

*Eugeniusz Zawisza**, *Andrzej Tadeusz Gruchot**

WPŁYW STABILIZACJI CEMENTEM LUB SILMENTEM NA WYTRZYMAŁOŚĆ I MROZODPORNOŚĆ GRUNTU PYLASTEGO

1. Wstęp

Grunty pylaste charakteryzują się specyficznymi właściwościami geotechnicznymi. Są wrażliwe na oddziaływanie wody, co objawia się szybką zmianą stanu gruntu przy zwiększeniu wilgotności, podatnością na deformacje filtracyjne, a także zapadowością (grunty pochodzenia lessowego). Wymienione cechy powodują, że grunty te stwarzają duże trudności w przypadku stosowania ich jako materiału konstrukcyjnego w budownictwie ziemnym, na przykład do formowania warstw uszczelniających lub izolacyjnych składowisk/zwałowisk odpadów komunalnych i przemysłowych czy osadników mokrych.

W celu polepszenia właściwości geotechnicznych gruntów pylastych można stosować różne metody, z których stosunkowo prosta i skuteczna jest stabilizacja przy zastosowaniu spoiw hydraulicznych. Jak wykazały badania Klimczyka [3], grunt pylasty (pochodzenia lessowego) bez dodatku spoiwa ma zbyt dużą wodoprzepuszczalność ($k = 10^{-6}$ m/s) i nie może stanowić uszczelnienia, może natomiast stanowić materiał do niwelacji terenowych i wypełniania różnego typu wyrobisk. Grunt ten ulepszony dodatkiem cementu lub bentonitu w odpowiedniej proporcji uzyskuje wartość współczynnika filtracji wymaganą dla warstw uszczelniających składowisk odpadów różnego typu ($k \leq 10^{-9}$ m/s).

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań stabilizacji wybranego gruntu pylastego przy zastosowaniu cementu lub silmentu.

2. Cel i metody badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu stabilizacji cementem lub silmentem na wytrzymałość na ściskanie oraz mrozoodporność gruntu pylastego, pobranego z odkrywki zlokalizowanej przy ul. Księcia Józefa w dzielnicy Zwierzyniec w Krakowie.

* Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Akademia Rolnicza, Kraków

Skład granulometryczny i podstawowe właściwości fizyczne pyłu oznaczono w sposób standardowy. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu oznaczono w aparacie Proctora przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J/cm}^3$. Kapilarność bierną oznaczono w kapilarymetrze laboratoryjnym. Wskaźnik piaskowy oznaczono w cylindrze z pleksiglasu o średnicy wewnętrznej 32 mm i wysokości 430 mm.

Badania stabilizacji pyłu przeprowadzono przy zastosowaniu spoiw hydraulicznych — cementu portlandzkiego klasy 32,5R oraz silmentu CQ-25 i CQP-15. Spoiwa silment wykazują właściwości wiążące podobne do cementu, a ich bliższą charakterystykę podano we wcześniejszych pracach własnych [2, 11] i innych autorów [1, 4, 5, 8], a także w materiałach informacyjnych producenta [6].

Dodatek spoiwa w ilości 3, 6 i 10% w stosunku do suchej masy pyłu przyjęto zgodnie z wymaganiami normy PN-S-96012:1997. Próbkę do badań formowano w cylindrze o średnicy i wysokości po 8 cm i zagęszczano w aparacie Proctora przy energii zagęszczania $0,59 \text{ J/cm}^3$. Wskaźnik zagęszczenia próbek wynosił od 1,00 do 1,02, a wilgotność była zbliżona do optymalnej dla danej mieszanki i wynosiła od 13,8 do 16,0%.

Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek stabilizowanych silmentem przeprowadzono po 7, 14, 28 i 42 dobach pielęgnacji, natomiast próbek stabilizowanych cementem po 7 i 28 dobach pielęgnacji (tab. 1).

