

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE I ŚCINANIE PYŁU GRUBEGO STABILIZOWANEGO SPOIWEM TERRAMIX F22,5

Katarzyna Kamińska✉

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

### ABSTRAKT

#### Cel pracy

W pracy przedstawiono wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie, mrozoodporności oraz wytrzymałości na ścinanie stabilizowanego gruntu drobnopiękniowego w zależności od dodanego spoiwa hydraulicznego oraz czasu i sposobu pielęgnacji. Wyniki oznaczeń tych parametrów miały na celu sprawdzenie przydatności gruntu do stabilizacji.

#### Materiały i metody

Grunt stanowił pył gruby pobrany w miejscowości Boczkwice, w powiecie miechowskim, w województwie małopolskim. Stabilizatorem użytym do badań był Terramix F22,5, dodawany w ilości 3, 5 i 8% w stosunku do szkieletu suchej masy. Badanie wykonano na próbach bezpośrednio po stabilizacji, po 7 i 28 dobach pielęgnacji z wodą oraz po 7 i 28 dobach z zamrażaniem i odmrażaniem, a także bez dodatku stabilizatora. Próby przeprowadzono przy wskaźniku zagęszczenia  $I_s = 1,00$  i wilgotności optymalnej.

#### Wyniki i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że na poprawę parametrów geotechnicznych wpływa ilość zastosowanego spoiwa oraz długość i sposób pielęgnacji próbek. W największym stopniu na wytrzymałość na ściskanie miał wpływ rodzaj pielęgnacji. Zabezpieczenie gruntu stabilizowanego przed działaniem wody powoduje znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie od 50 do 60%. Wytrzymałość na ścinanie, a co za tym idzie, wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności pyłu grubego zależały od dodatku stabilizatora. Uzyskane parametry zwiększyły się wraz ze wzrostem dodatku spoiwa, i tak: dla 8% kąt tarcia wewnętrznego zwiększył się o  $11^\circ$ , natomiast kohezja o 29 kPa.

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość na ściskanie, mrozoodporność, wytrzymałość na ścinanie, stabilizacja gruntu, spoiwo hydrauliczne

### WSTĘP

W ostatnich latach budownictwo drogowe w Polsce rozwija się bardzo dynamicznie. Nacisk na rozwój infrastruktury technicznej zmusza inwestorów i wykonawców do poszukiwania nowych rozwiązań, które usprawnią etap technologiczny oraz pozwolą

udoskonalic uzyskiwane rezultaty. Stosowanie nowoczesnych technologii wiąże się z budową trwałych i bezpiecznych dróg, gdzie tak samo jak parametry nawierzchni drogowych ważne są parametry jej podbudowy. Badania geotechniczne podłoża gruntowego są istotnym elementem każdego procesu projektowania i realizacji inwestycji budowlanej (Zawisza,

✉ e-mail: [katarzyna.kaminska@urk.edu.pl](mailto:katarzyna.kaminska@urk.edu.pl)

2001; Pisarczyk, 2004; Gruchot, 2010; Zawisza i in., 2017). W wielu przypadkach budowle drogowe muszą być posadowione na terenach o niekorzystnej budowie geologicznej i skomplikowanych warunkach geotechnicznych oraz w miejscach występowania gruntów słabonośnych (Zalewski, 2007; Paprocki i in., 2016).

Grunty słabonośne to rodzime osady organiczne, spoiste w stanie miękkoplastycznym, niespoiste w stanie luźnym oraz nasypy antropogeniczne (Nasiri i in., 2021; Onyelowe i in., 2021; Munirwan i in., 2022). Podłoża, w których występują takie grunty, wymagają odpowiedniego wzmocnienia, aby zbudować na nich właściwą konstrukcję drogi (Mieloszyk i in., 2022). Najczęściej stosowane rozwiązania w takich przypadkach to m.in. wymiana gruntu, wzmocnienie podłoża warstwą kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie lub wzmocnienie podłoża geosyntetykami (Bzówka, 2015). Metody te są jednak bardzo kosztowne, zwiększają zakres robót ziemnych, a co za tym idzie i czas realizacji inwestycji. Rozwiązania te wymagają dostarczenia i wbudowania nowego dobrego materiału, którego coraz częściej brakuje, natomiast grunt rodzimy staje się odpadem. Metodą, która umożliwia wykorzystanie gruntu rodzimego w takich przypadkach, jest stabilizacja i ulepszanie podłoża spoiwami hydraulicznymi (Latifi i in., 2017; Rahgozar i in., 2018; Sabzi, 2018).

Stabilizacja spoiwami hydraulicznymi, takimi jak cement, wapno lub popioły lotne, jest znana od wielu lat, jednak coraz popularniejsza staje się stabilizacja gruntów specjalistycznymi spoiwami, których na rynku pojawia się coraz więcej (Zawisza i in., 2006; Jawad i in., 2014; Hassan i in., 2021; Zahraalsadat i in., 2021). Spoiwa hydrauliczne umożliwiają realizację robót bezpośrednio na miejscu inwestycji, co usprawnia cały proces technologiczny. Wykonywanie robót ziemnych z użyciem spoiw hydraulicznych pozwala na ich realizację w trudnych warunkach atmosferycznych. Wszystkie te czynniki powodują minimalizację kosztów realizacji inwestycji, co w dzisiejszych czasach ma bardzo duże znaczenie dla inwestorów i wykonawców (Atahu i in., 2019; Ahmadi i in., 2020). Wykorzystywane są głównie w budownictwie drogowym do ulepszenia i stabilizacji gruntów słabonośnych (Rosales i in., 2020). Stosuje się je w celu poprawy nośności i zagęszczenia, zwiększenia wy-

trzymałości na ściskanie i odporność na działanie wody i mrozu oraz osuszania i ogólnej poprawy parametrów gruntu.

Celem pracy było określenie wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności oraz określenie zmian wytrzymałości na ścinanie drobnoziarnistego gruntu mineralnego w zależności od ilości dodanego spoiwa hydraulicznego oraz czasu i sposobu pielęgnacji próbek. Grunt do badań stanowił pył gruby pobrany w miejscowości Boczkowice w województwie małopolskim. W badaniach wykorzystano spoiwo hydrauliczne Terramix F22,5 a jego ilość wynosiła 3, 5 i 8% w stosunku do suchej masy szkieletu (PN-S-96012:1997). Badania wykonano na próbach bezpośrednio po ich uformowaniu oraz po 7 i 28 dobach pielęgnacji. Próbkę formowano przy wilgotności optymalnej do uzyskania zagęszczenia odpowiadającego wskaźnikowi zagęszczenia  $I_s = 1,00$ .

## MATERIAŁY I METODY

Skład uziarnienia oznaczono metodą łączoną, czyli z wykorzystaniem analizy sitowej dla ziaren większych od 0,063 mm oraz areometrycznej dla pozostałych wymiarów ziaren (PN-EN ISO 14668-2:2018). Gęstość właściwą szkieletu oznaczono metodą kolby miarowej w wodzie destylowanej (PN-B-04481:1981). Parametry zagęszczalności oznaczono w aparacie Proctora, w cylindrze o objętości 1,0 dm<sup>3</sup> przy energii zagęszczania 0,59 J · cm<sup>-3</sup> (PN-B-04481:1981). Granicę płynności oznaczono w aparacie Casagrande'a, a granicę plastyczności metodą wałeczkania (PN-EN ISO 17892-12:2018).

