

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 71, 2016: 13–20
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 71, 2016)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 71, 2016: 13–20
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 71, 2016)

Karolina KOŚ

Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Faculty of Environmental Engineering and Land Surveying, University of Agriculture
in Krakow

Stabilizacja gruntów pylastych cementem z dodatkiem środka jonowymiennego Stabilization of silty soils using cement with an ion-exchanger

Slowa kluczowe: cement, wytrzymałość na ścislanie

Key words: cement, compression strength

Wprowadzenie

Obecnie istnieje wiele metod stosowanych w stabilizacji gruntów, od najprostszych (metoda mieszanki optymalnej) po nowoczesne, w których używa się spoiw hydraulicznych o precyźniej zaprojektowanym składzie umożliwiającym stabilizację różnego rodzaju gruntów oraz pracę w różnych warunkach atmosferycznych. Środkiem najczęściej stosowanym do stabilizacji gruntów jest cement. Nie zawsze jednak grunty nadają się do stabilizacji cementem lub nie można osiągnąć wymaganych przez normę (PN-S-96012:1997) wartości wytrzymałości na ścislanie jednoosiowe. W ostatnich latach pojawiło się wiele spoiw polecanych do stabilizacji w przypadku, gdy działanie cementu nie wystarczy,

czy, stosowanych jako odrębne spoiwa hydrauliczne albo jako dodatki wspomagające działanie cementu (Bukowski, 2005; Cyske i Kluska, 2007). Przykładem może być środek jonowymienny (AT/2010-02-1830:2010) – sproszkowany dodatek do cementu, składający się z soli, alkaloidów, alkaloidów ziemnych i kompleksowych związków chemicznych. Zastosowanie środka jonowymiennego ma na celu wspomaganie tworzenia silnych wiązań krystalicznych cementu. W procesie wiązania i twardnienia składniki mineralne cementu w wyniku reakcji z wodą tworzą nowe, trudno rozpuszczalne w wodzie związki, które wydzielają się w postaci bardzo drobnych kryształków. Kryształki te zrastają się ze sobą i tworzą trwałą, wytrzymałą strukturę – tzw. fazy CSH (calcium-silicate-hydrates) oraz CAH (calcium-aluminate-hydrates), które odpowiadają za wzrost wytrzymałości stabilizowanego gruntu. Cement formuje krótkie połączenia krystaliczne, natomiast omawiany środek

aktywizuje proces formowania długich, igłowych połączeń krystalicznych, dzięki czemu grunt osiąga lepsze parametry wytrzymałościowe niż przy zastosowaniu samego cementu (Wieczorek, 2006). Dodatkowo, środek ten przekształca zanieczyszczenia występujące w gruncie, które zakłócają proces wiązania cementu (petrochemikalika, metale ciężkie, części organiczne), dzięki czemu możliwe jest maksymalne wykorzystanie spoiwa (Cysko i Kluska, 2007). Dzięki powyższym właściwościom dodatek ten poprawia wytrzymałość gruntu, nadaje wykonanej warstwie cechy sprężyste, zmniejsza ryzyko spękań, ponadto jest przyjazny środowisku naturalnemu i może być wykorzystany do stabilizacji każdego rodzaju gruntu.

Ze względu na niewielkie publikacje dotyczące wyników stosowania środków jonowymiennych do stabilizacji gruntów w polskich warunkach przeprowadzono badania dwóch rodzajów gruntów z dodatkiem samego cementu oraz cementu z omawianym środkiem, tak aby możliwe było określenie skuteczności jego działania.

Przegląd literatury

Badany środek jonowymienny jest stosunkowo od niedawna stosowany do stabilizacji gruntów, dlatego brak jest badań porównawczych do szerszej analizy odnośnie jego wpływu na parametry stabilizowanego gruntu. Jedną z niewielkich publikacji na ten temat jest praca Cyskiego i Kluski (2007). Autorzy porównali działanie kilku środków stosowanych do stabilizacji gliny piaszczystej. Na podstawie przedstawionych

w tej pracy wyników badań można stwierdzić, że:

- dodatek omawianego środka nie wpłynął na wzrost wytrzymałości na ściskanie próbek po 7 dobach pielęgnacji (w stosunku do wartości uzyskanych dla próbek stabilizowanych tylko cementem),
- wytrzymałość na ściskanie oznaczona po 28 dobach pielęgnacji była mniejsza dla próbek z dodatkiem środka jonowymiennego niż bez tego dodatku,
- nie podano wartości wskaźnika mrozoodporności; na podstawie ilości cykli do zniszczenia można jednak wnioskować o pozytywnym wpływie dodatku środka – próbki z dodatkiem 4% samego cementu uległy zniszczeniu po 9 cyklu Z-O, natomiast z dodatkiem wytrzymały 14 cykli.

