

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE I MROZODPORNOŚĆ POPIOŁO-ŻUŻLA STABILIZOWANEGO SPOIWAMI HYDRAULICZNYMI

Eugeniusz Zawisza, Justyna Biśtyga, Mateusz Kopczyński
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań stabilizacji popioło-żużla ze składowiska Elektrociepłowni „Kraków” spoiwami hydraulicznymi Terramix F22.5 oraz SOLITEX. Określono wytrzymałość na ściskanie próbek bez dodatku i z 3, 6 oraz 8% dodatkiem spoiwa po 7, 14, 28 i 42 dobach pielęgnacji oraz po 28 dobach pielęgnacji próbek poddanych cykлом zamrażania i odmrażania, co było podstawą do obliczenia wskaźnika mrozoodporności. Otrzymane wyniki porównano z wynikami wcześniejszych badań materiału pochodzącego z tego samego składowiska stabilizowanego cementem i wapnem. Wyniki przeprowadzonej analizy odniesiono do wymogów przedmiotowych norm i dokonano oceny przydatności stabilizowanego popioło-żużla do celów budownictwa drogowego.

Słowa kluczowe: popioło-żużel, stabilizacja, wytrzymałość na ściskanie, mrozoodporność

WSTĘP

Do budowy nasypów drogowych stosuje się głównie grunty rodzime mineralne pobrane ze złóż ziemnych po ściągnięciu warstwy humusu. Pozyskanie tych gruntów jest dość kosztowne, a spowodowane jest to tym, że ich występowanie jest nierównomierne, a powstałe wyrobiska mogą wywierać niekorzystny wpływ na otaczające środowisko przyrodnicze. Dlatego należy brać pod uwagę stosowanie materiałów zastępczych, co powoduje ograniczenie wykorzystywania kruszyw naturalnych. Takimi materiałami mogą być uboczne produkty spalania węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach, to jest: popioły lotne, popioło-żużle i żużle. Za wykorzystaniem odpadów poenergetycznych przemawia fakt ich masowego występowania. Odpady te mogą być pobierane na teren budowy ze zwałowisk przy elektrowniach lub elektrociepłowniach albo ze składowisk odpadów.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Eugeniusz Zawisza, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; mgr Justyna Biśtyga, mgr Mateusz Kopczyński – absolwenci Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie; e-mail: kiwig@ur.krakow.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

Zarówno grunty naturalne, jak i materiały odpadowe poenergetyczne mogą być stosowane do formowania nasypów [Pisarczyk 2004], a także podbudów drogowych, które są ważnymi elementami konstrukcyjnymi drogi. Ich zasadniczym zadaniem jest zmniejszenie naprężeń powstających od obciążeń eksploatacyjnych w górnych warstwach nawierzchni, które są przekazywane na podłoże. Ponadto podczas budowy drogi na podbudowy może oddziaływać obciążenie technologiczne, które również powinno być uwzględniane w projektowaniu podbudowy. Na podbudowy drogowe działają czynniki klimatyczne, a mianowicie: wysokie temperatury dodatnie, niskie temperatury ujemne i cykle zamrażania-odmrażania.

Jeśli parametry gruntu rodzimego lub zastępczego nie są zadowalające, konieczne staje się modyfikowanie jego właściwości mechanicznych poprzez zastosowanie odpowiedniego stabilizatora, co przeważnie jest bardziej opłacalne niż całkowita wymiana gruntu [Rolla 2001]. Stabilizatorem mogą być klasyczne spoiwa hydrauliczne, takie jak cement, wapno [Zawisza i Sobuła 2007] lub inne pojawiające się na rynku, takie jak Silment [Gmyrek i Peroński 2005, Zawisza i Kłęk 2006], SOLITEX lub Terramix.

Spojwa hydrauliczne z grupy Terramix są to sproszkowane, szare materiały o strukturze cementu, dużej powierzchni właściwej, łączące w sobie właściwości wiążące cementu i osuszające wapna. Przeznaczone są głównie (w zależności od odmiany) do konstruowania górnych i dolnych warstw podbudowy z wykorzystaniem gruntów rodzimych, kruszyw lub mieszanek, wzmacniania podłoża gruntowego, wzmacniania warstw nasypów oraz makroniwelacji terenu. Spoiwa hydrauliczne Terramix od wielu lat znajdują zastosowanie na budowach w całym kraju, przede wszystkim w inżynierii komunikacyjnej i robotach ziemnych [<http://www.spoiwx.pl>].

Spojwo hydrauliczne SOLITEX produkowane jest na bazie UPS (ubocznych produktów spalania węgla kamiennego w energetyce). Dzięki swoim właściwościom wiążącym jest stosowane w budownictwie komunikacyjnym, a przede wszystkim wykorzystywane do polepszenia właściwości gruntów i kruszyw, poprawy nośności lub jako dodatek do innych spoiw hydraulicznych. Ponadto spoiwo to może być stosowane do ulepszenia i uszczelniania podłoża na składowiskach odpadów [<http://www.handlomax.pl>].