Wytrzymałość na ściskanie oznaczono za pomocą prasy Tritech 50, a wskaźnik mrozoodporności z wykorzystaniem komory mrozeniowej (PN-S-96012:1997). Próbkę do badań o wysokości i średnicy 8 cm formowano w aparacie Proctora przy wilgotności optymalnej i standardowej energii zagęszczania  $E_z = 0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Proces zagęszczania wykonano zgodnie z procedurą określoną w normie PN-B-04481:1981. Każdą próbkę bezpośrednio po uformowaniu zważono, zmierzono i oznakowano, następnie próbki poddano pielęgnacji powietrznej lub powietrzno-wodnej (tab. 1). Wilgotność gruntu lub mieszanki gruntu ze spoiwem wahała się od 14,5 do 19,2%, a wskaźnik zagęszczenia od  $I_s = 0,98$  do 1,00. Przygotowano po cztery próbki dla

**Tabela 1.** Charakterystyka pielęgnacji próbek pyłu grubego oraz jego mieszanek ze spoiwem Terramix F 22,5  
**Table 1.** Characteristics of curing of coarse silt samples and its mixtures with the Terramix F 22.5 binder

Długość pielęgnacji próbek [doby] Length of sample curing [days]	Dodatek Terramixu F22,5 [%] Binder Terramix F22,5 content [%]	Pielęgnacja próbek Samples maturing	Rodzaj badania: Type of test:		
			wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	wskaźnik mrozoodporności Frost resistance index	wytrzymałość na ścinanie Shear strength
0	0	Brak pielęgnacji. Probki ściskane/ścianane bezpośrednio po uformowaniu. No curing. Samples compressed/sheared immediately after forming.	+	-	+
	3				
	5				
	8				
7	3	Pielęgnacja powietrzno-wodna. Probki przez 3 doby w temperaturze pokojowej zabezpieczone przed wysychaniem, 1 dzień zanurzenie w wodzie na 1 cm, 3 dni całkowite zanurzenie w wodzie. Air-water curing. Samples stored for 3 days at room temperature and protected from drying out, 1 day immersion in water for 1 cm, 3 days complete immersion in water.	+	-	+
	5				
	8				
28	3	Pielęgnacja powietrzno-wodna. Probki przez 14 dob w temperaturze pokojowej – zabezpieczone przed wysychaniem, 14 dob całkowite zanurzenie w wodzie. Air-water curing. Samples stored for 14 days at room temperature – protected against drying, 14 days total immersion in water.	+	-	+
	5				
	8				
7ZO	3	Pielęgnacja powietrzno-wodna z cyklami zamrażanie–odmrażanie. Probki przez 3 doby w temperaturze pokojowej zabezpieczone przed wysychaniem, 1 dobę zanurzone w wodzie na 1 cm, 3 doby z cyklami zamrażania–odmrażania. Air-water curing with freezing-defrosting cycles. Samples stored for 3 days at room temperature and protected from drying, 1 day immersed in water at 1 cm, 3 days with freeze-thaw cycles.	-	+	+
	5				
	8				
28ZO	3	Pielęgnacja powietrzno-wodna z cyklami zamrażanie–odmrażanie. Probki przez 13 dob temperaturze pokojowej zabezpieczone przed wysychaniem, 1 dobę zanurzone całkowicie w wodzie, 14 dob z cyklami zamrażania–odmrażania. Air-water curing with freeze-defrost cycles. Samples stored for 13 days at room temperature protected from drying out, 1 day completely immersed in water, 14 days with freeze-thaw cycles.	-	+	+
	5				
	8				
7S	3	Pielęgnacja powietrzna. Probki przez 7 dob zabezpieczone przed wysychaniem. Air curing. Samples are protected from drying out for 7 days.	+	-	-
	5				
	8				
28S	3	Pielęgnacja powietrzna. Probki przez 28 dob zabezpieczone przed wysychaniem. Air curing. Samples are protected against drying out for 28 days.	+	-	-
	5				
	8				

każdego dodatku spoiwa, dla każdego czasu pielęgnacji oraz cztery próbki pyłu grubego bez dodatku spoiwa. Wytrzymałość na ściskanie określono po 7 i 28 dobach pielęgnacji powietrzno-wodnej zgodnie z wymaganiami (PN-S-96012:1997) oraz po 7 i 28 dobach pielęgnacji powietrznej. Próbki bez dodatku spoiwa badano bezpośrednio po ich uformowaniu. Pielęgnacja ta trwała 7 i 28 dób, a próbki przez cały ten okres były zabezpieczone przed wysychaniem (tab. 1). Wytrzymałość na ściskanie określono przy prędkości ściskania  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , a badanie realizowano do zniszczenia próbki, czyli do uzyskania maksymalnej siły ścisakącej.

Wskaźnik mrozoodporności określono zgodnie z normą (PN-S-96012:1997). Próbki do badań formowano w taki sam sposób jak próbki do badań wytrzymałości na ściskanie. Sporządzono po cztery próbki mieszanki gruntu ze spoiwem w ilości 3, 5 i 8%, dla 7- i 28-dobowego czasu pielęgnacji (tab. 1). Łącznie przygotowano 24 próbki, których wilgotność wahała się od 16,4% do 18,6%, a wskaźnik zagęszczenia od  $I_s = 0,99$  do 1,01. W trakcie 28-dobowej pielęgnacji próbek przez 13 dób przechowywano je temperaturze pokojowej zabezpieczone przed wysychaniem, po czym na dobę zanurzono całkowicie w wodzie, a następnie przez kolejne 14 dób poddawano cykлом zamrażania i odmrażania. Próbki, których czas pielęgnacji wynosił siedem dób, były zabezpieczone przed

wysychaniem przez trzy doby, po czym zanurzono je w wodzie na jedną dobę, a następnie były poddawane cykлом zamrażania i odmrażania przez trzy doby. Jeden cykl zamrażania i odmrażania polega na 8-godzinnym zamrażaniu próbek w temperaturze  $-23^\circ\text{C}$  i 16-godzinnym ich odmrażaniu w wodzie w temperaturze pokojowej.

Badanie wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania AB-2a na próbkach o wymiarach  $6 \times 6 \times 1,9 \text{ cm}$ , które konsolidowano i ścinano przy obciążeniach równych 50, 100, 150, 200 i 250 kPa. Czas konsolidacji wynosił 15 minut, a prędkość ścinania  $0,2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Ścinanie prowadzono do momentu uzyskania odkształcenia poziomego próbki wynoszącego 15%. Badanie przeprowadzono dla pyłu grubego bez i z dodatkiem stabilizatora Terramix F 22,5 w ilości 3, 5 i 8%. Próbki z dodatkiem spoiwa ścinano bezpośrednio po zagęszczaniu oraz po 7- i 28-dobowym czasie pielęgnacji powietrzno-wodnej (tab. 1).

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

### Właściwości geotechniczne

Na podstawie uziarnienia sklasyfikowano badany grunt jako pył gruby CSi (tab. 2). W gruncie dominowała frakcja pyłowa, której było 89%, frakcji ilowej i piaskowej było odpowiednio nieco ponad 7% i blisko 4%. Gęstość właściwa wyniosła  $2,67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

**Tabela 2.** Właściwości fizyczne pyłu grubego  
**Table 2.** Physical properties of coarse silt

Parametr – Parameter	Symbol – Symbol	Jednostka – Unit	Wartość – Value
Zawartość frakcji – Fraction content:			
– żwirowej – gravel 2 – 63 mm	Gr		0,00
– piaskowej – sand 0,063 – 2 mm	Sa	%	3,80
– pyłowej – silt 0,002 – 0,063 mm	Si		88,92
– ilowej – clay < 0,002 mm	Cl		7,28
Nazwa wg – Name acc. to: PN-EN ISO 14668-2:2018	CSi	–	Pył gruby
Gęstość właściwa – Density of solid particles	$\rho_s$	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,67
Granica płynności – Liquidity limit	$W_L$		26,55
Granica plastyczności – Plastic limit	$W_p$	%	19,19
Wskaźnik plastyczności – Plasticity index	$I_p$		7,36

Granica plastyczności wynosiła 19,19%, a płynności 26,55% przy wskaźniku plastyczności  $I_p = 7,36\%$ .