TABELA 1

Pielęgnacja próbek pyłu do badań wytrzymałości na ściskanie

Stabilizator		Pielęgnacja próbek	
rodzaj	dodatek [%]	czas [doby]	przebieg
cement silment	3	7	3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym przez 1 dobę zanurzone 1 cm w wodzie, a przez następne 3 doby zanurzone całkowicie w wodzie
	6		
	10		
silment	3	14	7 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowite zanurzenie próbek w wodzie w temperaturze pokojowej na 7 dób
	6		
	10		
cement silment	3	28	14 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowite zanurzenie próbek w wodzie w temperaturze pokojowej na 14 dób
	6		
	10		
cement silment	3		13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowicie zanurzone w wodzie na 1 dobę, a następnie w ciągu kolejnych 14 dób poddane cykлом ¹⁾ zamrażania i odmrażania
	6		
	10		
silment	3	42	28 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, po czym całkowite zanurzenie próbek w wodzie w temperaturze pokojowej na 14 dób
	6		
	10		

¹⁾ jeden cykl to 8-godzinne zamrażanie w temperaturze -23°C i 16-godzinne odmrażanie w wodzie w temperaturze pokojowej.

Oznaczono również wytrzymałość na ściskanie próbek stabilizowanych obydwoma rodzajami spoiwa po 14 dobach pielęgnacji oraz po 14 cyklach zamrażania i odmrażania (łącznie 28 dób). Badania przeprowadzono w 3 powtórzeniach (po 3 próbki z każdej mieszanki — razem 57 próbek), dla których obliczono wartość średnią do dalszych analiz. Wskaźnik mrozoodporności obliczono jako stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek po 28 dobach pielęgnacji — poddanych cyklowi zamrażania i odmrażania, do wytrzymałości próbek po 28 dobach pielęgnacji — nie poddanych cyklowi zamrażania i odmrażania.

3. Wyniki badań i ich analiza

Właściwości fizyczne

W składzie granulometrycznym badanego gruntu dominowała frakcja pyłowa i piaskowa (łącznie ponad 90%), natomiast udział frakcji iłowej był nieduży (tab. 2). Wartość wskaźnika różnoziarnistości ($U = 16,3$) pozwala zakwalifikować pył do grupy gruntów bardzo różnoziarnistych.

TABELA 2
Właściwości fizyczne pyłu

Parametr		Wartość
Zawartość frakcji [%]:		
— piaskowa 2,0÷0,05 mm		24,5
— pyłowa 0,05÷0,002 mm		66,0
— iłowa < 0,002 mm		9,5
Nazwa wg PN-B-02480:1986		Pył
Zawartość cząstek [%]	≤ 0,075 mm	85
	≤ 0,02 mm	33
Wskaźnik różnoziarnistości [–]		16,3
Gęstość właściwa [g/cm ³]		2,67
Granica plastyczności [%]		17,88
Granica płynności [%]		27,05
Kapilarność bierna [cm]		129,6
Wskaźnik piaskowy [%]		3,5

Gęstość właściwa szkieletu wynosiła 2,67 g/cm³. Granice konsystencji wynosiły odpowiednio: plastyczności około 18% i płynności 27%.

Badany pył można określić jako bardzo wysadzinowy, ponieważ zawartość cząstek ≤ 0,075 mm była większa od 30%, cząstek ≤ 0,02 mm większa od 10%, a wskaźnik piaskowy mniejszy od 25% [7]. Kapilarność bierna była większa od 1,0 m.

Zagęszczalność

Wilgotność optymalna pyłu wynosiła nieco ponad 14%, a maksymalna gęstość objętościowa szkieletu $1,77 \text{ g/cm}^3$. Mieszanki pyłu z dodatkiem spoiwa silment wykazały nieznaczne zwiększenie wilgotności optymalnej — do 15% w przypadku spoiwa CQ-25 i około 16% w przypadku spoiwa CQP-15 — oraz nieznaczne zmniejszenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu: odpowiednio do $1,75$ i około $1,73 \text{ g/cm}^3$ wraz ze zwiększaniem ilości spoiwa od 3 do 10%.

Parametrów zagęszczalności dla mieszanek pyłu z cementem nie oznaczono przyjmując, że będą podobne jak dla mieszanek z silmentem CQ-25. Potwierdzają to badania Klimczyka [3] (tab. 3), który dla mieszanek pyłu (lessu — pochodzącego również z rejonu dzielnicy Zwierzyniec w Krakowie) z cementem w ilości od 2,5 do 10% uzyskał wilgotność optymalną zwiększającą się od 15,1 do 15,6% oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu zmniejszającą się od $1,78$ do $1,75 \text{ g/cm}^3$.