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy było określenie wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności popioło-żuźla z Elektrociepłowni „Kraków” stabilizowanego spoiwem Terramix F22.5 oraz SOLITEX. Badania przeprowadzono w aspekcie oceny przydatności badanych materiałów do celów budownictwa drogowego.

MATERIAŁY I METODY

Materiał do badań stanowiła mieszanina popiołowo-żuźłowa pochodząca z procesu spalania węgla kamiennego w Elektrociepłowni „Kraków” pobrana z wieloletniego składowiska. Podstawowe właściwości fizyczne popioło-żuźła oznaczono metodami standardowymi [Myślińska 1998, Wiłun 2000]: skład granulometryczny oznaczono na dwóch próbkach metodą łączoną – sitową „na mokro” dla ziaren o $d > 0,063$ mm i areometryczną dla cząstek o $d < 0,063$ mm. Gęstość właściwą szkieletu oznaczono na dwóch próbkach o $d < 0,063$ mm metodą kolby miarowej. Maksymalną gęstość objętościową szkieletu i wilgotność optymalną oznaczono na czterech próbkach w aparacie Proctora w cylindrze o objętości około 1 dm^3 przy standardowej energii zagęszczania $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Wytrzymałość na ściskanie oznaczono na próbkach samego popioło-żuźla oraz z dodatkiem 3, 6 i 8% spoiwa Terramix F22.5 lub SOLITEX w stosunku do suchej masy popioło-żuźla. Próbki o wysokości i średnicy 8 cm formowano w aparacie Proctora przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia równym 1,0, stosując standardową energię zagęszczenia $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$. Przygotowano po 4 próbki każdego materiału i dokonano procesu pielęgnacji, zgodnie z wymogami normy PN-S-96012:1997, po którym określono wartości wytrzymałości na ściskanie po 7, 14, 28 i 42 dobach (tab. 1), przy użyciu prasy aparatu Tritech 100 (ryc. 1). W czasie ściskania próbki przy prędkości $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, dokonywano odczytu na czujniku dynamometru, a także odczytu czujnika, który wskazywał powstałe odkształcenia, aż do zanotowania największej wartości obciążenia, przy której następowało zniszczenie próbki. Wskazania dynamometru przeliczano na wartość siły ścisającej wg wzoru (1), a wytrzymałość na ściskanie obliczono wg wzoru (2):

$$F = G \cdot k_d \text{ kN} \quad (1)$$

gdzie:

- F – siła ścisająca, kN,
- G – odczyt z czujnika dynamometru,
- k_d – stała dynamometru równa 0,023068050.

$$R_c = \frac{F}{P} \cdot 10^{-3} \text{ MPa} \quad (2)$$

gdzie:

- R_c – wytrzymałość na ściskanie, MPa,
- P – powierzchnia próbki, m^2 .

Wskaźnik mrozoodporności oznaczono w oparciu o normę PN-S-96012:1997. Sposób przygotowania próbek był analogiczny jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie. Przygotowano próbki z dodatkiem 3, 6 i 8% stabilizatora, formowane w aparacie Proctora przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,0$. Po 14 dobach pielęgnacji (tab. 2) próbki poddano 14 cyklom zamrażania w komorze mrozeniowej w temperaturze -23°C i odmrażania w wodzie o temperaturze pokojowej (łącznie po 28 dobach). Dodatkowo wykonano badania na próbkach po 4 dobach pielęgnacji i 3 cyklach zamrażania-odmrażania (łącznie po 7 dobach). Na jeden cykl składało się mrożenie przez 8 godzin i odmrażanie przez 16 godzin. Wskaźnik mrozoodporności określa się według następującego wzoru:

$$n = \frac{R_{28}^{z-o}}{R_{28}} \quad (3)$$

gdzie:

- R_{28}^{z-o} – wytrzymałość na ściskanie próbek po 14 dobach pielęgnacji i 14 cyklach zamrażania i odmrażania,
- R_{28} – wytrzymałość na ściskanie próbek po 14 dobach pielęgnacji i 14 dobach całkowitego zanurzenia w wodzie.

Tabela 1. Pielęgnacja próbek do badań wytrzymałości na ściskanie
Table 1. Samples maturing for compressive strength tests

| Wytrzymałość na ściskanie po ... dobach Compressive strength after ... days | Dodatek spoiwa Binder additive % | Parametry początkowe próbek Initial parameters of samples | | Pielęgnacja próbek Samples maturing |
|--|-------------------------------------|--|---|---|
| | | Wilgotność Moisture content % | Wskaźnik zagęszczenia Compaction index | |
| R_7 | 3 | 36,98 | 0,99 | 3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone w wodzie, a przez następne 3 doby zanurzone całkowicie w wodzie |
| | 6 | 35,84 | 0,99 | |
| | 8 | 31,61 | 1,04 | |
| R_{14} | 3 | 35,45 | 0,96 | 7 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 7 dób zanurzone całkowicie w wodzie |
| | 6 | 36,46 | 1,01 | |
| | 8 | 36,51 | 1,01 | |
| R_{28} | 3 | 35,05 | 1,01 | 14 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 14 dób zanurzone całkowicie w wodzie |
| | 6 | 36,69 | 1,04 | |
| | 8 | 36,89 | 1,03 | |
| R_{42} | 3 | 36,09 | 1,02 | 28 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 14 dób zanurzone całkowicie w wodzie |
| | 6 | 35,91 | 1,03 | |
| | 8 | 36,53 | 1,03 | |



