próbka jest w pełni nasycona, gdy parametr Skemptona jest równy 1. Ze względu na długotrwały proces nasywania, proces ten kończono w opisywanych badaniach dla wartości parametru $B > 0,9$. Po zakończeniu nasywania, fazę konsolidacji przeprowadzono przy naprężeniach efektywnych rzędu 100 kPa (przy ciśnieniu w komorze równym ostatniemu ciśnieniu przyłożonemu w fazie nasywania). Badanie przepuszczalności przeprowadzono przy różnicach ciśnień między górną i dolną podstawą próbki 2-90 kPa (co odpowiada spadkowi hydraulicznemu 3-100). Stałą filtracji wyznaczono, analogicznie jak w aparacie ZWK2, dla przepływu w kierunku z dołu do góry a następnie z góry do dołu. Efektem końcowym badań nad przepuszczalnością gruntów było wytypowanie do dalszych badań dwóch mieszanin o najmniejszym współczynniku filtracji.

3.2. Kąt tarcia wewnętrznej i gęstość właściwa gruntu

Badania przeprowadzono dla mieszanin MSa1+E2, MSa2+E3, a następnie porównawczo dla piasków MSa1 i MSa2. Kąt tarcia wewnętrznej wyznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania zgodnie z zaleceniami normy PN-88/B-04481 *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Ponieważ w badanych próbkach nie wystąpiły frakcje większe od 2 mm, badanie przeprowadzono w skrzynce o wymiarach 60 × 60 mm. Wysokości próbek poddanych badaniu wynosiły około 30 mm, a masa około 200 g. Konsolidację próbek wykonano kolejno przy naprężeniach normalnych równych: 50, 100, 200, 400 kPa. Każda z próbek poddana była temu procesowi przez 2 minuty, a następnie była ścinana z prędkością 1 mm/min. Wartość kąta tarcia wewnętrznej wyznaczono analizując wykres $\tau(\phi)$.

Gęstość właściwą piasków hydrofobizowanych wyznaczono za pomocą kolby Le Chateliera przy użyciu cieczy niepolarniej, jako indykatora zmiany objętości (Myślińska, 1998). Wykorzystanie metody Le Chateliera zamiast tradycyjnej metody piknometru podyktowane było trudnością odpowietrzenia wody destylowanej z gruntem.

3.3. Zagęszczalność gruntów

Jako wyznacznik zagęszczalności gruntów przyjęto maksymalną gęstość objętościową uzyskaną metodą wibracyjną. Standardowo, zagęszczalność gruntu bada się w aparacie Proctora, wyznaczając wilgotność optymalną,

przy której grunt osiąga maksymalne zagęszczenie. Ponieważ badania piasków hydrofobizowanych prowadzone są na próbkach suchych – zrezygnowano z tej metody. Badanie minimalnej i maksymalnej gęstości objętościowej przeprowadzono z użyciem cylindra normowego (wymiary według PN-88/B-04481), zagęszczając próbkę gruntu na stole wibracyjnym. Zrezygnowano z proponowanego normowo zagęszczania za pomocą widełek ze względu na większą efektywność użycia stołu. Analogicznie do badań kąta tarcia wewnętrznego i gęstości właściwej, badania zagęszczalności przeprowadzono w przypadku mieszanin piasków z emulsjami o najlepszych właściwościach hydrofobowych oraz porównawczo – dla piasków bez dodatków.

W pierwszej fazie badania, do cylindra normowego, wsypano w stanie luźnym próbkę gruntu o znanej masie. Następnie wyliczono objętość gruntu i wyznaczono gęstość objętościową minimalną $\rho_{d \min}$ jako:

$$\rho_{d \min} = \frac{m_s}{V} \quad (2)$$

gdzie: m_s jest masą wsypanego do cylindra gruntu suchego, a V jest objętością gruntu w stanie luźnym.