TABELA 3

Parametry zagęszczalności pyłu oraz mieszanek pyłu z dodatkiem stabilizatora

Parametr	Rodzaj stabilizatora	Ilość stabilizatora [%]					
		0	2,5	3	5	6	10
Wilgotność optymalna [%]	–	14,10	–	–	–	–	–
	cement ¹⁾	14,61	15,12	–	15,47	–	15,61
	CQ-25	–	–	14,50	–	14,60	15,00
	CQP-15	–	–	15,10	–	15,90	15,90
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu [g/cm^3]	–	1,77	–	–	–	–	–
	cement ¹⁾	1,83	1,78	–	1,76	–	1,75
	CQ-25	–	–	1,76	–	1,75	1,75
	CQP-15	–	–	1,74	–	1,725	1,725

¹⁾ Badania Klimczyka [3].

Wytrzymałość na ściskanie

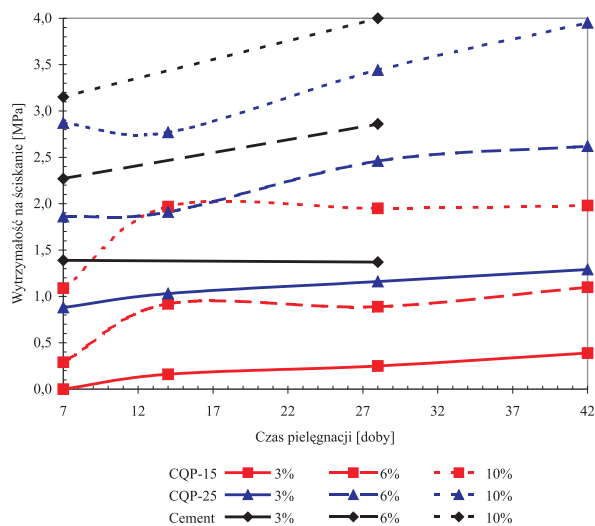
Wytrzymałość na ściskanie próbek pyłu była zależna od rodzaju i ilości spoiwa oraz od czasu pielęgnacji. Największą wytrzymałość na ściskanie — 4,0 MPa — uzyskano dla próbek z 10% dodatkiem cementu po 28 dobach pielęgnacji (tab. 4, rys. 1).

Próbki z 6% dodatkiem cementu uzyskały wytrzymałość na ściskanie wynoszącą około 2,9 MPa, natomiast próbki z 3% dodatkiem cementu około 1,4 MPa. Zbliżone do podanych wyżej wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskały próbki stabilizowane spoiwem silment CQ-25 po 42 dobach pielęgnacji. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie wykazały próbki stabilizowane spoiwem silment CQP-15.

TABELA 4

Wytrzymałość na ściskanie pyłu stabilizowanego cementem lub silmentem

Czas pielęgnacji [doby]	Dodatek stabilizatora [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
		rodzaj stabilizatora		
		cement 32,5R	silment	
CQ-25	CQP-15			
7	3	1,39	0,88	0
	6	2,27	1,86	0,29
	10	3,15	2,87	1,09
14	3	–	1,03	0,16
	6		1,91	0,92
	10		2,77	1,97
28	3	1,37	1,16	0,25
	6	2,86	2,46	0,89
	10	4,00	3,44	1,95
28 (zamrażanie– odmrażanie)	3	0,19	0,11	–
	6	0,53	0,25	0,03
	10	1,33	0,67	0,30
42	3	–	1,29	0,39
	6		2,62	1,10
	10		3,95	1,98