Ryc. 1. Aparat Trittech 100 do badań wytrzymałości na ściskanie

Fig. 1. Apparatus Trittech 100 for testing of compressive strength

Tabela 2. Pielęgnacja próbek do badań wskaźnika mrozoodporności

Table 2. Samples maturing for frost resistance tests

| Wytrzymałość na ściskanie po ... dobach Compressive strength after ... days | Dodatek spoiwa Binder additive % | Parametry początkowe próbek Initial parameters of samples | | Pielęgnacja próbek Samples maturing |
|--|----------------------------------|--|---|--|
| | | Wilgotność Moisture content % | Wskaźnik zagęszczenia Compaction index | |
| R_7^{zo} | 3 | – | – | 3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone 1 cm w wodzie, a przez następne 3 cykle zamrażania-odmrażania |
| | 6 | 35,12 | 0,78 | |
| | 8 | 34,95 | 0,76 | |
| R_{28}^{zo} | 3 | – | – | 13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone w wodzie, a przez następne 14 dób poddane cyklem zamrażania-odmrażania |
| | 6 | 35,48 | 0,76 | |
| | 8 | 35,79 | 0,76 | |

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W składzie granulometrycznym popioło-żuźla przeważała frakcja piaskowa – około 59%, natomiast najmniejszy udział miała frakcja ilowa – około 2% (tab. 3). Materiał sklasyfikowano jako piasek drobny pylasty. Wskaźnik różnoziarnistości wynosił ponad 10, dlatego materiał określono jako kilkufrakcyjny. Gęstość właściwa szkieletu wynosiła $2,42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Wilgotność optymalna popioło-żuźla wynosiła ponad 36%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu około $1,15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (tab. 4). Dodatek spoiw, zarówno Soliteksu, jak i Terramix F22.5, nie spowodował znaczących zmian tych parametrów, nie wystąpiły też jednoznaczne tendencje zmian, to znaczy ich zmniejszanie się lub zwiększanie wraz ze zwiększaniem dodatku spoiwa.

Tabela 3. Podstawowe właściwości fizyczne popioło-żuźla

Table 3. Basic physical properties of ash-slag

| Parametr – Parameter | Wartość – Value |
|--|-----------------|
| Zawartość frakcji – Fraction content, %: | |
| – żwirowa – gravel 63–2 mm | 7,0 |
| – piaskowa – sand 2–0,063 mm | 58,9 |
| – pyłowa – silt 0,063–0,002 mm | 32,5 |
| – ilowa – clay < 0,002 mm | 1,7 |
| Nazwa wg – Name acc. to: PN-EN ISO 14688-2:2006 | siFSa |
| Wskaźnik różnoziarnistości – Uniformity coefficient | 10,6 |
| Gęstość właściwa szkieletu – Density of solid particles, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 2,42 |

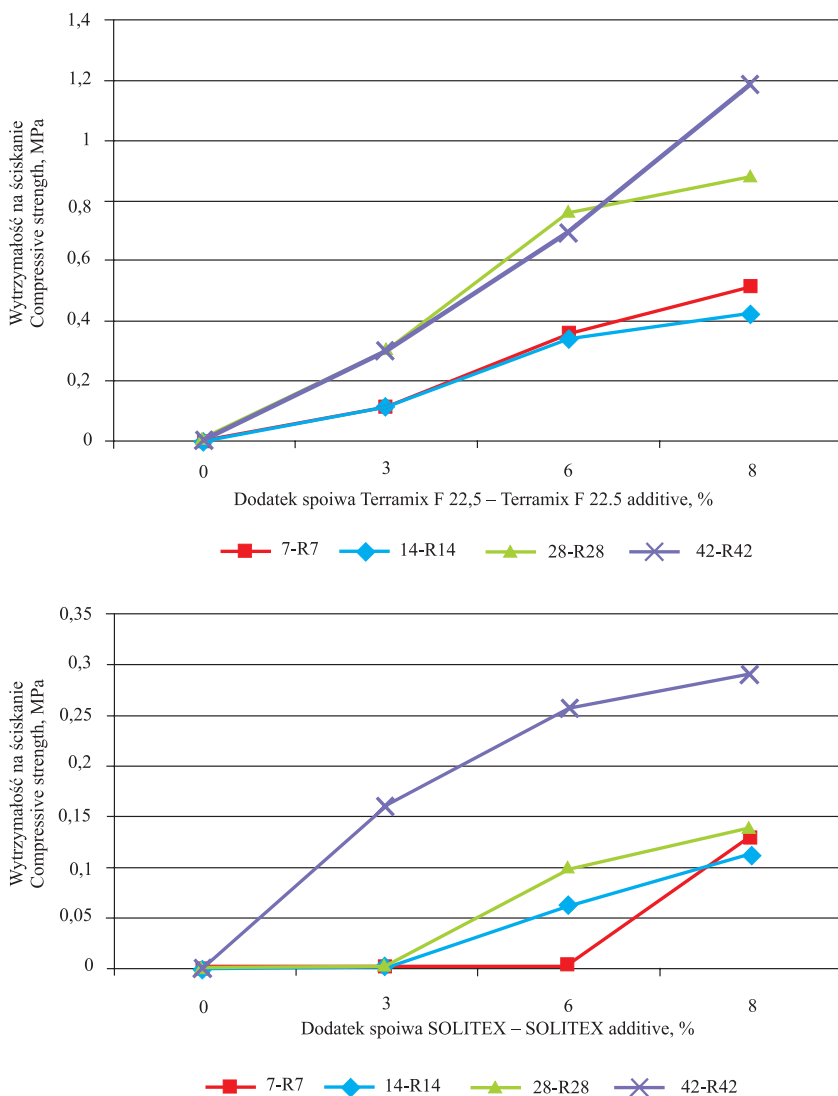
Tabela 4. Parametry zagęszczalności popioło-żuźla oraz jego mieszanek ze spoiwem