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu pyłu grubego wynosiła  $1,76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  przy wilgotności optymalnej 14,10% (tab. 3). Mieszanki gruntu ze spoiwem Terramix F22,5 cechowały się nieznacznym zwiększeniem wilgotności optymalnej wraz ze zwiększeniem dodatku spoiwa od 3 do 8%. W przypadku maksymalnej gęstości szkieletu badanych mieszanek zwiększenie dodatku spoiwa Terramix F22,5 spowodowało jej zmniejszenie.

### Wytrzymałość na ściskanie

Analizę wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w odniesieniu do procentowego dodatku spoiwa do gruntu, a także od czasu i rodzaju pielęgnacji gruntu. W trakcie badania wytrzymałości na ściskanie próbki ulegały stopniowemu zniszczeniu, początkowo pojawiały się niewielkie spękania na powierzchniach bocznych próbek, które powiększały się wraz ze wzrostem obciążenia.

Wytrzymałość na ściskanie, określona bezpośrednio po uformowaniu próbek, zmniejszyła się wraz ze wzrostem ilości zastosowanego spoiwa. Największą wytrzymałość na ściskanie, wynoszącą 0,15 MPa, uzyskano dla gruntu bez dodatku spoiwa (ryc. 1). Natomiast najmniejszą wytrzymałością na ściskanie cechował się grunt z 8% dodatkiem spoiwa, która wynosiła 0,11 MPa. Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie spowodowane było zwiększeniem wilgotności optymalnej w wyniku dodatku spoiwa.

W przypadku 7-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej próbki gruntu z 3% dodatkiem spoiwa Terramix F22,5 uległy zniszczeniu. Próbki po zanurzeniu w wodzie w czwartej dobie pielęgnacji zaczęły się stopniowo rozpadać w czasie od jednej do kilku godzin. Natomiast dodatek spoiwa od 5 do 8% spowodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie o 0,31 MPa (ryc. 1). Wydłużenie czasu pielęgnacji do 28 dób spowodowało, że próbki gruntu z 3% dodatkiem spoiwa zaczęły się również rozpadać, ale dopiero w trzeciej dobie pielęgnacji wodnej. Próbki ulegały stopniowemu zniszczeniu, a w szóstym dniu uległy całkowitemu rozpadowi. Wytrzymałość na ściskanie określona po 28 dobach pielęgnacji powietrzno-wodnej próbek gruntu z dodatkiem 5 i 8% zwiększyła się o 0,35 MPa wraz ze wzrostem dodatku spoiwa (ryc. 1).

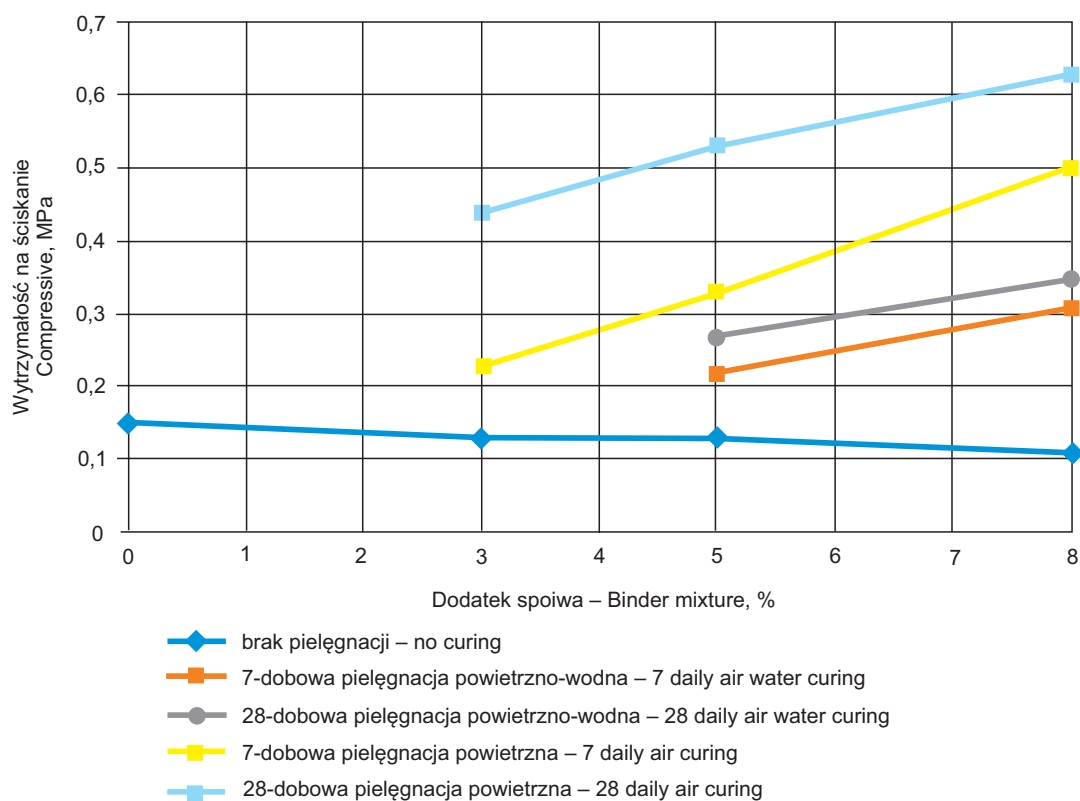
Próbki gruntu poddane pielęgnacji powietrznej wykazały największą wytrzymałość na ściskanie, która wraz z wydłużeniem czasu pielęgnacji zwiększyła się (ryc. 1). Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie zależy od procentowego dodatku spoiwa do gruntu. Czas pielęgnacji miał nieznaczący wpływ na poprawę wytrzymałości na ściskanie. W przypadku pielęgnacji powietrznej wytrzymałość na ściskanie była znacznie większa w stosunku do próbek poddanych pielęgnacji powietrzno-wodnej.

W celu określenia przydatności badanego pyłu grubego z dodatkiem spoiwa Terramix F22,5 do celów budownictwa drogowego otrzymane wyni-

**Tabela 3.** Parametry zagęszczalności pyłu grubego oraz jego mieszanek ze spoiwem Terramix F22,5

**Table 3.** Compaction parameters of coarse silt and its mixture with binder Terramix F22,5

Parametr – Parameter	Pył gruby – coarse silt	Wartość dla – Value for		
		Pył gruby z 3% dodatkiem Terramix 22,5 Coarse silt with 3% Terramix 22,5	Pył gruby z 5% dodatkiem Terramix 22,5 Coarse silt with 5% Terramix 22,5	Pył gruby z 8% dodatkiem Terramix 22,5 Coarse silt with 8% Terramix 22,5
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu – Maximum dry density, $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	1,76	1,71	1,68	1,65
Wilgotność optymalna – optimum moisture content, [%]	14,10	16,75	17,00	18,20



**Ryc. 1.** Zależność wytrzymałości na ściskanie od dodatku spoiwa Terramix F22,5 dla przyjętych czasów pielęgnacji pyłu grubego oraz jego mieszanek ze spoiwem

**Fig. 1.** Compressive strength of coarse silt versus Terramix F22,5 content and curing method

ki badań porównano z wartościami wymaganymi dla gruntów stabilizowanych cementem (PN-S-96012:1997). Stwierdzono, że uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie pyłu grubego z dodatkiem spoiwa Terramix F22,5 nie spełniają wymagań dotyczących cementu, niezależnie od dodatku spoiwa i długości czasu pielęgnacji (tab. 4). Natomiast w porównaniu z normą dla wapna PN-S-96011:1998, parametry wytrzymałości na ściskanie spełniają warunki dla prób po 7-dobowej pielęgnacji przy wyższych zawartościach Terramixu (5% i 8%) dla dolnej warstwy podbudowy (tab. 5).