Przywołany przykład z literatury opierał się na badaniach laboratoryjnych prowadzonych zgodnie z metodyką podaną w normie (PN-S-96012:1997). Tymczasem na podstawie parametrów określanych w badaniach terenowych, takich jak moduł odkształcenia lub wskaźnik nośności, przydatność środka jonowymiennego można ocenić wysoko. Przed wykonaniem stabilizacji moduł odkształcenia pierwotnego gliny pylastycznej i związkowej wynosił od prawie 6 do ponad 17 MPa (budowa hali przeładunkowej Rohlig Suus w Tarnowie Podgórnym). Po 7 dniach od wykonania stabilizacji cementem CEM I 42,5 R z dodatkiem badanego środka oznaczone wartości pierwotnych modułów odkształcenia wyniosły od 160 do 450 MPa (prezentacja firmy Geoconstruct, 2012).

Omoshoto (2005) badał wpływ dodatku środka jonowymiennego na wyniki

stabilizacji próbek organicznych mułów i uzyskał znaczny (średnio dwukrotny) wzrost wartości wskaźnika nośności CBR w stosunku do próbek stabilizowanych tylko cementem.

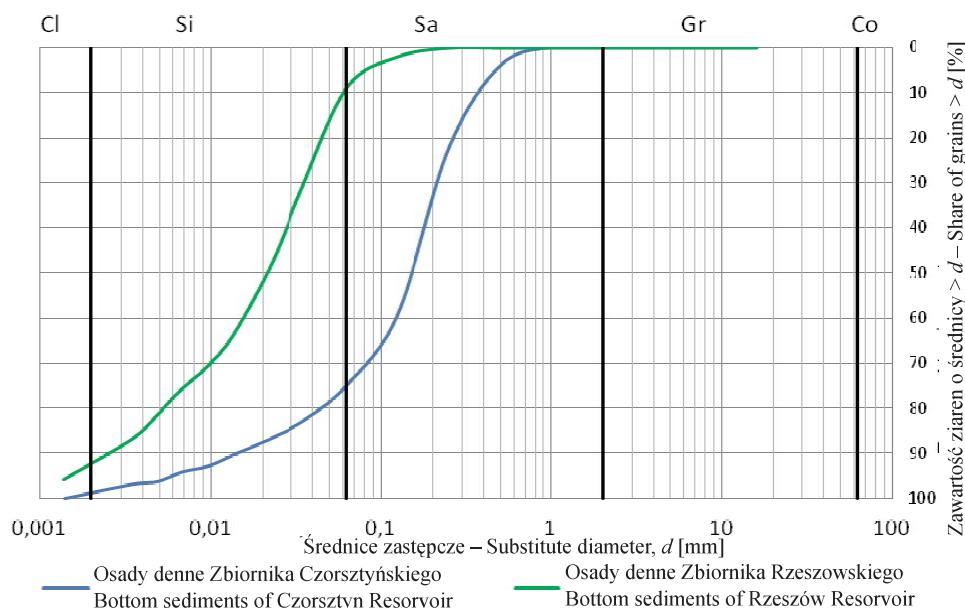
Materiał i metody

Jako materiał badawczy wykorzystano dwa materiały. Były to osady denne zbiorników zaporowych sklasyfikowane jako piasek pylasty (ze Zbiornika Czorsztyńskiego) oraz pył (ze Zbiornika Rzeszowskiego). Dokładną charakterystykę badanych gruntów znaleźć można w pracach autorki artykułu (Koś, 2013; Koś i Zawisza, 2015a).

Osady sklasyfikowane jako piasek pylasty (rys. 1), kalkufrakcyjny (wskaźnik różnoziarnistości wyniósł 11,8) cha-

rakteryzowały się stosunkowo małą zawartością części organicznych (1,4%), przez co można było zaliczyć je do gruntów mineralnych. Ze względu na zbyt dużą (30% w stosunku do maksymalnie 15%) zawartość cząstek drobnych ($\leq 0,075$ mm) materiał ten określono jako wątpliwy pod względem wysadzinościami. Dzięki dużej zawartości frakcji piaskowej (75%) uzyskano stosunkowo duże wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie (kąt tarcia wewnętrznego od 30,4 do 31,7°, a kohezja od 24,3 do 28,4 kPa w zależności od zagęszczenia wynoszącego $I_s = 0,90\text{--}1,00$) i wskaźnika nośności (11% po 4 dobach nasiąkliwości przy zagęszczeniu $I_s = 0,96$).

