

Lucia Bulíková, František Kresta

Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Building Materials and Diagnostics of Structures

Właściwości mechaniczne glin z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego i wapiennego

Comparison of mechanical properties of clays treated by siliceous and calcareous fly ash

1. Wprowadzenie

Grunty gliniaste zawierają dużą ilość drobnych frakcji poniżej 0,063 mm [frakcja iłowa poniżej 0,002 mm, frakcja pyłowa 0,002-0,063 mm]. Ich wskaźnik plastyczności mieści się w granicach 35-60%. W Republice Czeskiej grunty podzielono na kategorie zgodnie z czeską normą CSN 73 6133 [Drogowe budowlane ziemne – projektowanie i wykonanie] w oparciu o ich właściwości. Grunty są zazwyczaj bardzo ściśliwe i mają małą wytrzymałość. Duża zawartość frakcji iłowej powoduje wrażliwość na zmiany wilgotności w strukturze gruntu. Drobne pory mogą absorbować wodę i powodować niekorzystne zmiany objętości [pęcznienie lub skurcz] i grunt jest podatny na wznoszenie mrozowe. Jest to jedno z zagrożeń, które należy wziąć pod uwagę podczas drogowych robót ziemnych (1, 3).

Uzdatnianie gruntu to technologia, która pozwala na optymalne wykorzystanie nieodpowiedniej jakości gruntów do budowy dróg. Celem tego procesu jest wykorzystanie jak największej ilości gruntów na miejscu budowy. W tym celu stosuje się wapno lub spoiwa hydrauliczne. Natychmiastowy rezultat uzdatnienia gruntu jest ściśle związany ze zmniejszeniem zawartości wody. Zalecaną alternatywą dla tradycyjnych spoiw jest popiół lotny, a jego wykorzystanie w projektach inżynierii lądowej w Europie wzrosło

1. Introduction

Clay soils contain high share of fine particles under 0.063 mm [clay particles under 0.002 mm, silt ones between 0.002-0.063 mm]. Their plasticity index is in the range of 35-60%. In the Czech Republic soils are categorized according to the Czech standard CSN 73 6133 [Road earthworks – Design and execution] base on these characteristics. Clays are usually very compressible with low resistance. The high share of clay components causes sensitivity to changes of moisture in soil structure. Fine pores are able to soak up water and give rise to negative volume changes [swelling or shrinking] and soil is susceptible to frost heave. It is the one hazard of road earthworks execution (1, 3).

Soil treatment is a technology that leads to the optimal utilization of unsuitable soils in road constructions. The purpose of this process is to utilize as much as possible soils on construction site. Lime or hydraulic binders are used for soil treatment. Immediate effects of soil treatment are closely connected with the reduction of water content. Fly ash is a recommended alternative to traditional binders and its utilization in civil engineering projects in Europe increased due to the strict ecological requirements and waste management (3, 6, 9-11).

ze względu na rygorystyczne wymagania związane z ekologią i gospodarką odpadami (3, 6, 9-11).

Popiół lotny jest ubocznym produktem spalania węgla [UPS] wytwarzanym w elektrowni. Krzemionkowy popiół lotny zawiera dużą ilość szkła bogatego w krzemionkę i otrzymywany jest poprzez wytrącanie elektrostatyczne z gazów odlotowych. Jego skład chemiczny i właściwości zależą od składu węgla, a także rodzaju pieca oraz warunków spalania (1, 2, 5, 7).

2. Materiały i metody

Badaniom poddano dwie próbki glin lessowych, pozyskanych z miejsc budowy dróg na obszarze Moraw, które uzdatniono popiołem lotnym. W pierwszym zestawie próbek zastosowano popiół lotny z Elektrowni Arcelor Mittal w Ostrawie [PLO]. Drugi popiół lotny [PLT] pochodził z elektrowni przy hucie żelaza i stali w Trzyńcu [Czechy], gdzie stosuje się spalanie w kotłach fluidalnych. Ten rodzaj spalania charakteryzuje się niższą temperaturą, około 850°C. PLT pobrano z silosu. Obie próbki popiołów pochodziły

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE GLIN LESSOWYCH

MECHANICAL PROPERTIES OF LOESS LOAMS

Parametr / Parameter	Glina lessowa z dodatkiem PLO Loess loam treated by FAO	Glina lessowa z dodatkiem PLT Loess loam treated by FAT
Klasa / Classification [ČSN 73 6133]	F6 CI	F6 CI
Frakcja ilowa [poniżej 0,002 mm] Clay components [under 0.002 mm]	18.0	31.2
Frakcja pyłowa / Silt components [0.002-0.063 mm]	56.9	51.1
Frakcja piaskowa / Sand components [0.063-2 mm]	21.4	17.6
Frakcja żwirowa / Gravel components [2-63 mm]	3.7	0.1
Wilgotność naturalna gruntu Normal water content w_n , %	13.9	20.4
Granica płynności / Liquid limit w_L , %	38.2	48.6
Granica plastyczności / Yield point w_p , %	18.1	21.9
Wskaźnik plastyczności / Index of plasticity I_p , %	20.0	26.7
Wskaźnik konsystencji / Index of consistence I_c	1.2	1.1
Wilgotność optymalna / Optimal water content w_{opt} , %	16	19
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Maximum dry density ρ_{dmax} , $kg \cdot m^{-3}$	1850	1730
Porowatość / Porosity n , %	33.7	36.5
Natychmiastowy wskaźnik nośności Immediate bearing index IBI, %	16.5	3.6
Wskaźnik nośności bez zanurzania w wodzie CBR without soaking, %	16.2	11.9
Współczynnik filtracji Coefficient of permeability k_f , $m \cdot s^{-1}$	7.5E-10	3.3E-11
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego Effective angle of internal friction f_{ef} , °	30.5	20.5
Efektywna spójność / Effective cohesion c_{ef} , kPa	13	27
Pęcznienie liniowe / Linear swelling L_s , %	1.6	0.7

Fly ash is coal combustion product [CCP] from power plant. The siliceous fly ash contains high amount of siliceous glass and is collected in the electrostatic precipitator of flue gases. Chemical composition and properties of fly ash depend on the coal composition as well as the type of furnace and burning conditions (1, 2, 5, 7).