Następnie próbkę gruntu zagęszczano stawiając cylinder z gruntem na stole wibracyjnym. Po upływie pierwszej minuty zmierzono wysokość, na jaką zagłębiła się pokrywa cylindra. Następnie analogicznych pomiarów dokonywano w odstępach 30 sekundowych. Proces zagęszczania uznaje się za zakończony jeżeli wysokość zagłębienia pokrywy cylindra nie zmienia się przy trzech kolejnych pomiarach. Znając zmianę wysokości próbki przy zagęszczeniu wyznaczono zmianę objętości. Gęstość objętościową maksymalną $\rho_{d \max}$ wyznaczono z zależności:

$$\rho_{d \max} = \frac{m_s}{V - \Delta V} \quad (3)$$

gdzie ΔV jest zmianą objętości gruntu po zagęszczeniu.

4. Wyniki badań

Analizując wykresy wysokości podciągania kapilarnego w czasie, zauważa się znaczący wpływ dodatku emulsji hydrofobizujących na tę wielkość. Dla piasku naturalnego wysokość podciągania po czasie 400 minut wyniosła

5,3 cm. Po tym samym czasie w próbkach MSa1+E1 oraz MSa1+E4 wysokości podciągania wynosiły kolejno 1,3 i 1,9 cm, natomiast w próbkach MSa1+E2 i MSa2+E3 zjawisko podciągania kapilarnego nie wystąpiło (tab. 2).

Tab. 2. Zestawienie wartości wysokości podciągania kapilarnego badanych próbek po czasie $t = 400$ minut

Oznaczenie próbki	Wysokość podciągania kapilarnego ($t = 400$ min) [m]
MSa1	0,05
MSa1+E1	0,01
MSa1+E2	0
MSa2+E3	0
MSa2+E4	0,02

W przypadku próbek, w których nie wystąpiło podciąganie kapilarne, stwierdzono również najniższą wartość współczynnika k . Tabela 3 zestawia pomierzone wielkości współczynnika filtracji dla sześciu badanych próbek. Uziarnienie piasków naturalnych wpłynęło na wyjściową wartość współczynnika filtracji k (tab. 2). Ponieważ różnice uziarnienia są niewielkie, decydujący wpływ na zmniejszenie współczynnika filtracji po hydrofobizacji ma skład dodanej emulsji. Analizując zestawione wielkości zauważa się, że najlepsze właściwości hydrofobowe dają emulsje E2 i E3 – spadek współczynnika k o dwa rzędy wielkości. Mieszaniny gruntu z tymi emulsjami wykazały również najniższą wysokość podciągania kapilarnego. Pozwala to zakładać, że badanie wysokości podciągania kapilarnego, jako badanie szybsze, może być stosowane jako badanie wstępne przy kolejnych ocenach przydatności emulsji do hydrofobizacji. Do dalszych badań wzięto próbki MSa1+E2 oraz MSa2+E3 jako mieszaniny o najniższych współczynnikach filtracji.

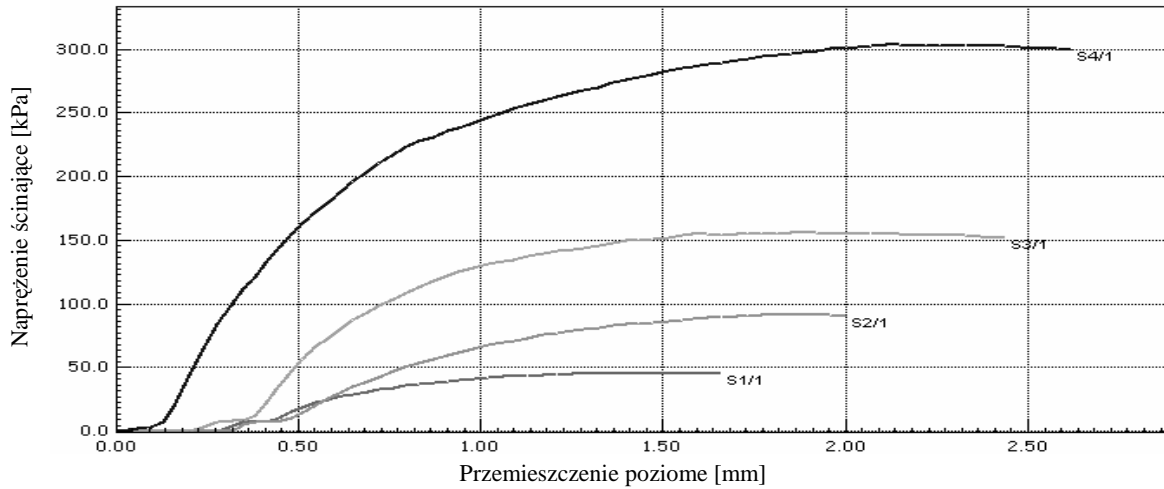
Pomierzone wartości kąta tarcia wewnętrznego zestawiono w tabeli 4. Porównując ścieżki odkształcenia poziomego piasku MSa1 przed i po hydrofobizacji (rys. 4 i 5) zauważa się niewielkie różnice. Maksymalne naprężenia styczne jakie osiągnęły w każdym z kroków konsolidacji są niemal identyczne. Wartość kąta tarcia wewnętrznego pozostała niezmienna i wyniosła 37°. Analizując zachowanie próbek piasku MSa2 przed i po hydrofobizacją (rys. 6 i 7), zauważa się niewielkie