Osady sklasyfikowane jako pył również określono jako grunt kalkufrakcyjny, jednak w tym przypadku zawartość



RYSUNEK 1. Krzywe uziarnienia badanych osadów dennych
FIGURE 1. Grain size distribution curves of the tested bottom sediments

części organicznych była znacznie większa (3,33%). Materiał ten charakteryzował się małą wodoprzepuszczalnością (współczynnik filtracji $1,12 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) oraz bardzo dużą ściśliwością (moduł ściśliwości pierwotnej 3,86 MPa w zakresie naprężen od 0 do 0,40 MPa) i małą nośnością (wskaźnik nośności po 4-dobowym czasie nasiąkliwości 3,2% przy zagęszczeniu $I_s = 0,98$). Jest to typowy grunt wysadzinowy, który bez ulepszenia jego właściwości nie nadaje się do wykorzystania w budownictwie drogowym.

Badania przeprowadzono na próbkach osadów z dodatkiem 6% cementu (w stosunku do suchej masy gruntu) oraz środka jonowymienneego w ilości zapewniającej stosunek do zawartości cementu 1 : 150, przy zachowaniu minimalnej jednorazowej dawki 50 g. Zgodnie z zaleceniami producenta nie oznaczano wilgotności optymalnej oraz gęstości objętościowej szkieletu mieszanek stabilizowanych z dodatkiem środka jonowymienneego, zakładając wzrost wilgotności o 1–2% w stosunku do próbek stabilizowanych cementem. Wilgotność optymalna piasku pylastego z dodatkiem 6% cementu wyniosła 15,6%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wyniosła $1,668 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. W przypadku mieszanki pyłu z cementem parametry te wyniosły odpowiednio 25,5% oraz $1,434 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (Koś i Zawisza, 2015b).

Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe oznaczono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 7, 28, 42, 180 oraz 365 dobach pielęgnacji. Badanie przeprowadzono w prasie wytrzymałościowej aparatu jednoosiowe-

go ściskania przy prędkości przesuwu tłoka $10,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Próbki o średnicy i wysokości 8 cm formowano przy wilgotności optymalnej dla danej mieszanki gruntu z cementem i wskaźniku zagęszczenia $I_s \approx 1,0$ (przy standardowej metodzie zagęszczania). Po uformowaniu próbek zabezpieczano je przed utratą wilgotności, a następnie przez ostatnie 14 dob n -dniowej pielęgnacji w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem poddawano nasączaniu wodą (R_n) lub cyklom zamrażania – odmrażania ($R_{n \text{ Z-O}}$ – rysunek 2). W przypadku wytrzymałości oznaczonej po 7 dobach próbki zabezpieczone były przed wysychaniem przez 3 doby, zanurzone w wodzie do głębokości 1 cm przez 1 dobę, a następnie przez ostatnie 3 doby zanurzone całkowicie, zgodnie z normą (PN-S-96012:1997). Wskaźnik mrozoodporności obliczono jako stosunek wytrzymałości na ściskanie oznaczonej dla próbek poddanych cyklom zamrażania i odmrażania do wytrzymałości próbek po pielęgnacji wodnej.



RYSUNEK 2. Próbki w czasie pielęgnacji z cyklami zamrażanie – odmrażanie (fot. autor)
FIGURE 2. Samples during caring with frost – thaw cycles (photo: author)

Analiza wyników

Próbki osadów charakteryzowały się wartościami wytrzymałości na ściskanie zależnymi od rodzaju gruntu, zastosowanego stabilizatora oraz czasu pielęgnacji (tab.). Dzięki dużo większej zawartości frakcji piaskowej większe wartości uzyskano dla mieszanek z piaskiem pylastym, zarówno przy zastosowaniu cementu, jak i cementu z dodatkiem środka jonowymiennego. Wartości wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe oznaczane po standardowych okresach pielęgnacji zgodnie z normą (PN-S-96012:1997), były mniejsze i nie przekroczyły 1 MPa

w przypadku piasku pylastego, a w przypadku pyłu wyniosły maksymalnie 0,5 MPa. Dla każdej z czterech badanych mieszanek uzyskano typowe zależności, tj. wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz z wydłużaniem czasu pielęgnacji oraz jej znaczny spadek w wyniku zastosowania pielęgnacji z cyklami zamrażanie – odmrażanie. Wartości wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe dla próbek poddanych pielęgnacji do 180 dni były stosunkowo małe (dla piasku maksymalnie 1,3 MPa, a pyłu blisko 0,6 MPa; w obu przypadkach były to wartości oznaczone po 180 dniach bez cykli zamrażanie – odmrażanie). Znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe dla próbek poddanych pielęgnacji do 365 dni był zauważalny dla wszystkich mieszanych, jednak maksymalne wartości wytrzymałości dla próbek z piaskiem pylastym były znacznie wyższe niż dla próbek z piaskiem siltym.