Table 4. Compatibility parameters of ash-slag and its mixture with binder

| Parametr – Parameter | Popioło-żuźla Ash-slag | Wartość dla – Value for: | | | |
|--|---------------------------|--|--------------------|----------------|----------------|
| | | Mieszanki popioło-żuźla ze spoiwem Mixture of ash-slag with binder: | dodatek – additive | | |
| | | | rodzaj – type | 3% | 6% |
| Wilgotność optymalna Optimum moisture content, % | 36,40 | Terramix F22.5 SOLITEX | 35,23 35,80 | 35,90 36,40 | 35,20 36,50 |
| Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Maximum dry density, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1,146 | Terramix F22.5 SOLITEX | 1,156 1,145 | 1,140 1,130 | 1,149 1,135 |

Próbki popioło-żuźla bez dodatku spoiwa, a także część próbek z 3 i 6% dodatkiem SOLITEX-u uległy całkowitemu rozmoknięciu podczas pielęgnacji wodnej. Próbki popioło-żuźla z dodatkiem spoiwa podczas ściskania początkowo uległy spękaniu na bocznej powierzchni, a następnie po przekroczeniu wartości wytrzymałości na ściskanie ulegały całkowitemu zniszczeniu. Otrzymane wyniki świadczą, że wraz ze zwiększaniem procentowego dodatku spoiwa i wydłużaniem czasu pielęgnacji, wytrzymałość na ściskanie zwięk-

szala się (tab. 5, ryc. 2). W przypadku próbek stabilizowanych spoiwem Terramix F22.5 największa wartość wytrzymałości na ściskanie wynosiła 1,19 MPa po 42 dobach pielęgnacji z dodatkiem 8% spoiwa, a najmniejsza 0,11 MPa po 7 dobach pielęgnacji z dodatkiem 3% spoiwa. W przypadku próbek stabilizowanych spoiwem SOLITEX największa wartość wytrzymałości na ściskanie wynosiła 0,29 MPa po 42 dobach pielęgnacji z dodatkiem 8% spoiwa, a najmniejszą 0,06 MPa po 14 dobach pielęgnacji z dodatkiem 6% spoiwa.



Ryc. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie popioło-żużla od dodatku spoiwa i czasu pielęgnacji: a) Terramix F22.5, b) SOLITEX

Fig. 2. Compressive strength of the ash-slag versus binder additive and maturing duration: a) Terramix F22.5, b) SOLITEX

Tabela 5. Wytrzymałość na ściskanie popioło-żuźla stabilizowanego cementem, wapnem oraz spoiwami Terramix F22.5 i SOLITEX

Table 5. Compressive strength of ash-slag stabilised with cement, lime and binders Terramix F22.5 and SOLITEX

| Stabilizator Binder | | Wytrzymałość na ściskanie, MPa, po pielęgnacji: Compressive strength, MPa, after maturing: | | | | | |
|------------------------|--------------------------|---|----------|----------|----------|--|-------------|
| Rodzaj Type | Dodatek Additive % | powietrzno-wodnej air-water | | | | cyklach mrożenia i odmrażania freezing-thawing cycles | |
| | | R_7 | R_{14} | R_{28} | R_{42} | R_{7z-o} | R_{28z-o} |
| Cement* | 3 | 0,90 | – | 1,06 | – | – | 0,74 |
| | 6 | 1,78 | – | 2,80 | – | – | 2,21 |
| | 10 | 1,77 | – | 3,76 | – | – | 2,85 |
| Wapno Lime* | 3 | 0,60 | – | 0,99 | – | – | 0,98 |
| | 6 | 0,72 | – | 1,88 | – | – | 1,14 |
| | 10 | 0,80 | – | 1,94 | – | – | 1,07 |
| Terramix F22.5 | 3 | 0,11 | 0,11 | 0,30 | 0,30 | 0,00 | 0,00 |
| | 6 | 0,347 | 0,34 | 0,76 | 0,69 | 0,05 | 0,033 |
| | 8 | 0,507 | 0,42 | 0,88 | 1,19 | 0,25 | 0,073 |
| SOLITEX | 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,00 |
| | 6 | 0,00 | 0,06 | 0,10 | 0,26 | 0,00 | 0,00 |
| | 8 | 0,13 | 0,11 | 0,14 | 0,29 | 0,00 | 0,00 |