Tab. 3. Zestawienie wartości współczynnika filtracji dla poszczególnych próbek

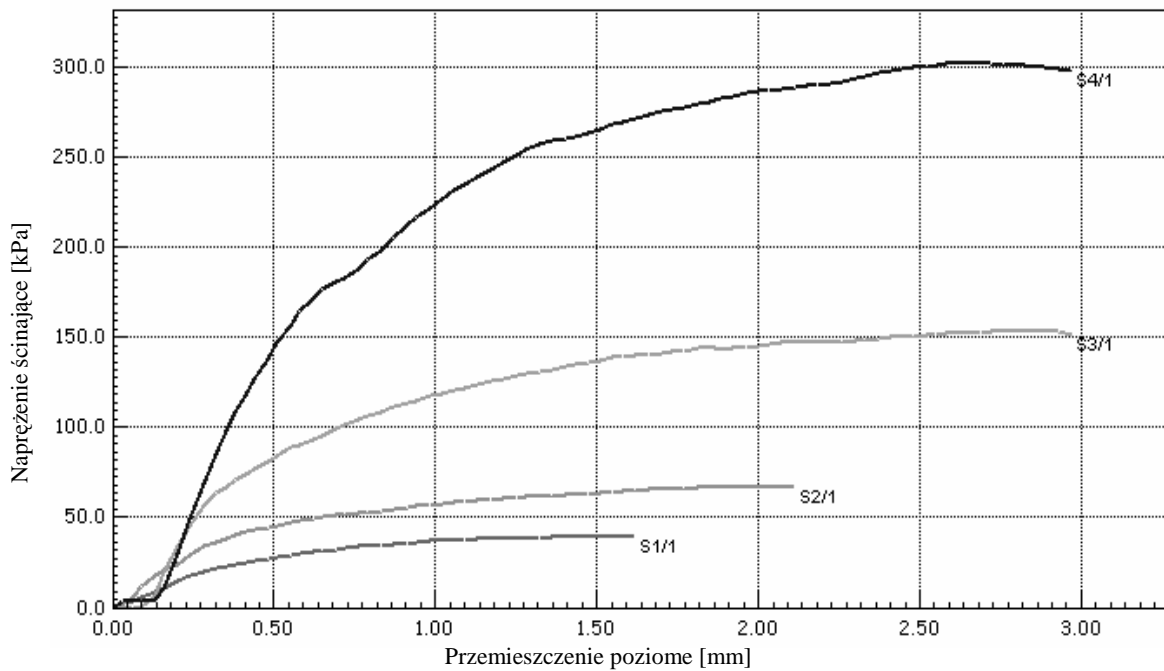
Oznaczenie próbki	Grunt	Emulsja alkoalksylanowa	Współczynnik filtracji [m/s]
MSa1	MSa1	-	$1,07E^{-4}$
MSa1+E1	MSa1	E1	$6,63E^{-7} - 3,23E^{-7}$
MSa1+E2	MSa1	E2	$2,10E^{-8} - 5,37E^{-9}$
MSa2	MSa2	-	$4,85E^{-5}$
MSa2+E3	MSa2	E3	$4,38E^{-8} - 4,53E^{-9}$
MSa2+E4	MSa2	E4	$4,56E^{-7} - 8,32E^{-8}$