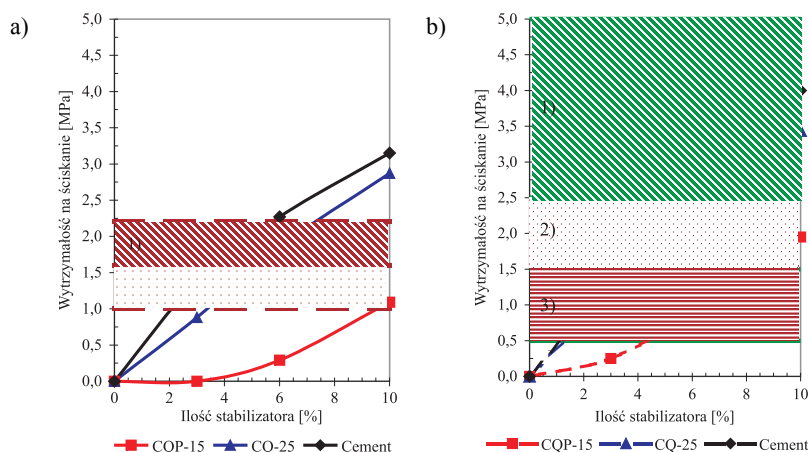


Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie stabilizowanego pyłu w zależności od czasu pielęgnacji, rodzaju i dodatku spoiwa

Różnice między wartościami wytrzymałości na ściskanie próbek stabilizowanych cementem lub silmentem (zarówno CQ-25 jak i CQP-15) zmniejszyły się wraz ze zwiększaniem dodatku spoiwa i czasu pielęgnacji:

- próbki z dodatkiem 3% cementu uzyskały wytrzymałość na ściskanie po 7 dobach około 1,6-krotnie, a po 28 dobach około 1,2-krotnie większą od próbek z dodatkiem silmentu CQ-25. Próbki z takim samym dodatkiem silmentu CQP-15 po 7 dobach rozpadły się w wodzie, a po 28 dobach ich wytrzymałość na ściskanie była 5,5-krotnie mniejsza od wytrzymałości próbek z dodatkiem cementu,
- próbki z dodatkiem 6% cementu uzyskały wytrzymałość na ściskanie po 7 dobach ponad 1,2-krotnie większą niż próbki z dodatkiem silmentu CQ-25 i około 8-krotnie większą niż próbki z dodatkiem silmentu CQP-15, a po 28 dobach większą odpowiednio około 1,2-krotnie i 2-krotnie,
- próbki z dodatkiem 10% cementu uzyskały wytrzymałość na ściskanie po 7 dobach 1,1-krotnie większą niż próbki z dodatkiem silmentu CQ-25 i około 3-krotnie większą niż próbki z dodatkiem silmentu CQP-15, a po 28 dobach większą odpowiednio około 1,2-krotnie i 2-krotnie.

Wytrzymałość na ściskanie stanowi kryterium oceny przydatności gruntów do budowy dróg. Wymagana wartość wytrzymałości na ściskanie gruntów stosowanych na podbudowy zasadnicze nawierzchni drogowej po 7 dobach pielęgnacji wynosi co najmniej 1,6 MPa, a po 28 dobach — 2,5 MPa. Wymagania te spełnia pył z dodatkiem 6 i 10% cementu lub silmentu CQ-25 (rys. 2).



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego pyłu od procentowej zawartości spoiwa na tle wymagań normowych: a) czas pielęgnacji — 7 dób; b) czas pielęgnacji — 28 dób; wymagania normy PN-S-96012:1997 dla czasu pielęgnacji: 1) podbudowa zasadnicza nawierzchni drogowej dla ruchu kategorii KR 1; podbudowa pomocnicza dla ruchu od KR 2 do KR 6; 2) część górna ulepszonego podłoża — dla warstwy o grubości ≥ 10 cm i ruchu kategorii KR 5 i KR 6 lub dla warstwy ulepszenia słabego podłoża z gruntów wątpliwych oraz wysadzinowych; 3) część dolna ulepszonego podłoża — dla konstrukcji nawierzchni posadowionej na podłożu wrażliwym na działanie wody i mrozu

W stosunku do górnej części ulepszonego podłoża wymagana wartość wytrzymałości na ściskanie wynosi co najmniej 1,0 MPa po 7 dobach i 1,5 MPa po 28 dobach pielęgnacji.

Wymagania te spełnia pył z dodatkiem 6 i 10% cementu lub silmentu CQ-25 oraz z dodatkiem 10% silmentu CQP-15. W stosunku do dolnej części ulepszonego podłoża wymagana wytrzymałość na ściskanie wynosi 0,5 MPa po 28 dobach pielęgnacji. Wymagania te spełnia pył z dodatkiem 3% cementu lub silmentu CQ-25 oraz pył z dodatkiem 6% silmentu CQP-15.