* Zawisza i in. 2006

Porównanie wyników stabilizacji spoiwem SOLITEX, Terramix F22.5 oraz cementem i wapnem

Wyniki badań własnych porównano z wynikami wcześniejszych badań stabilizacji materiału pochodzącego również ze składowiska Elektrociepłowni „Kraków” (dawniej „Łęg”) stabilizowanego cementem i wapnem przy wskaźniku zagęszczenia próbek $I_s = 1,0$ [Zawisza i in. 2006]. Na podstawie analizy zbiorczej wyników zestawionych w tabeli 5 można stwierdzić, że najlepszym spoiwem do stabilizacji popioło-żuźla okazał się cement. Wytrzymałość na ściskanie próbek przy dodatku 10% spoiwa wynosiła 1,77 MPa po 7 dobach pielęgnacji. Po 28 dobach pielęgnacji wartość wytrzymałości na ściskanie przy 10% dodatku cementu wynosiła 3,76 MPa. Po 14 cyklach zamrażania-odmrażania wartość wytrzymałości na ściskanie była największa również przy 10% dodatku cementu – 2,85 MPa.

Stabilizacja popioło-żuźła wapnem w porównaniu z wynikami uzyskanymi przy stabilizacji cementem wykazała nieco gorsze wyniki. Największa wartość wytrzymałości na ściskanie, jaką uzyskano po 28 dobach pielęgnacji z 10% dodatkiem spoiwa, wynosiła 1,94 MPa. Najmniej korzystną wartość tego parametru osiągnięto z dodatkiem 3% spoiwa po 7 dobach pielęgnacji – 0,60 MPa. Po 14 cyklach zamrażania-odmrażania

wytrzymałość na ściskanie wynosiła około 1 MPa przy 3% dodatku spoiwa i około 1,1 MPa przy 6 i 10% dodatku spoiwa.

Znacznie słabszym spoiwem okazał się Terramix F22.5. Największą wartość wytrzymałości na ściskanie wynoszącą 0,88 MPa wykazały próbki z dodatkiem 8% spoiwa po 28 dobach. Po 14 cyklach zamrażania-odmrażania wytrzymałość na ściskanie wynosiła zaledwie 0,03 MPa przy dodatku 6% spoiwa i 0,07 MPa przy 8% dodatku spoiwa.

Najmniej korzystne wyniki stabilizacji popioło-żuźła uzyskano przy zastosowaniu spoiwa SOLITEX. Przy 3% dodatku spoiwa próbki uległy rozmoknięciu, przy 6% wytrzymałość na ściskanie wynosiła zaledwie 0,10 MPa, a przy 8% 0,14 MPa po 28 dobach. Badania wskaźnika mrozoodporności dały wynik negatywny, ponieważ próbki uległy rozmoknięciu.

Przydatność gruntów do budownictwa drogowego określa się na podstawie wartości parametrów kryterialnych podanych w odnośnych normach. Wartości wytrzymałości na ściskanie zestawione poniżej (tab. 6) wskazują na przydatność popioło-żuźła stabilizowanego cementem do celów budownictwa drogowego. Norma PN-S-96012:1997 dotycząca stabilizacji gruntów cementem wymaga, aby wytrzymałość na ściskanie podbudowy zasadniczej lub pomocniczej nawierzchni drogowej wynosiła co najmniej 1,6 MPa po 7 dobach oraz 2,5 MPa po 28 dobach. Wymagania te spełnia popioło-żuźel z dodatkiem 6 i 10% cementu po 7 i 28 dobach pielęgnacji. Natomiast wymagania dotyczące górnej warstwy ulepszonego podłoża, według których wytrzymałość na ściskanie po 7 dobach powinna wynosić przynajmniej 1,0 MPa, a po 28 dobach – 1,5 MPa, spełnia popioło-żuźel z 6% dodatkiem cementu. Popioło-żuźel stabilizowany spoiwami Terramix F22.5 czy SOLITEX nie spełnia podanych wyżej wymagań normowych.