Tab. 4. Zestawienie wartości kąta tarcia wewnętrznego i gęstości właściwej

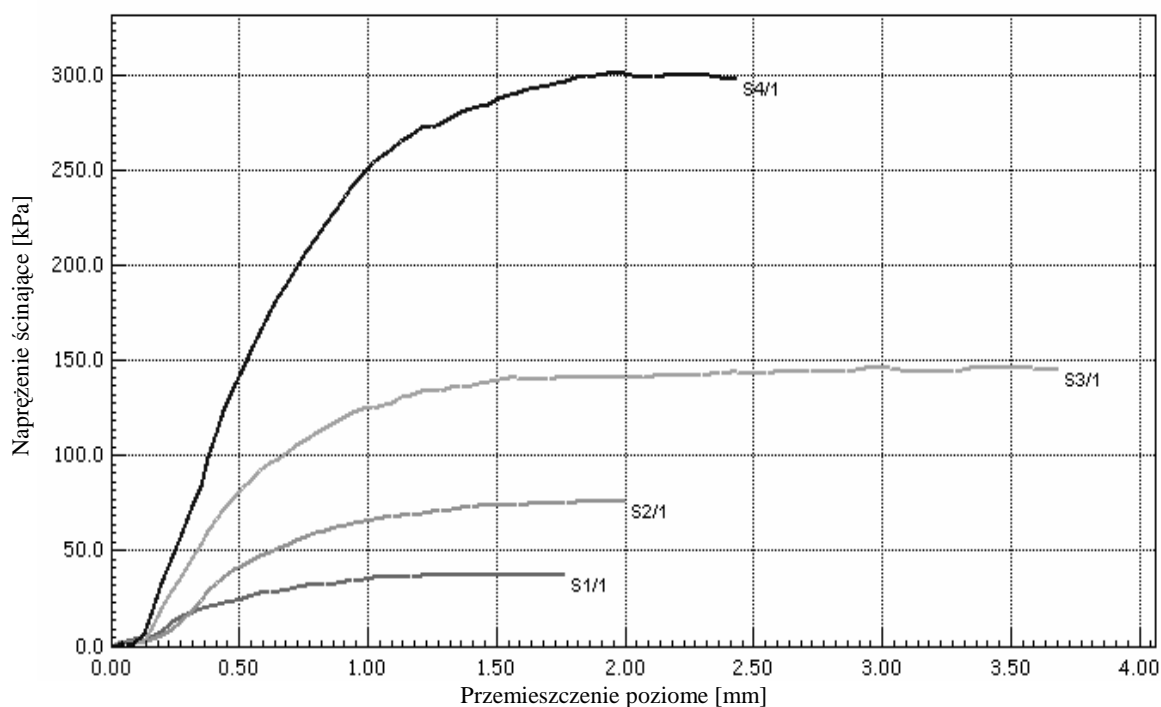
Oznaczenie próbki	Grunt	Emulsja alkoksylanowa	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_s [°]	Gęstość właściwa ρ_s [g/cm ³]
MSa1	MSa1	-	37,3	2,65
MSa1+E2	MSa1	E2	37,1	2,65
MSa2	MSa2	-	37	2,65
MSa2+E3	MSa2	E3	33,6	2,62