Badaniami wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności gruntu pylastego z dodatkiem spoiwa hydraulicznego w postaci cementu oraz silmentu zajmowali się również Zawisza i Gruchot (2008). W swoich badaniach wykazali polepszenie właściwości mechanicznych gruntu pylastego; wytrzymałość na ściskanie

stabilizowanego pyłu była stosunkowo duża. Grunt pylasty z dodatkiem spoiwa wykazywał wrażliwość na oddziaływanie temperatur ujemnych. Dlatego, chcąc go stosować do celów budownictwa ziemnego, np. na warstwy uszczelniające, należy wbudowywać go poniżej głębokości przemarzania. Dodatek spoiwa w postaci cementu i silmentu nie zwiększyła jego mrozoodporności w stopniu wymaganym dla potrzeb budownictwa drogowego (Zawisza i Gruchot, 2008). Do gruntów pylastych jako dodatek stabilizujący można również stosować popioły lotne (Gruchot i Zawisza, 2018). Przeprowadzone badania wytrzymałości na ścinanie pyłu grubego z iłem z dodatkiem popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego z Elektrowni „Połaniec” w ilości 10 i 40% wykazały, że wraz ze wzrostem dodatku popiołu uzyskano zwiększenie parametrów wytrzymałościowych w stosunku do pyłu grubego ilastego.

**Tabela 4.** Zestawienie uśrednionych wartości wytrzymałości na ściskanie pyłu grubego stabilizowanego Terramixem F22,5 na tle wymagań normy PN-S-96012:1997

**Table 4.** Comparison of average values of compressive strength of coarse silt stabilized with Terramix F22.5 against the requirements of the Polish standard PN-S-96012:1997

Czas pielęgnacji Time of curing	Wytrzymałość na ściskanie próbek nasyconych wodą Compressive strength [MPa]			Wytrzymałość na ściskanie pyłu grubego stabilizowanego spoiwem Terramix F22,5 Compressive strength cores silt stabilized of Terramix F 22.5 binder	
	Podbudowa zasadnicza nawierzchni drogowej Road base or subbase	Górna część warstwy ulepszonego podłoża gruntowego Upper part of the improved subgrade	Dolna część warstwy podbudowy ulepszonego podłoża gruntowego Lower part of the improved subgrade	7/3%	–
R <sub>7</sub>	od 1,6 do 2,2	od 1,0 do 1,6	–	7/5%	0,22
				7/8%	0,31
R <sub>28</sub>	od 2,5 do 5,0	od 1,5 do 2,5	od 0,5 do 1,5	28/3%	–
				28/5%	0,27
				28/8%	0,35

**Tabela 5.** Zestawienie uśrednionych wartości wytrzymałości na ściskanie pyłu grubego stabilizowanego spoiwem Terramix F22,5 na tle wymagań normy PN-S-96011:1998

**Table 5.** Compressive strength of coarse silt stabilized with Terramix F22,5 binder in relation to requirements of the PN-S-96011:1998 standards

Czas pielęgnacji Time of curing	Wytrzymałość na ściskanie próbek nasyconych wodą Compressive strength [MPa]			Wytrzymałość na ściskanie pyłu grubego stabilizowanego spoiwem Terramix F22,5 Compressive strength cores silt stabilized of Terramix F 22.5 binder	
	Górna warstwa ulepszonego podłoża drogi Upper part of the improved subgrade	Podbudowa pomocnicza dla dróg o ruchu bardzo lekkim Auxiliary foundation for roads with very light traffic	Wstępne ulepszenie gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszonego podłoża Initial improvement of soils intended for further stabilization or for lower layers of the improved subgrade	7/3%	–
R <sub>7</sub>	≥ 0,3	≥ 0,5	≥ 0,2	7/5%	0,22
				7/8%	0,31
R <sub>28</sub>	≥ 0,4	≥ 0,7	–	28/3%	–
				28/5%	0,27
				28/8%	0,35

### Wytrzymałość na ścinanie

Wytrzymałość na ścinanie pyłu grubego z dodatkiem spoiwa w istotnym stopniu zależała od dodatku spoiwa i czasu trwania i rodzaju pielęgnacji próbek.

Wytrzymałość na ścinanie prób poddanych ścięciu bezpośrednio po uformowaniu zwiększyła się w niewielkim stopniu wraz z dodatkiem spoiwa od 0 do 8% (tab. 6, ryc. 2 a). Przykładowo dla naprężeń normalnych wynoszących 50 kPa wytrzymałość zwiększyła się o nieco ponad 2 kPa i wynosiła ponad 48 kPa bez dodatku spoiwa i blisko 51 kPa przy 8% dodatku spoiwa Terramix F22,5. Natomiast dla naprężeń normalnych wynoszących 250 kPa nastąpił wzrost wytrzymałości na ścinanie od 171 kPa dla prób z dodatkiem spoiwa 5% do 182 kPa dla prób bez dodatku.

W przypadku próbek poddanych 7- i 28-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej stwierdzono znacznie większe zwiększenie wytrzymałości na ścinanie wraz ze wzrostem dodatku spoiwa (ryc. 2 b, c). Przykładowo dla prób ścinanych przy naprężeniu wynoszącym 50 kPa i pielęgnacji 7-dobowej wytrzymałość na ścinanie zwiększyła się od 44 do 79 kPa. Natomiast dla

prób po 28-dobowej pielęgnacji wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się od 53 do 95 kPa. Przy naprężeniach normalnych równych 250 kPa nastąpił znaczny wzrost wytrzymałości na ścinanie zależny od ilości dodanego spoiwa (tab. 6). I tak dla prób po 7-dobowej pielęgnacji od 169 kPa dla 3% dodatku spoiwa do 261 kPa dla 8% dodatku. Podobnie zależności wystąpiły przy 28-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej, największą wartość wytrzymałości uzyskano dla próby z 8% dodatkiem spoiwa.

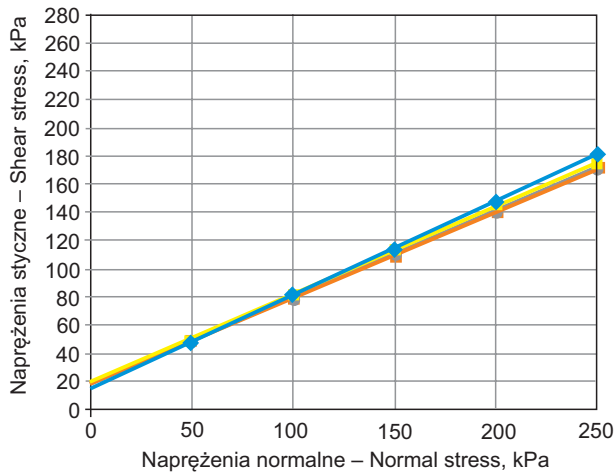
W przypadku prób poddanych cyklem zamrażania–odmrażania wytrzymałość na ściskanie również zwiększyła się wraz ze wzrostem dodatku spoiwa (ryc. 2 d, e). Dla próbek ścinanych przy naprężeniach normalnych wynoszących 50 kPa i poddanych 3 cyklom zamrażania–odmrażania wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się od 34 do 63 kPa. Dla próbek poddanych 14 cyklom zamrażania–odmrażania i takiemu samemu naprężeniu normalnemu wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się od 35 do 59 kPa. Wzrost naprężeń normalnych spowodował zwiększenie wytrzymałości na ścinanie, zwłaszcza wyraźny jest wpływ dodatku spoiwa.