W przypadku stabilizacji wapnem gruntów stosowanych w budownictwie drogowym wartości parametrów kryterialnych określa norma PN-S-96011:1998. Wartości wytrzymałości na ściskanie zestawione w tabeli 7 wskazują na przydatność popioło-żuźła stabilizowanego wapnem do celów budownictwa drogowego. Cytowana wyżej norma wymaga, aby wytrzymałość na ściskanie materiału na górną warstwę ulepszonego podłoża po 7 dobach wynosiła przynajmniej 0,3 MPa, a po 28 dobach przynajmniej 0,4 MPa (tab. 7). W przypadku podbudowy pomocniczej dróg o ruchu bardzo lekkim powinna ona wynosić przynajmniej 0,5 MPa po 7 dobach oraz 0,7 MPa po 28 dobach. W celu wstępnego ulepszenia gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszonego podłoża wartość ta po 7 dobach powinna wynosić przynajmniej 0,2 MPa. Takie warunki spełnia popioło-żuźel stabilizowany wapnem już przy 3% jego dodatku.

Popioło-żuźel stabilizowany spoiwem Terramix F22.5 przy dodatku 6% spełnia wymogi dotyczące górnej warstwy ulepszonego podłoża i wstępnego ulepszenia gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszonego podłoża, natomiast przy dodatku 8% spełnia wymogi zarówno dotyczące górnej warstwy ulepszonego podłoża, jak i podbudowy pomocniczej dróg o ruchu bardzo lekkim (tab. 7). Stabilizacja popioło-żuźła spoiwem SOLITEX nie spełnia wymagań normowych w żadnym przypadku.

Tabela 6. Wytrzymałość na ściskanie stabilizowanego popioło-żuźla na tle wymagań normy PN-S-96012:1997
 Table 6. Compressive strength of stabilized ash-slag comparing to standard PN-S-96012:1997 requirements

| Czas pielęgnacji doby Maturing duration days | Wymagania normy Requirements of standard PN-S-96012:1997 | | Wyniki badań – Tests results | | | | |
|---|---|--|--|---------|--|---------|----------------|
| | Podbudowa zasadnicza lub pomocnicza nawierzchni drogowej Road base or subbase | Górna część warstwy ulepszonego podłoża Upper part of the improved subgrade | Dodatek stabilizatora Binder additive % | Cement* | Dodatek stabilizatora Binder additive % | SOLITEX | Terramix F22.5 |
| 7- R_7 | 1,6–2,2 | 1,0–1,6 | 3 | 0,9 | 3 | – | 0,11 |
| | | | 6 | 1,78 | 6 | – | 0,347 |
| | | | 10 | 1,77 | 8 | – | 0,507 |
| 28- R_{28} | 2,5–5,0 | 1,5–2,5 | 3 | 1,06 | 3 | 0,00 | 0,30 |
| | | | 6 | 2,8 | 6 | 0,10 | 0,75 |
| | | | 10 | 3,76 | 8 | 0,14 | 0,88 |

* Zawisza i in. 2006

Tabela 7. Wytrzymałość na ściskanie popioło-żużla na tle wymagań normy PN-S-96011:1998
 Table 7. Compressive strength of stabilized ash-slag comparing to standard PN-S-96011:1998 requirements

| Czas pielęgnacji doby Maturing duration days | Wytrzymałość na ściskanie – Compressive strength, MPa | | | Wyniki badań – Tests results | | | | |
|---|--|---|---|---|---|-------------------|------|-------|
| | Wymagania normy – Requirements of standard PN-S-96011:1998 | | | | | | | |
| | Górna część warstwy ulepszono- podłoża Upper part of the improved subgrade | Podbudowa pomocnicza dla dróg o ruchu lekkim Subbase for light traffic roads | Wstępne ulepszenie gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolnej warstwy ulepszono- podłoża Initial improvement of soils for further stabilisation or for lower layers of the improved subgrade | Dodatek stabilizatora Binder additive, % | Dodatek stabilizatora Binder additive, % | Terramix F22.5 | | |
| 7-R ₇ | ≥ 0,3 | ≥ 0,5 | ≥ 0,2 | 3 | 0,6 | 3 | – | 0,11 |
| | | | | 6 | 0,72 | 6 | – | 0,347 |
| | | | | 10 | 0,8 | 8 | – | 0,507 |
| 28-R ₂₈ | ≥ 0,4 | ≥ 0,7 | – | 3 | 0,99 | 3 | 0,00 | 0,3 |
| | | | | 6 | 1,88 | 6 | 0,10 | 0,75 |
| | | | | 10 | 1,94 | 8 | 0,14 | 0,88 |

* Zawisza i in. 2006

Wskaźnik mrozoodporności

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek popioło-żużla stabilizowanego spoiwem Terramix F22.5 poddanych 14 cyklom (czas pielęgnacji – 28 dób) oraz 3 cyklom (czas pielęgnacji – 7 dób) zamrażania w temperaturze -23°C i odmrażania w wodzie w temperaturze pokojowej zestawiono w tabeli 5. Próbki z dodatkiem stabilizatora 3% uległy całkowitemu zniszczeniu już w czasie mrożenia. Próbki z większym dodatkiem spoiwa wykazały wytrzymałość na ściskanie. Największą wartość wytrzymałości na ściskanie uzyskano po 3 cyklach zamrażania-odmrażania z dodatkiem 8% spoiwa i wynosiła ona 0,25 MPa, natomiast najmniejszą 0,03 MPa po 14 cyklach zamrażania-odmrażania z dodatkiem 6% spoiwa.