Wskaźnik mrozoodporności

Próbki stabilizowanego pyłu, poddane cyklom zamrażania i odmrażania, wykazują nieduże wartości wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności. W przypadku stabilizacji cementem wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się od około 0,2 do ponad 1,3 MPa wraz ze zwiększeniem dodatku spoiwa od 3 do 10% (tab. 4), a wskaźnik mrozoodporności zwiększył się odpowiednio od 0,14 do 0,33 (tab. 5). W przypadku stabilizacji silmentem CQ-25 wartości wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności były prawie 2-krotnie mniejsze niż przy stabilizacji cementem.

W przypadku stabilizacji silmentem CQP-15 próbki pyłu z dodatkiem 3% spoiwa uległy rozpadowi w trakcie kolejnych etapów pielęgnacji, próbki z dodatkiem 6% spoiwa miały znikomą wytrzymałość na ściskanie (0,03 MPa), a próbki z 10% dodatkiem wykazały wyraźnie większą wytrzymałość (0,30 MPa). Uzyskany wskaźnik mrozoodporności był nieduży i wynosił 0,03 dla próbek z dodatkiem 6% spoiwa oraz 0,15 dla próbek z dodatkiem 10% spoiwa (tab. 5).

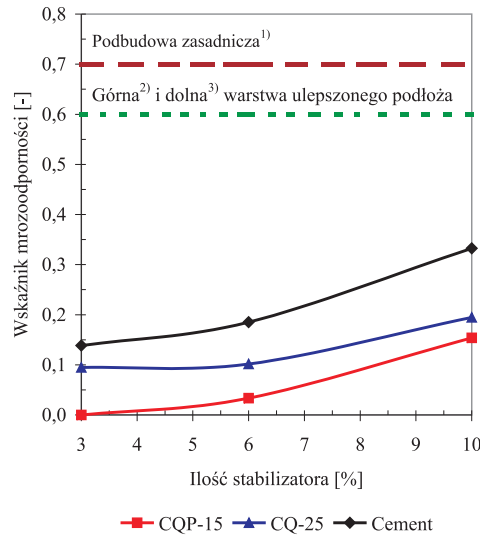
TABELA 5

Wartości wskaźnika mrozoodporności stabilizowanego pyłu

Dodatek stabilizatora [%]	Wskaźnik mrozoodporności [-] dla stabilizatora		
	cement 32,5R	silment	
		CQ-25	CQP-15
3	0,14	0,09	-
6	0,19	0,10	0,03
10	0,33	0,19	0,15

Zgodnie z wymaganiami normy PN-S-96012:1997 wskaźnik mrozoodporności górnej i dolnej części ulepszonego podłoża nie powinien być mniejszy niż 0,6, a podbudowy zasadniczej nawierzchni drogowej niż 0,7.

Wymagań tych nie spełniają ani próbki pyłu stabilizowanego cementem, ani obydwoma rodzajami silmentu (rys. 3).



Rys. 3. Zależność wskaźnika mrozoodporności stabilizowanego pyłu od procentowej zawartości spoiwa na tle wymagań normowych: 1) podbudowa zasadnicza nawierzchni drogowej dla ruchu kategorii KR 1; podbudowa pomocnicza dla ruchu od KR 2 do KR 6; 2) dla warstwy o grubości ≥ 10 cm i ruchu kategorii KR 5 i KR 6 lub dla warstwy ulepszenia słabego podłoża z gruntów wątpliwych oraz wysadzinowych; 3) dla konstrukcji nawierzchni posadowionej na podłożu wrażliwym na działanie wody i mrozu

4. Podsumowanie

Skład uziarnienia oraz wartości wskaźnika piaskowego i kapilarności biernej pozwalają zaliczyć badany pył do grupy gruntów bardzo wysadzinowych, dlatego grunt ten nie powinien być stosowany jako materiał konstrukcyjny w budownictwie ziemnym, w szczególności do wznoszenia nasypów drogowych lub hydrotechnicznych. Może on również stwarzać poważne problemy w budownictwie ogólnym, w przypadku gdy stanowi podłoże obiektów budowlanych. Świadczą o tym przykłady z praktyki inżynierskiej, również z terenu Krakowa [9, 10].