**Tabela 6.** Wytrzymałość na ścinanie pyłu grubego bez i z dodatkiem spoiwa Terramix F 22,5

**Table 6.** Shear strength of coarse silt without and with the addition of Terramix F 22.5 binder

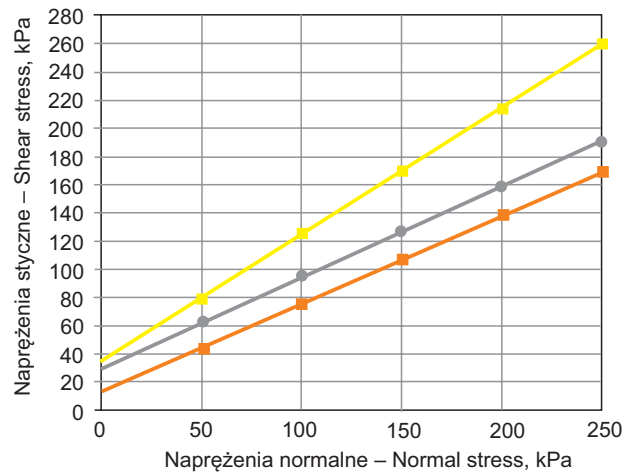
Czas pielęgnacji Time of curing	Dodatek spoiwa Binder content [%]	Wytrzymałość na ścinanie $\tau_f$ [kPa] przy naprężeniach normalnych $\sigma_n$ [kPa] Shear strength $\tau_f$ [kPa] at normal stresses $\sigma_n$ [kPa]				
		50	100	150	200	250
0	0	48,41	81,81	115,20	148,59	181,98
	3	49,06	79,55	110,04	140,53	171,02
	5	49,43	80,27	111,11	141,95	172,80
	8	50,94	82,07	113,20	144,32	175,45
7	3	44,24	75,51	106,77	138,04	169,30
	5	62,32	94,75	127,17	159,59	192,01
	8	79,14	124,55	169,95	215,36	260,77
28	3	53,19	85,29	117,39	149,49	181,59
	5	85,19	123,01	160,82	198,63	236,44
	8	94,55	140,33	186,11	231,88	277,66
7ZO	3	36,47	66,28	96,08	125,88	155,69
	5	50,97	81,23	111,48	141,73	171,98
	8	63,11	100,28	137,44	174,61	211,77
28ZO	3	34,93	63,34	–	120,16	148,67
	5	49,58	79,37	109,16	138,95	168,74
	8	58,33	91,58	124,83	158,08	191,33





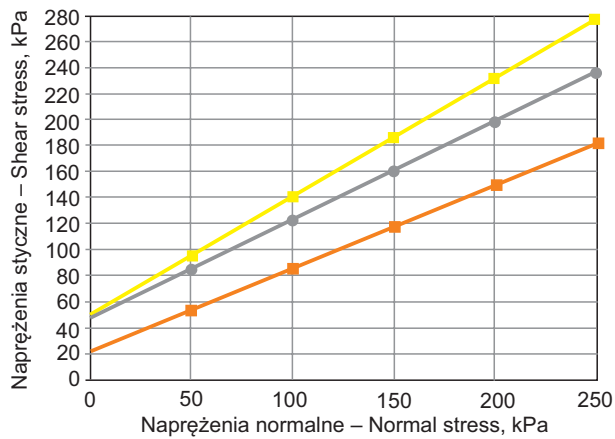
- ◆ pył gruby – coarse silt
- pył z dodatkiem 3% stabilizatora – silt with 3% of binder
- pył z 5% dodatkiem stabilizatora – silt with 5% of binder
- ▲ pył z 8% dodatkiem stabilizatora – silt with 8% of binder

a) brak pielęgnacji – without of curing (control samples)



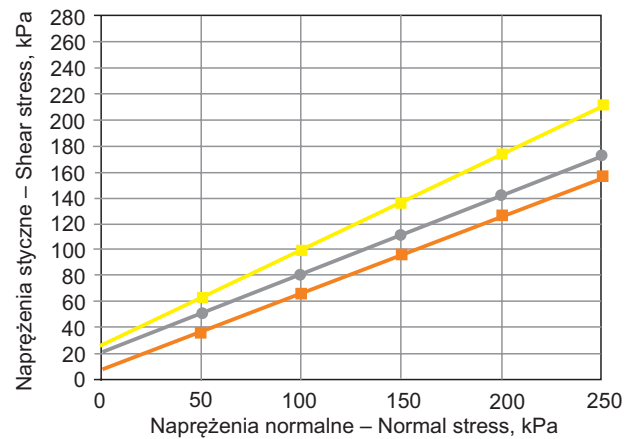
- pył z 3% dodatkiem stabilizatora – silt with 3% of binder
- pył z 5% dodatkiem stabilizatora – silt with 5% of binder
- ▲ pył z 8% dodatkiem stabilizatora – silt with 8% of binder

b) 7-dobowa pielęgnacja powietrzno-wodna  
7 daily air and water curing



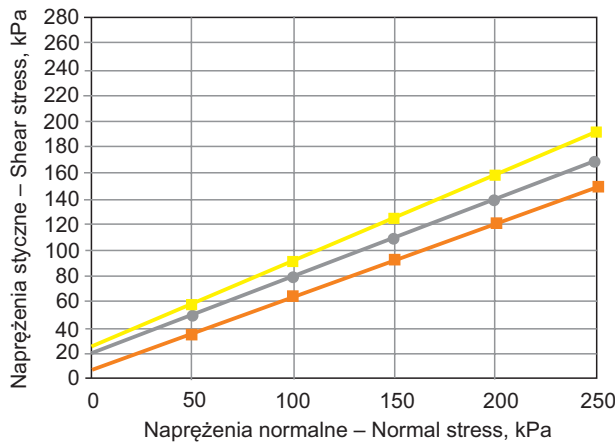
- pył z 3% dodatkiem stabilizatora – silt with 3% of binder
- pył z 5% dodatkiem stabilizatora – silt with 5% of binder
- ▲ pył z 8% dodatkiem stabilizatora – silt with 8% of binder

c) 28-dobowa pielęgnacja powietrzno-wodna  
28 daily air and water curing



- pył z 3% dodatkiem stabilizatora – silt with 3% of binder
- pył z 5% dodatkiem stabilizatora – silt with 5% of binder
- ▲ pył z 8% dodatkiem stabilizatora – silt with 8% of binder

d) 7-dobowa pielęgnacja powietrzno-wodna z cyklami  
zamrażania–odmrażania – 7 daily air and water curing  
including freezing–thawing cycles



- pył z 3% dodatkiem stabilizatora – silt with 3% of binder
- pył z 5% dodatkiem stabilizatora – silt with 5% of binder
- ▲ pył z 8% dodatkiem stabilizatora – silt with 8% of binder

e) 28-dobowa pielęgnacja powietrzno-wodna z cyklami  
zamrażania–odmrażania – 28 daily air and water curing  
including freezing–thawing cycles

**Ryc. 2.** Zależność naprężeń ścinających od naprężeń normalnych w badaniach bez i z dodatkiem spoiwa Terramix F22,5 do pyłu grubego