Próbki stabilizowane spoiwem SOLITEX, poddane cyklom zamrażania-odmrażania, rozmokły całkowicie już po pierwszych kilku dobach cyklu. Wskazuje to na brak mrozoodporności popioło-żużla stabilizowanego tym spoiwem.

Porównanie wyników badań mrozoodporności popioło-żużla stabilizowanego spoiwem Terramix F22.5 oraz cementem i wapnem

Wartości wskaźnika mrozoodporności popioło-żużla stabilizowanego cementem lub wapnem [Zawisza i in. 2006] oraz spoiwem Terramix F22.5 zestawiono w tabeli 8. Ich analiza wskazuje, że na podbudowę zasadniczą lub pomocniczą nawierzchni drogowej oraz górną część warstwy ulepszanego podłoża gruntowego można zastosować popioło-żużel stabilizowany cementem już przy 3% jego dodatku, ponieważ wartość wskaźnika mrozoodporności wynosząca 0,70 spełnia wymagania normy PN-S-96012:1997.

W przypadku stabilizacji wapnem [PN-S-96011:1998] wartość wskaźnika mrozoodporności była stosunkowo duża i wynosiła 0,99 już przy dodatku 3% spoiwa. Jednakże w tym przypadku norma PN-S-96011:1998 określa wymaganą liczbę cykli zamrażania-odmrażania, którą próbki przetrwają bez uszkodzeń. Wymogi te spełnia popioło-żużel stabilizowany wapnem [Zawisza i in. 2006].

Dużo gorsze wyniki osiągnięto przy stabilizacji popioło-żużla spoiwem Terramix F22.5. Wartości wskaźnika mrozoodporności były minimalne i wynosiły: 0, 0,04 i 0,083 przy dodatku spoiwa odpowiednio 3, 6 i 8%. Wskazuje to, że popioło-żużel stabilizowany nawet przy 8% dodatku spoiwa nie spełnia wymogów odnośnych norm.

Tabela 8. Wskaźnik mrozoodporności popioło-żużla na tle wymagań norm PN-S-96012:1997 i PN-S-96011:1998
 Table 8. Frost resistance index of ash-slag comparing to requirements of standards PN-S-96012:1997 and PN-S-96011:1998

| Dodatek stabilizatora Binder additive % | Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength MPa | | Wskaźnik mrozoodporności Frost resistance index | Wymagania norm – Requirements of standards: |
|---|--|--|---|---|
| | R_{28} | R_{28-z-o} | | |
| PN-S-96012:1997 (wskaźnik mrozoodporności – frost resistance index) | | | | |
| | Podbudowa zasadnicza Road base | Część górna ulepszanego podłoża Upper part of the improved subgrade | Część dolna ulepszanego podłoża Lower part of the improved subgrade | |
| Cement* | | | | |
| 3 | 1,06 | 0,74 | 0,70 | |
| 6 | 2,80 | 2,21 | 0,79 | 0,6 |
| 10 | 3,76 | 2,85 | 0,76 | |
| Terramix F22.5 | | | | |
| 3 | 0,30 | – | 0,00 | |
| 6 | 0,76 | 0,033 | 0,04 | – |
| 8 | 0,88 | 0,073 | 0,083 | |
| PN-S-96011:1998 (liczba cykli z-o – number of cycles z-o) | | | | |
| | Górna warstwa ulepszanego podłoża Upper part of the improved subgrade | Podbudowa pomocnicza dla dróg o ruchu bardzo lekkim Subbase for light traffic roads | Wstępne ulepszenie gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszanego podłoża Initial improvement of soils for further stabilisation or for lower layers of the improved subgrade | |
| Wapno – Lime* | | | | |
| 3 | 0,99 | 0,98 | 0,99 | |
| 6 | 1,88 | 1,14 | 0,61 | ≥ 3 |
| 10 | 1,94 | 1,07 | 0,55 | ≥ 5 |

* Zawisza i in. 2006

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności popioło-żuźła z Elektrociepłowni „Kraków” stabilizowanego spoiwami hydraulicznymi Terramix F22.5 lub SOLITEX oraz analiza porównawcza uzyskanych wyników z wynikami wcześniejszych badań stabilizacji tego materiału cementem lub wapnem pozwoliły na wyrowadzenie następujących wniosków:

1. Wytrzymałość na ściskanie popioło-żuźła stabilizowanego spoiwem Terramix F22.5 lub SOLITEX była zależna od jego procentowego dodatku oraz czasu pielęgnacji. Materiał ten stabilizowany spoiwem Terramix F22.5 wykazał mrozoodporność, natomiast stabilizowany spoiwem SOLITEX nie wykazał mrozoodporności. Odnosząc uzyskane wyniki do wymogów norm można stwierdzić, że:
 - popioło-żuźel z dodatkiem 3, 6 i 8% spoiwa Terramix F22.5 lub SOLITEX nie spełnia wymagań normy PN-S-96012:1997 dotyczących wytrzymałości na ściskanie ani wskaźnika mrozoodporności podbudowy zasadniczej lub pomocniczej nawierzchni drogowej oraz górnej części warstwy ulepszanego podłoża;
 - popioło-żuźel z dodatkiem 3% spoiwa Terramix F22.5 lub 3, 6 i 8% spoiwa SOLITEX nie spełnia wymogów normy PN-S-96011:1998 dotyczących wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności ani górnej warstwy ulepszanego podłoża drogi, ani podbudowy pomocniczej dróg o ruchu bardzo lekkim, ani do wstępnego ulepszenia gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszanego podłoża;
 - według tej samej normy popioło-żuźel z dodatkiem 6% spoiwa Terramix F22.5 spełnia wymogi dotyczące wytrzymałości na ściskanie oraz wskaźnika mrozoodporności górnej warstwy ulepszanego podłoża i wstępnego ulepszenia gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszanego podłoża;
 - według cytowanej normy popioło-żuźel z dodatkiem 8% spoiwa Terramix F22.5 spełnia wymogi zarówno do górnej warstwy ulepszanego podłoża, jak i podbudowy pomocniczej dróg o ruchu bardzo lekkim.
2. Najlepsze efekty stabilizacji popioło-żuźła uzyskano przy zastosowaniu cementu, mniej korzystne – wapna, znacznie gorsze – spoiwa Terramix F22.5, a najmniej korzystne – spoiwa SOLITEX.
3. Badany popioło-żuźel może stanowić alternatywę dla gruntów mineralnych jako materiał konstrukcyjny do szeroko rozumianego budownictwa ziemnego, w tym drogowego. W celu polepszenia jego właściwości mechanicznych i mrozoodporności należy stosować jego stabilizację przy użyciu cementu, wapna lub spoiwa Terramix F22.5. Dobór spoiwa i jego procentowy dodatek do popioło-żuźła należy ustalić na podstawie badań laboratoryjnych w zależności od celu zastosowania. Wykorzystanie popioło-żuźli w budownictwie ziemnym, w tym drogowym, ma istotne znaczenie gospodarcze, ponieważ przyczynia się do ograniczenia eksploatacji złóż nieodnawialnych gruntów naturalnych oraz ekologiczne, ponieważ skutkuje zmniejszeniem ilości odpadów kierowanych na składowiska.

PIŚMIENNICTWO

- Gmyrek, Ł., Peroński, M. (2005). Silment – alternatywa dla cementu w stabilizacji gruntów. *Magazyn Autostrady*, 1–2, 17–18.
- Kucowski, J., Laudyn, D., Przekwas, M. (1987). *Energetyka a ochrona środowiska*. WNT, Warszawa.
- Myślińska, E. (1998). *Laboratoryjne badania gruntów*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Pisarczyk, S. (2004). *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- PN-S-96012:1997. *Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-S-96011:1998. *Drogi samochodowe. Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Rolla, S. (2001). Ulepszanie gruntów wbudowywanych w nasyp. *Drogownictwo*, 8, 248–251.
- Wiłun, Z. (2000). *Zarys geotechniki*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Zawisza, E., Franczak, A. (2010). Wytrzymałość i mrozoodporność stabilizowanych popiołów lotnych. *Drogownictwo*, 6, 202–207.
- Zawisza, E., Gruchot, A., Michalski, P. (2006). Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie. *Inż. Morska i Geotechnika*, 27, 1, 22–30.
- Zawisza, E., Klęk, K. (2006). Stabilizacja popiołów spoiwami „Silment” w drogownictwie. *Drogownictwo*, 12, 396–400.
- Zawisza, E., Sobuła, K. (2007). Wytrzymałość i mrozoodporność popiołów lotnych z Elektrociepłowni „Kraków” stabilizowanych cementem lub wapnem. *XXX ZSMGiG – Geotechnika w budownictwie i górnictwie*. Szklarska Poręba. *Prace Nauk. Inst. Geotechniki i Hydrotechniki Polit. Wrocl.*, 76, Konferencje, 42, 665–676.

COMPRESSIVE STRENGTH AND FROST RESISTANCE OF ASH-SLAG STABILIZED WITH HYDRAULIC BINDERS

Abstract. The paper presents the results of investigation on stabilization of ash-slag from dumping site of “Kraków” Power Plant using hydraulic binders Terramix F22.5 or SOLITEX. Compressive strength of samples without and with addition of 3, 6 and 8% of binder after 7, 14, 28 and 42-days of samples maturing and after 28-days of freezing and thawing cycles were determined and on that basis the frost resistance index was calculated. The obtained tests results were compared with the results of the earlier tests of the material from the same dumping site stabilized with cement or lime. The analysis results were compared to the standard values and the usability of the stabilized ash-slag in road building was assessed.

Keywords: ash-slag, stabilization, compressive strength, frost resistance

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.03.2017

Do cytowań – For citation: Zawisza, E., Biśtyga, J., Kopczyński, M. (2017). Wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność popioło-żużla stabilizowanego spoiwami hydraulicznymi. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(1), 27–41.