Stabilizacja spoiwami hydraulicznymi przynosi korzystne efekty ze względu na polepszenie właściwości mechanicznych gruntu pylastego — wytrzymałość na ścislenie stabilizowanego pyłu jest stosunkowo duża. Wyniki badań Klimczyka [3] wskazują, że stabilizowany grunt pylasty charakteryzuje się bardzo małą wodoprzepuszczalnością ($k = 10^{-9}$ – 10^{-12} m/s). W oparciu o powyższe można wnosić, że w przypadku stosowania gruntu pylastego jako materiału na warstwy uszczelniające niezbędna jest jego stabilizacja środkami wiążącymi. Z uwagi jednak na to, że stabilizowany grunt pylasty wykazuje wrażliwość na oddziaływanie temperatur ujemnych, należy go stosować na warstwy uszczelniające zalegające na głębokości większej od głębokości przemarzania. Wynika z tego, że można go stosować na

warstwy uszczelniające dno składowiska odpadów komunalnych lub przemysłowych, natomiast nie należy go stosować do uszczelniania powierzchni składowiska.

Reasumując można stwierdzić, że do celów budownictwa ziemnego grunt pylasty w stanie naturalnym (niestabilizowany) może być przydatny do wypełnień terenowych i rekultywacji obszarów zdegradowanych. Grunt taki stabilizowany cementem, wapnem lub bentonitem może być stosowany do formowania warstw uszczelniających dno składowisk komunalnych lub przemysłowych. Stabilizacja pyłu środkami zastosowanymi w niniejszej pracy (cement, silment) nie zwiększa jego mrozoodporności w stopniu wymaganym dla potrzeb budownictwa drogowego; zatem należy kontynuować badania przy zastosowaniu innych środków wiążących, pozwalających uzyskać pozytywne efekty zarówno w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie, jak i mrozoodporności.

LITERATURA

- [1] *Gmyrek L., Pieroński M.*: Silment — alternatywa dla cementu w stabilizacji gruntów. *Autostrady. Projektowanie i budowa dróg polskich*, 1–2, 2005, 17–18
- [2] *Gruchot A.T.*: Wpływ stabilizacji wybranych popiołów na wartość wskaźnika nośności CBR. *Zesz. Nauk. Polit. Białostockiej, Budownictwo*, z. 28, 1, 2006, 99–108
- [3] *Klimczyk J.*: Kształtowanie właściwości filtracyjnych lessów i ich mieszanek z materiałami wiążącymi i uszczelniającymi. Politechnika Krakowska, 2002 (rozprawa doktorska)
- [4] *Kosmala J.*: Silment — hydrauliczne spoiwo drogowe nowej generacji. *Materiały XII Międzynarodowej Konferencji „Popioły z energetyki”*. Szczecin, Wyd. Ekotech Sp. z o.o. 2005, 179–184
- [5] *Litwinowicz A., Graca P., Mielnik Ł.*: Spoiwo Silment. Zastosowanie w budownictwie drogowym. *Autostrady. Projektowanie i budowa dróg polskich*, 5, 2005, 159–164
- [6] Materiały informacyjne firmy „ROWIS-SYSTEM sp. jawna Siemiński-Wilk” 2003
- [7] PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania
- [8] *Porszke A.*: Możliwości zastosowania spoiw cementowo-puculanowych SILMENT CQP-15 i CQ-25 jako stabilizator gruntu. *Drogownictwo*, 5, 2004, 159–164
- [9] *Wodyński A.*: Osiedlenie obiektów posadowionych na podłożu pylastym. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 1980 (rozprawa doktorska)
- [10] *Zawisza E., Klęk K.*: Stabilizacja popiołów spoiwami „Silment” w drogownictwie. *Drogownictwo*, 12, 2006, 396–401
- [11] *Zawisza E.*: Badania modelowe przebiegu deformacji podłoża pylastego pod obciążeniem. Akademia Rolnicza w Krakowie, 1983 (rozprawa doktorska)