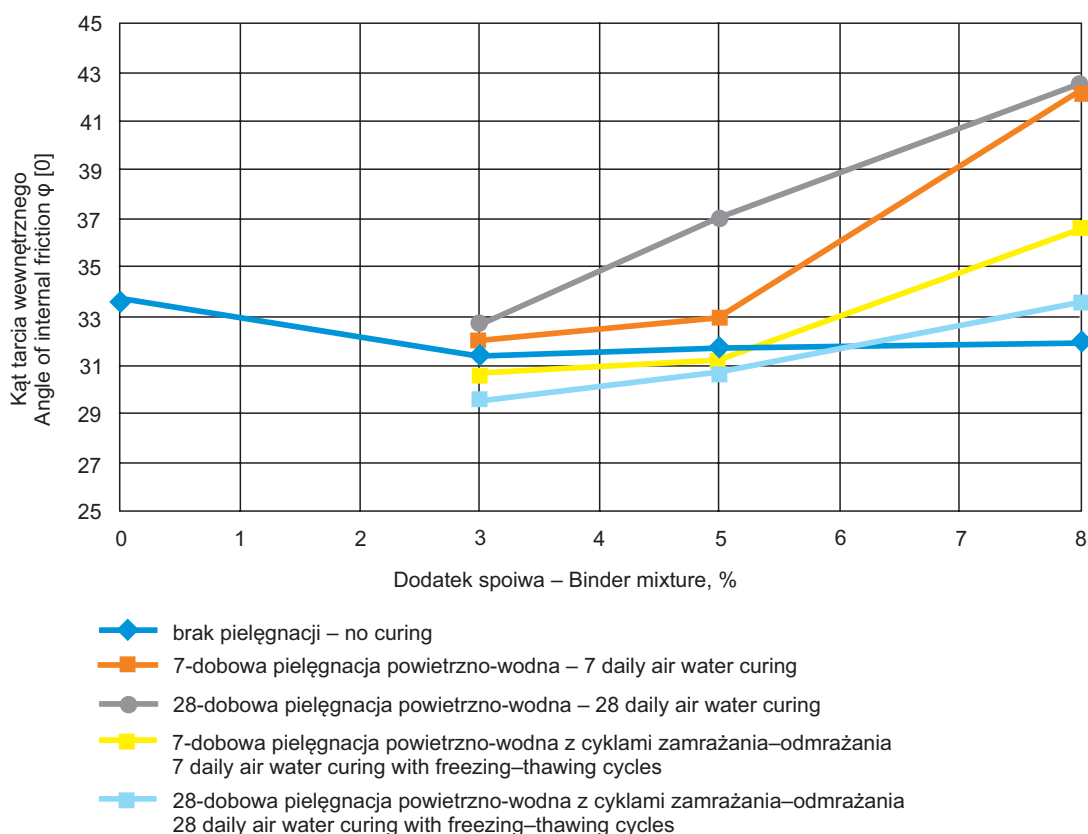
**Fig. 2.** Relationship between shear stresses and normal stresses in tests without and with the addition of Terramix F22.5 binder to coarse silt

Wartość kąta tarcia wewnętrznego w badaniach próbek pyłu grubego bez dodatku spoiwa bezpośrednio po ich zagęszczeniu wynosiła 34,0° i była wyższa w stosunku do próbek pyłu grubego z dodatkiem spoiwa, którego średnia wartość wynosiła 32° (ryc.3). Spójność pyłu grubego wynosiła 15,0 kPa i zwiększyła się od 4 do 5 kPa wraz ze wzrostem dodatku spoiwa (ryc. 4).

W przypadku próbek poddanych 7-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej zarówno kąt tarcia wewnętrznego, jak i spójność zwiększyła się wraz ze wzrostem dodatku spoiwa. Kąt tarcia wewnętrznego zwiększył się od 32 do 42°, natomiast spójność od 13 do 34 kPa. Najbardziej zauważalne zwiększenie wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie stwierdzono dla próbek poddanych 28-dobowej pielęgnacji. Kąt tarcia wewnętrznego dla 3% dodatku spoiwa wy-

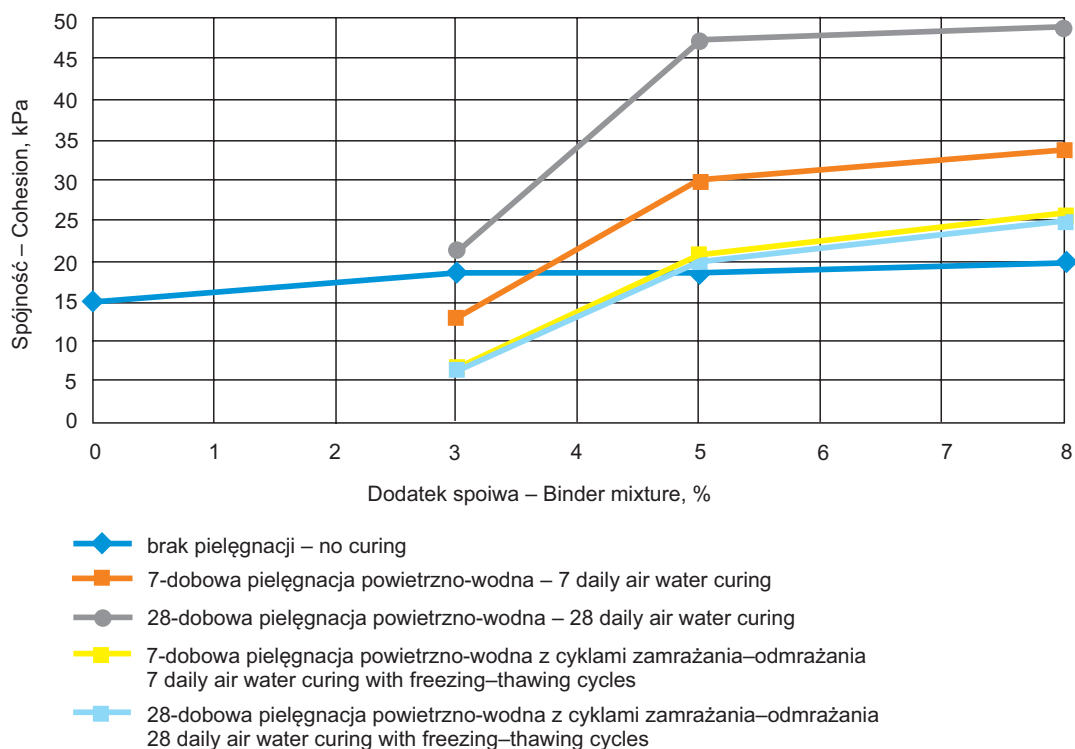
nosił 33,0°, a dla 8% dodatku – 43,0°. Wartości spójności zwiększyły się od 21 do 49 kPa. W przypadku próbek poddanych 7-dobowej pielęgnacji z czterema cyklami zamrażania–odmrażania zwiększyły się wraz ze wzrostem dodatku spoiwa. Kąt tarcia wewnętrznego zwiększył się od 31 do 37°, natomiast spójność od 7 do 26 kPa odpowiednio ze wzrostem dodatku spoiwa od 3 do 8%. Dla próbek poddanych 14 cyklom zamrażania–odmrażania kąt tarcia wewnętrznego zwiększył się od 30 do 34°, a spójność od 6 do 25 kPa.

Uzyskane wyniki badań pozwalają zauważyć, że w przypadku próbek poddanych 7- i 28-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej wytrzymałość na ścinanie zwiększyła się wraz z wydłużeniem czasu pielęgnacji. Natomiast dla próbek poddanych cyklem zamrażania–odmrażania parametry wytrzymałości na ścinanie zmniejszyły się wraz z wydłużeniem czasu pielęgnacji.



**Ryc. 3.** Zależność kąta tarcia wewnętrznego od dodatku spoiwa i sposobu pielęgnacji próbek

**Fig. 3.** Angle of internal friction values vs. binder content and method of samples curing



**Ryc. 4.** Zależność spójności od dodatku spoiwa oraz sposobu pielęgnacji próbek  
**Fig. 4.** Cohesion values vs. binder content and method of samples curing

### Wskaźnik mrozoodporności

Określenie wskaźnika mrozoodporności nie powiodło się, ponieważ wszystkie próbki przygotowane do badań uległy zniszczeniu w czasie pielęgnacji. W tabeli 7 przedstawiono opis przebiegu pielęgnacji próbek przygotowanych do badań wskaźnika mrozoodporności.