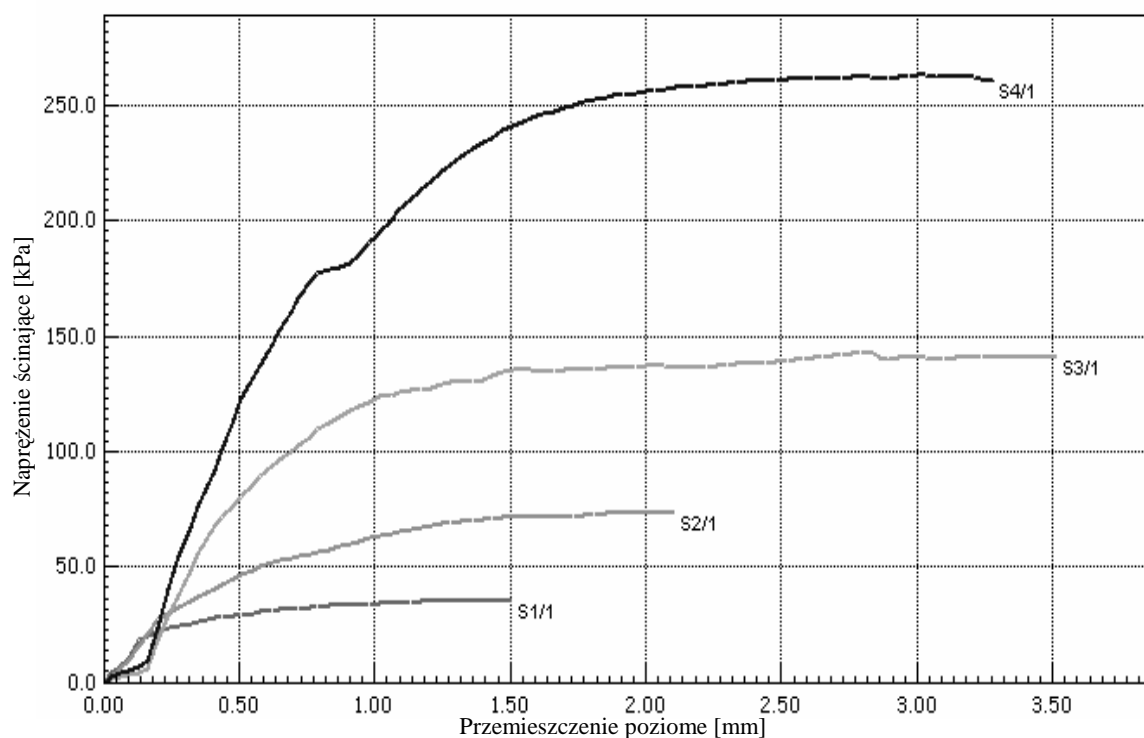
Rys. 4. Wykres zmian naprężeń stycznych od przemieszczenia poziome dla próbki MSa1



Rys. 5. Wykres zmian naprężeń stycznych od przemieszczenia poziome dla próbki MSa1+E2



Rys. 6. Wykres zmian naprężeń stycznych od przemieszczenia poziome dla próbki MSA2



Rys. 7. Wykres zmian naprężeń stycznych od przemieszczenia poziome dla próbki MSA2+E3

różnice właściwości przy czwartym stopniu konsolidacji. Próbka piasku naturalnego poddana konsolidacji pod obciążeniem 400 kPa osiągnęła maksymalną wartość naprężenia stycznego równą 300 kPa przy przemieszczeniu równym 2,3 cm, natomiast próbka piasku hydrofobizowanego poddana takiemu samemu stopniowi konsolidacji – odpowiednio 273 kPa i 3,3 cm. Skutkuje to różnicą w wartości kąta tarcia wewnętrznego –

otrzymane wartości odpowiednio 37° i 34°.

Gęstość właściwa badanej mieszaniny MSA1+E2 pozostała niezmienna w porównaniu z gęstością piasku kwarcowego ($\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$), natomiast w przypadku mieszaniny MSA2+E3 gęstość zmieniła się nieznacznie i wyniosła $\rho_s = 2,62 \text{ g/cm}^3$. Wyniki zestawiono w tabeli 4.