TABELA 1. Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe badanych mieszanek
TABLE 1. Compression strength of the tested mixtures

Parametr Parameter	Stabilizator			
	cement		cement + środek jonowymienny/ /cement + ion-exchanger	
	stabilizowany grunt/stabilized soil			
	piasek pylasty/ /silty sand	pyl/silt	piasek pylasty/ /silty sand	pyl/silt
Wytrzymałość na ściskanie Compression strength [MPa]	R_0	0,06	0,16*	–
	R_7	0,48	0,45*	0,74
	R_{28}	0,52	0,51*	0,83
	$R_{28\text{ Z-O}}$	0,08	0,03*	0,28
	R_{42}	0,92	0,54	0,96
	$R_{42\text{ Z-O}}$	0,18	0,02	0,29
	R_{180}	1,08	0,56	1,32
	$R_{180\text{ Z-O}}$	0,80	0,02	0,86
	R_{365}	15,80	6,13	13,64
	$R_{365\text{ Z-O}}$	15,13	0,74	12,97
Wskaźnik mrozoodporności Frost resistance indicator [-]	n_{28}	0,15	0,06	0,33
	n_{42}	0,19	0,04	0,30
	n_{180}	0,74	0,03	0,65
	n_{365}	0,96	0,12	0,95

*Według Koś i Zawiszy (2015b)

*According to Koś and Zawisza (2015b)

małości stwierdzono natomiast dla próbek badanych po rocznym okresie pielęgnacji, zarówno w przypadku piasku pylastego, jak i samego pyłu (było to odpowiednio ponad 15 MPa dla piasku oraz ponad 6 MPa dla pyłu).

Porównując wartości uzyskane dla mieszanek z samym cementem do wyników dla mieszanek z cementem i dodatkiem środka jonowymiennego, można stwierdzić, że w przypadku piasku pylastego zastosowanie środka jonowymiennego spowodowało średnio 1,5-krotny wzrost wytrzymałości na ściskanie i tym samym znaczny wzrost mrozoodporności. Podobnej zależności nie stwierdzono jednak w przypadku gruntu pylastego, gdzie uzyskane wartości wytrzymałości były nawet mniejsze od odpowiadających im wartości uzyskanych dla mieszanek stabilizowanych samym cementem.

Porównując uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe mieszanek stabilizowanych cementem z wymaganiami zawartymi w normie odnośnie tych parametrów [PN-S-96012:1997] dla podbudowy zasadniczej lub pomocniczej (co najmniej 1,6 MPa po 7 dobach i co najmniej 2,5 MPa po 28 dobach) albo górnej warstwy ulepszonego podłoża (co najmniej 1,0 MPa po 7 dobach i 1,5 MPa po 28 dobach), należy stwierdzić, że nie spełnia ich żadna mieszanka. Wymagania dla dolnej warstwy podłoża (co najmniej 0,5 MPa po 28 dobach pielęgnacji) spełnia zarówno mieszanka z piaskiem pylastym, jak i pyłem, chociaż są to wartości zbliżone do wytrzymałości wymaganej.

Według wymagań powyższej normy wskaźnik mrozoodporności gruntu stabilizowanego cementem nie powinien być mniejszy od 0,6 dla górnej i dolnej

warstwy ulepszonego podłoża oraz 0,7 dla podbudowy zasadniczej nawierzchni drogowej. Wymagań tych nie spełnia żadna z badanych mieszanek.

Zastosowanie do stabilizacji cementu z dodatkiem środka jonowymiennego wpłynęło znacząco na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i wzrost mrozoodporności badanego piasku pylastego, przy czym nie miało to jednak znaczenia przy ocenie jego przydatności do celów budownictwa drogowego. Jak wspomniano, w przypadku pyłu nie uzyskano pozytywnych efektów stabilizacji przy zastosowaniu wyżej wymienionego spojwia, były one nawet mniej korzystne niż przy stosowaniu samego cementu.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono pozytywny wpływ zastosowania środka jonowymiennego jako dodatku w stabilizacji cementem w przypadku piasku pylastego. Podobnej zależności nie stwierdzono jednak w przypadku pyłu. Mieszanki pylowo-cementowe z dodatkiem środka jonowymiennego wykazały nawet mniej korzystne parametry wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności niż stabilizowane samym cementem.