Gruchot (2010) przeprowadził badania wpływu dodatku cementu i wapna na wytrzymałość na ścislenie oraz mrozoodporność mieszaniny popiołowo-żuźlowej pobranej z osadnika Elektrowni „Skawina”, która pod względem geotechnicznym odpowiadała pyłom grubym. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdził, że wartości wytrzymałości na ścislenie i wskaźnika mrozoodporności mieszaniny popiołowo-żuźlowej stabilizowanej cementem i wapnem spełniają wymagania w zakresie norm dotyczące ich stosowania do celów budownictwa drogowego przy maksymalnym zastosowanym dodatku spoiwa. Natomiast Munirwem i in. (2022) przeprowadzili badania

wytrzymałości gruntu gliniastego stabilizowanego popiołem ze spalania łusek kawy (CHA). Stwierdził, że popiół CHA poprawia wytrzymałość gliny, na skutek procesów pucolanowych i hydratacji, które wypełniły puste przestrzenie w gruncie i wiążą ze sobą cząstki.

Prezentowane wyniki badań wskazują, że należy kontynuować badania z zastosowaniem innych spoiw hydraulicznych, które pozwalają uzyskać pozytywne efekty zarówno w odniesieniu do wytrzymałości na ścislenie, jak i mrozoodporności.

W przypadku omawianych wyników badań wskaźnik mrozoodporności obliczono na podstawie wyników badań wytrzymałości na ścinanie próbek poddanych pielęgnacji 28-dobowej zgodnie z (PN-S-96012:1997). Wskaźnik mrozoodporności obliczono jako stosunek wytrzymałości na ścinanie próbek podanych cyklem zamrażania–odmrażania ( $28^{ZO}$ ) do wytrzymałości na ścinanie próbek poddanych 28-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej (tab. 8).

**Tabela 7.** Przebieg pielęgnacji próbek pyłu grubego z dodatkiem spoiwa w badaniach wskaźnika mrozoodporności  
**Table 7.** The course of curing of coarse silt samples with binder addition in frost resistance index tests

Czas pielęgnacji Time of curing	Dodatek stabilizatora Binder content [%]	Przebieg pielęgnacji próbek – Samples care course
7	3	Próbki po zanurzeniu w wodzie stopniowo rozpadają się w czasie od jednej do kilku godzin Samples, when immersed in water, gradually disintegrate over a period of one to several hours
	5	Próbki rozpadły się w pierwszym cyklu zamrażania–odmrażania The samples disintegrated in the 1st freeze-thaw cycle
	8	Próbki rozpadły się w drugim cyklu zamrażania–odmrażania The samples disintegrated in the 2nd freeze-thaw cycle
25	3	Próbki rozpadły się w drugim cyklu zamrażania–odmrażania The samples disintegrated in the 2nd freeze-thaw cycle
	5	Próbki rozpadły się w szóstym cyklu zamrażania–odmrażania The samples disintegrated in the 6th freeze-thaw cycle
	8	Próbki rozpadły się w dziesiątym cyklu zamrażania–odmrażania The samples disintegrated in the 10th freeze-thaw cycle

**Tabela 8.** Wyniki wskaźnika mrozoodporności obliczone na podstawie badań ścinania  
**Table 8.** Frost resistance index results calculated on the basis of shear tests

Naprężenia normalne Normal stress – $\sigma_n$ [kPa]	Dodatek stabilizatora – Binder additive [%]		
	3	5	8
Wskaźnik mrozoodporności – Frost resistance index			
50	0,7	0,6	0,6
100	0,8	0,6	0,6
150	–	0,7	0,7
200	0,8	0,7	0,7
250	0,8	0,7	0,7

Uzyskane wartości wskaźnika mrozoodporności na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie wskazują na możliwość wykorzystania gruntu do konstrukcji nawierzchni drogowych (PN-S-96012:1997 – tab. 8, 9).

Należy zaznaczyć, że wyniki dotyczą prób poddanych pielęgnacji w skrzynce partu bezpośredniego ścinania, gdzie ścianki skrzynki utrzymują grunt w formie pomimo poddania pielęgnacji.

**Tabela 9.** Wymagane wartości wskaźnika mrozoodporności gruntu stabilizowanego cementem (PN-S-96012:1997)  
**Table 9.** Required values of the frost resistance index of soil stabilized with cement (PN-S-96012:1997)

Rodzaj warstwy konstrukcji nawierzchni drogowej Type of layer of the road surface structure	Wskaźnik mrozoodporności Frost resistance index
Podbudowa zasadnicza nawierzchni drogowej obciążonej ruchem kategorii KR od 2 do 6 The main base of the road surface loaded with traffic of category KR from 2 to 6	0,7
Górna część warstwy ulepszonego podłoża gruntowego o grubości co najmniej 10 cm w przypadku budowy nawierzchni dróg obciążonych ruchem kategorii KR 5 i KR 6 lub górna część warstwy ulepszenia słabego podłoża z gruntów wątpliwych The upper part of the layer of improved subsoil with a thickness of at least 10 cm in the case of construction of pavements of roads loaded with traffic categories KR 5 and KR 6 or the upper part of the layer of improvement of weak subsoil made of doubtful soils	0,6
Dolna część warstwy podbudowy ulepszonego podłoża gruntowego w przypadku posadowienia konstrukcji nawierzchni na podłożu z gruntów wrażliwych na działanie mrozu i wody The lower part of the foundation layer of the improved subsoil in the case of foundation of the pavement structure on a subgrade made of soils sensitive to frost and water	0,6

## WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie i ścinanie oraz wskaźnika mrozoodporności pyłu grubego bez i z dodatkiem spoiwa hydraulicznego Terramix F22,5 stwierdzono, że:

- Zarówno wytrzymałość na ściskanie i ścinanie badanych próbek gruntu zależy od sposobu pielęgnacji próbek, a także wartości dodatku spoiwa.
- Wytrzymałość na ściskanie określona bezpośrednio po uformowaniu próbek zmniejszyła się wraz ze wzrostem dodatku stabilizatora. Wskazuje to na konieczność pielęgnacji gruntu stabilizowanego spoiwem Terramix F22,5, ponieważ stabilizator nie poprawia właściwości gruntu bezpośrednio po jego zastosowaniu.
- Wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach pielęgnacji zależała od dodatku spoiwa do gruntu. Próbki z 3% dodatkiem spoiwa, zarówno po 7-, jak i 28-dobowej pielęgnacji powietrzno-wodnej uległy rozpadowi. Wytrzymałość na ściskanie próbek z 8% dodatkiem spoiwa była większa od 5% dodatku spoiwa niezależnie od rodzaju pielęgnacji.
- Próbki wykazują małą odporność na działanie wody, wytrzymałość na ściskanie próbek po pielęgnacji powietrzno-wodnej zwiększyła się w niewielkim stopniu. Dłuższy czas pielęgnacji próbek

spowodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie o około 12%.

- W największym stopniu na wytrzymałość na ściskanie miał wpływ rodzaj pielęgnacji. Zabezpieczenie gruntu stabilizowanego przed działaniem wody powoduje znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie, w tym przypadku na wytrzymałość ma wpływ zarówno dodatek stabilizatora, jak i czas pielęgnacji, która poprawiła wytrzymałość na ściskanie próbek o około 60%.
- Wytrzymałość na ścinanie, a co za tym idzie – wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności pyłu grubego, zależała od dodatku stabilizatora. Uzyskane parametry zwiększyły się wraz ze wzrostem dodatku spoiwa.
- Czas i rodzaj pielęgnacji próbek gruntu również miał wpływ na uzyskane parametry wytrzymałości na ścinanie:
  - Wytrzymałość na ścinanie próbek poddanych 7 i 28 dniom pielęgnacji rośnie wraz z wydłużeniem okresu pielęgnacji. Największą wartość wytrzymałości na ścinanie osiągnięto dla próby z 8% dodatkiem spoiwa Terramix po 28 dniach od jej wykonania. Kąt tarcia wewnętrznego wyniósł 42,5°, natomiast kohezja 48,9 kPa.
  - Wytrzymałość na ścinanie próbek poddanych cyklom zamrażanie–odmrażanie zmniejszyła się

wraz z wydłużeniem okresu pielęgnacji. Zachodzi proces odwrotny jak w przypadku prób poddanych stabilizacji w wodzie. Dla prób poddanych 14 cyklom zamrażania–odmrażania kąt tarcia wewnętrznego wahał się od 29,9° do 33,6°, natomiast kohezja od 6,5 kPa do 25,1 kPa.