Porównując wyniki badania maksymalnej gęstości szkieletu gruntowego (tab. 5) zauważa się, że dodatek

Tab. 5. Zestawienie wartości gęstości objętościowej minimalnej i maksymalnej

Oznaczenie próbki	Grunt	Emulsja alkoksylanowa	$\rho_{d \min}$ [g/cm ³]	$\rho_{d \max}$ [g/cm ³]
MSa1	MSa1	–	1,50	1,75
MSa1+E2	MSa1	E2	1,51	1,76
MSa2	MSa2	–	1,44	1,92
MSa2+E3	MSa2	E3	1,43	1,94

emulsji hydrofobizującej nie wpływa ujemnie na zagęszczenie gruntu. Ponieważ zagęszczenie gruntów niespoistych jest jedną z istotniejszych cech determinujących możliwość ich zastosowania w budownictwie, wynik tego doświadczenia potwierdza możliwość aplikacji nowego materiału, jakim jest grunt modyfikowany.

5. Wnioski

Wyniki badań zamieszczonych w niniejszym artykule potwierdzają wpływ alkoksylanowych emulsji hydrofobizujących na przepuszczalność gruntów niespoistych. Piaski poddane działaniu wszystkich testowanych emulsji wykazały zmniejszone podciąganie kapilarne oraz mniejszą wartość współczynnika filtracji. Dodatek emulsji hydrofobizujących nie wpływa znacząco na właściwości wytrzymałościowe gruntu oraz na jego zagęszczenie. Zaobserwowane niewielkie zmniejszenia kąta tarcia wewnętrznego po dodaniu jednego z typów emulsji, nie podważają zasadności stosowania gruntów hydrofobizowanych jako materiałów budowlanych.

Ponieważ przedstawione badania mają charakter badań wstępnych, wiele aspektów zostało uproszczonych. W dalszej części badań planuje się, oznaczyć dla piasku wyjściowego właściwości chemiczne. Planuje się również zwrócić baczniejszą uwagę na wpływ czasu na proces hydrofobizacji gruntu. Obecne, wstępne wyniki, pozwalają jednak potwierdzić zasadność stosowania emulsji alkoksylanowych do hydrofobizowania gruntów niespoistych. Dodatkowym czynnikiem, który wpłynie na przepuszczalność mieszaniny grunt – emulsja hydrofobizująca będzie uziarnienie gruntu. Planuje się przeprowadzić doświadczenia z gruntami o uziarnieniu dobieranym sztucznie, szukając mieszaniny optymalnej pod względem właściwości hydroizolacyjnych, zagęszczenia i opłacalności produkcji.

Literatura

- Carpenter G. W., Stephenson R. W. (1986). Permeability testing in the triaxial cell. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 9, No. 1, 3-9.
- Lipiński M. J., Wdowska M. (2010). Saturation criteria for heavy overconsolidated cohesive soils. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, Vol. 42, No. 2, 295-302.
- Myślińska E. (1998). Laboratoryjne Badania Gruntów. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Skempton A. W. (1954). The pore pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, Vol. 4, No. 4, 143-147
- Stańczyk W. A., Ganicz T., Kurjata J., Lefik M., Wojciechowski M., Baryła P. (2012). Zgłoszenie Patentowe P.401246, z dnia 16.10.2012.

THE PROPERTIES OF HYDROFOBIZED SAND ESTABLISHED IN THE PRELIMINARY STUDIES

Abstract: The aim of the research is to determine the permeability and strength properties for the innovative building material – hydrofobized soil. Tests were performed for two sands with different particle size distribution (MSa1, MSa2), mixed with several types of hydrophobizing emulsions (E1-E4). Basic properties of these mixtures, their maximum dry density, strength properties, capillary rise and filtration properties were examined and, afterwards, compared with analogous results obtained for the sands before hydrophobization. Strength and filtration properties for hydrophobized sands were examined in triaxial compression apparatus. The angle of internal friction for natural sands was tested in direct shearing test apparatus and their filtration properties – in "ZWK2" apparatus. All tested samples showed lower permeability after hydrophobization. Strength properties remain almost the same after hydrophobization process.

Badania opisane w artykule są częściowo prowadzone w ramach Projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju” wykonywanego w Politechnice Łódzkiej, a finansowanego przez Wspólnotę Europejską z funduszu European Fund of Regional Development w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, 2007-2013.