Na podstawie przedstawionych badań własnych oraz przywołanych wyników badań laboratoryjnych i terenowych z literatury można wnosić, że istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań stabilizacji różnych gruntów przy zastosowaniu cementu z dodatkiem środka jonowymiennego, których wyniki mogą dać podstawę do szerszych analiz odnośnie jego przydatności do różnych zastosowań inżynierskich.

Literatura

- AT/2010-02-1830:2010. *Aprobata Techniczna 2010. Dodatki mineralne do betonu „Środek do stabilizacji gruntów GEOSTA® K-1”.*
- Bukowski, Z. (2005). Czym stabilizować podłożę gruntowe. *Magazyn Autostrady*, 4, 45-48.
- Cyske, W. i Kluska, I. (2007). Porównanie właściwości wybranych środków do stabilizacji gruntów na budowę autostrady A1. *Drogi i Mosty*, 1, 5-17.
- Koś, K. (2013). Charakterystyka geotechniczna osadów dennych cokoli Zbiornika Czorsztyn – Niedzica. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2, 135-143.
- Koś, K. i Zawisza, E. (2015a). Charakterystyka geotechniczna osadów dennych Zbiornika Rzeszowskiego. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 62, 45-48.
- Koś, K. i Zawisza, E. (2015b). Stabilization of bottom sediments from Rzeszowski Reservoir. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation*, 47(2), 127-137.
- Omoshoto, O. (2005). Influence of Geosta addition on cement-stabilised chicoco mud of the Niger Delta. *American Journal of Environmental Sciences*, 1, 59-63.
- PN-S-96012: 1997. *Drogi samochodowe. Stabilizacja i ulepszanie gruntów cementem*. Warszawa: PKN.
- Prezentacja firmy Geoconstruct. 2012: *Parametry stabilizowanego podłoża analizowane na przykładzie obiektu hali przeładunkowej Rohlig Suis w Tarnowie Podgórnym* (materiał niepublikowany).
- Wieczorek, M. (2006). Nowoczesna metoda budowy i recyklingu dróg. *Autostrady*, 4, 62-63.

Streszczenie

Stabilizacja gruntów pylastycznych cementem z dodatkiem środka jonowymiennego. W pracy przedstawiono wyniki badań stabilizacji z wykorzystaniem cementu z dodatkiem środka jonowymiennego. Przeprowadzone badania

miały na celu określenie skuteczności wspomnianego dodatku w stabilizacji cementem w polskich warunkach. Jako materiał badawczy wykorzystano dwa materiały: były to osady denne zbiorników zaporowych sklasyfikowane jako piasek pylasty (ze Zbiornika Czorsztyńskiego) oraz pył (ze Zbiornika Rzeszowskiego). Oznaczono wytrzymałość na ściskanie oraz mrozoodporność czterech mieszanek po różnych okresach (od 7 do 365 dni) i sposobach pielęgnacji (wodna lub z cyklami mrożenia – odmrażanie). Zastosowanie cementu z dodatkiem środka jonowymiennego wpłynęło w znaczącym stopniu na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe i mrozoodporności piasku pylastego w stosunku do stabilizacji samym cementem, jednak nie miało to znaczenia przy kwalifikacji tego materiału do zastosowań w budownictwie drogowym. Podobnej zależności nie stwierdzono jednak w przypadku pyłu – mieszanki pyłu stabilizowane cementem z dodatkiem środka jonowymiennego wykazały nawet mniej korzystne parametry wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności niż stabilizowane samym cementem.

Summary

Stabilization of silty soils using cement with an ion-exchanger. The paper presents the results of soil stabilization using cement with an ion-exchanger. The tests were carried out in order to determine the effectiveness of the mentioned additive in stabilization with cement in Polish conditions. Two materials were used in the tests, the bottom sediments from dam reservoirs, classified as silty sand

(from Czorsztyński Reservoir) and silt (from Rzeszowski Reservoir). Compressive strength and frost resistance of four mixtures after different times (from 7 to 365 days) and methods of caring (water or frost-thaw cycles) were determined. Using cement with an ion-exchanger significantly increased the compressive strength and frost resistance of the silty sand in relation to using cement alone (although it did not have any reflection during classification of this material in road engineering). However, similar results were not noted in case of silt

– mixtures of silt with cement and ion-exchanger showed even less beneficial values of compression strength and frost resistance than the ones stabilized only with cement.

Author's address:

Karolina Koś
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
al. Mickiewicza 24/28
30-059 Kraków, Poland
e-mail: karolinasudyka@wp.pl