8. Pył gruby z dodatkiem spoiwa Terramix F22,5 nie wykazywał mrozoodporności dla żadnego z zastosowanych dodatków spoiwa, ponieważ próbki uległy zniszczeniu podczas okresu pielęgnacji.

Podsumowując, można wskazać, że pył gruby z dodatkiem 3, 5 i 8% spoiwa Terramix F22,5 nie powinien być wykorzystywany do celów budownictwa drogowego, ponieważ nie spełnia wymagań normowych. Uzyskane wyniki pozwalają ponadto wskazać, że chcąc wykorzystać grunty o podobnym uziarnieniu w budownictwie drogowym, należy zwiększyć dodatek spoiwa Terramix F22,5 lub rozważyć zmianę spoiwa hydraulicznego.

## BIBLIOGRAFIA

- Ahmadi, H., Hamid, S., Molaabasi, H., Zeighami, E. (2020). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Constr. Build. Mater.*, 272, 121630. DOI: 10.3390/ma14237315
- Atahu, M.K., Saathoff, F., Gebissa, A. (2019). Strength and compressibility behaviors of expansive soil treated with coffee husk ash. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 11, 337–348. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.11.004
- Bzówka, J. (2015). Wybrane techniki wzmacniania słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 416–423.
- Gruchot, A. (2010). Wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność mieszaniny popiołowo-żużlowej z Elektrowni „Skawina” stabilizowanej wapnem lub cementem. *Drognictwo* 12, 411–415.
- Gruchot, A., Zawisza, E. (2018). Wytrzymałość na ścianie gruntów pylastych stabilizowanych popiołami fluidalnymi. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 17 (3), 37–45. DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.3.27
- Hassan, H.J.A., Rasul, J., Samin, M. (2021). Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil. *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, 8, 390–413.
- Jawad, I.T., Taha, M.R., Majeed, Z.H., Khan, T.A. (2014). Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 8, 510–520. DOI: 10.19026/rjaset.8.1000
- Latifi, N., Eisazadeh, A., Marto, A., Meehan, C.L. (2017). Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. *Constr. Build. Mater.*, 147, 827–836. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.115
- Mieloszyk, E., Milewska, A., Wyroślak, M. (2022). Metody wgłębnej modyfikacji gruntu słabonośnego do posadawienia nowych i zapasowych lotniczych dróg startowych. *Przegląd Komunikacyjny*, 7, 9–16.
- Munirwan, R.P., Taha, M.R., Mohd Taib, A., Munirwan-syah, M. (2022). Shear strength improvement of clay soil stabilized by coffee husk ash. *Applied Sciences*, 12(11), 5542. DOI: 10.3390/app12115542
- Nasiri, H., Khayat, N., Mirzababaei, M. (2021). Simple yet quick stabilization of clay using a waste by-product. *Transp. Geotech.*, 28, 100531. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100531
- Onyelowe, K.C., Onyia, M.E., Van, D.B., Baykara, H., Ugwu, H.U. (2021). Pozzolanic reaction in clayey soils for stabilization purposes: A classical overview of sustainable transport geotechnics. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 6632171. DOI: 10.1155/2021/6632171
- Paprocki, P., Tymiński, W., Kielczewski, T. (2016). Analiza parametrów geotechnicznych gruntów słabonośnych na przykładzie dokumentowania warunków budowy podłoża gruntowego dla inwestycji liniowej. *Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 25 (3), 347–355.
- Pisarczyk, S. (2004). Grunty nasytowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Rahgozar, M.A., Saberian, M., Li, J. (2018). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transp. Geotech.*, 14, 52–60. DOI: 10.1016/j.trgeo.2017.09.004
- Rosales, J., Agrela, F., Diaz, L. (2020). Use of nanomaterials in the stabilization of expansive soils into a road real-scale application. *Materials*, 13, 3058. DOI: 10.3390/ma13143058
- Sabzi, Z. (2018). Environmental friendly soil stabilization materials available in Iran. *J. Environ. Friendly Mater.*, 2, 33–39.
- Zahraalsadat, E., Norsyahariati, N.D.N., Yusoff, Z.M., Rostami, V. (2021). Evaluation of the effects of cement and lime with rice husk ash as an additive on strength behavior of coastal soil. *Materials*, 14, 1140. DOI: 10.3390/ma14051140
- Zalewski, P. (2007). Budromos. *Silment CQ – 25. Magazyn Autostrady*, 5, 80–82.
- Zawisza, E. (2001). Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelnienia grubookruchowych odpadów powęgl-

- wych popiołami lotnymi. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozprawy*, 280, 1–178. Kraków: Wydawnictwo AR.
- 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. DOI: 10,15576,ASP.FC/2017.16.1.27
- Zawisza, E., Gruchot, A. (2008). Wpływ stabilizacji cementem lub silmentem na wytrzymałość i mrozoodporność gruntu pylastego. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 32, 1, 371–379.
- Zawisza, E., Gruchot, A., Michalski, P. (2006). Wpływ stabilizacji cementem lub wapnem na wytrzymałość i mrozoodporność odpadów energetycznych ze składowiska Elektrociepłowni „Łęg” w Krakowie. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 27, 1, 22–30.
- PN-B-04481:1981. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- PN-EN ISO 14688-2:2018. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- PN-EN ISO 17892-12:2018. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 12: Oznaczanie granic płynności i plastyczności. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- PN-S-96011:1998. Drogi samochodowe. Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- PN-S-96012:1997. Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.

## COMPRESSIVE AND SHEAR STRENGTH OF COARSE SILT STABILIZED WITH TERRAMIX F22.5 BINDER

### ABSTRACT

#### Aim of the study

The paper presents the results of testing the compressive strength, frost resistance and shear strength of stabilized fine-grained soil depending on the added hydraulic binder and the time and method of curing. Determination of these parameters was to check the suitability of the soil for stabilization purposes.

#### Material and methods

The tests were performed for a coarse silt collected in Boczkowice in the Małopolskie Voivodship. The stabilizer used in the tests was Terramix F22.5, added in the amount of 3, 5 and 8% in relation to the dry matter skeleton. The test was carried out on samples immediately after stabilization, after 7 and 28 days of treatment with water and after 7 and 28 days with freezing and thawing cycles, as well as for samples without the addition of a stabilizer. The samples were formed at optimum moisture content up to obtain the compaction index close to or equal to  $I_s = 1.00$ .

#### Results and conclusions

On the basis of the conducted tests, it was found that the binder content used as well as the length and method of sample curing influence the improvement of geotechnical parameters. Both the compressive and shear strength of the tested soil samples depend on the method of sample care, as well as the value of the binder addition. The method of sample curing had the greatest influence on the compressive strength of the soil. Protecting the stabilized soil against water causes a significant increase in compressive strength, the enhance of compressive strength of the samples was up to 60%. The shear strength, and thus the values of the angle of internal friction and the cohesion of coarse silt, were significantly affected by content of the stabilizer. The both parameters increased with the increase of the binder addition.

**Keywords:** compressive, frost resistance, shear strength, stabilization, hydraulic binder