2. Materials and methods

Two specimens of loess loams, sampled from the sites of road construction in the Morava region were tested after treatment by fly ashes. The first set of samples of the fly ash [FAO] was delivered from the Arcelor Mittal Ostrava Power Station. The second fly ash [FAT], was from the Třinec Ironworks Power Station from the fluidized bed furnace. This combustion is characterised by lower temperatures of about 850°C. FAT was collected from the storage silo. Both fly ash samples were originated from the combustion of coal from the Ostrava-Karvina coalfield.

In Table 1 the mechanical properties of tested soils are presented. According to the CSN 73 6133, loess loams were classified as

TABLICA 2 / TABLE 2

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁÓW LOTNYCH, %
CHEMICAL ANALYSES OF FLY ASH SAMPLES, %

Składnik / Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	LOI
PLO / FAO	42.7	24.5	8.6	4.9	0.7	0.9	2.4	11.4
PLT / FAT	40.9	32.3	6.5	16.7	1.2	7.5	1.7	7.8

ze spalania pyłu węglowego z Ostrawsko-Karwińskiego Zagłębia Węglowego.

W tabelicy 1 zestawiono właściwości mechaniczne badanych gruntów. Zgodnie z normą czeską CSN 73 6133, gliny lessowe należą do klasy F6 Cl – gliny o średniej plastyczności. Próbkę gruntu z dodatkiem popiołu lotnego z Ostrawy [PLO] miała mniejszą wilgotność naturalną oraz wilgotność optymalną wynoszącą około 20%, w porównaniu do drugiej próbki gruntu. Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, natychmiastowego wskaźnika nośności oraz wytrzymałość na ścinanie były mniejsze w przypadku próbki gruntu z dodatkiem PLT. Jest to związane z większą zawartością frakcji ilowej w tej próbce.

Analizy chemiczne próbek popiołów lotnych [tablica 2] przeprowadzono celem ich klasyfikacji oraz określenia ich reaktywności. Udział tlenków SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃ wynosi ponad 75%. Popiół lotny PLT zawiera 7,5% siarki w formie SO₃ oraz 16,7% wapna [CaO]. W przypadku popiołu lotnego krzemionkowego PLO zawartość CaO wynosiła tylko 4,9%. Zgodnie z klasyfikacją w normie ASTM C-618 oraz powyższymi wynikami, próbki popiołów zakwalifikowano do klasy F – krzemionkowy [PLO] oraz klasy C – wapienny [PLT]. Popiół lotny wapienny ma skłonność do większych zmian objętości oraz wykazuje właściwości hydrauliczne ze względu na większą zawartość CaO.

Mikrofotografie popiołów wykonane za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego pokazano na rysunkach 1 i 2. Zaobserwowano kuliste ziarna krzemionkowego popiołu lotnego PLO, które powstały podczas spalania w wysokiej temperaturze. Ziarna

F6 Cl – clays, with medium plasticity. A sample of soil treated by fly ash from Ostrava [FAO] had lower value of normal and optimal water content [moisture] equal to about 20% than the second sample of soil. Values of maximum dry density, Immediate Bearing Index - IBI and shear strength were lower in case of soil treated with FAT. It was caused by higher ratio of clay components in this soil sample.

Chemical analyses of fly ash samples were performed to assess and determine their reactivity and they are shown in Table 2. The share of the following oxides: SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ is higher than 75%. The FAT fly ash contains 7.5% of sulphur presented as SO₃ and 16.7% of lime. The CaO content was only 4.9% in the case of siliceous fly ash FAO. According to the ASTM C-618 classification and obtained results, samples of fly ashes were classified as class F – siliceous [FAO] and class C - calcareous [FAT]. Calcareous fly ash has higher volume changes and hydraulic properties, due to the higher content of CaO.

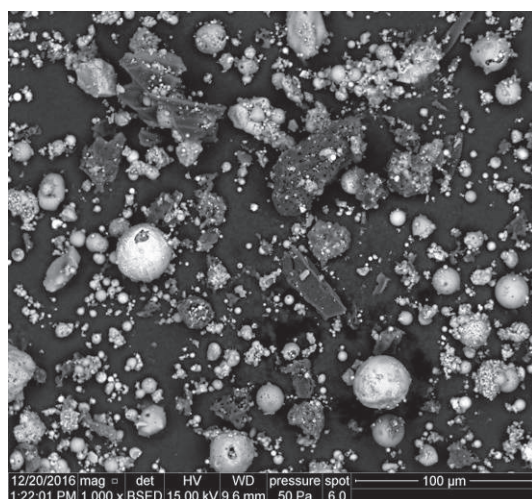
Electron microscope micrographs of fly ashes are shown in Figs. 1 and 2. Mica and spherical particles of siliceous FAO, that were formed during high temperature combustion were observed. Particles of calcareous fly ash FAT are represented by irregular grains, due to lower temperature during combustion of coal. This type of grains is more reactive than spherical ones.

Tested soils were mixed with siliceous and calcareous fly ash and mixtures properties were examined. Laboratory tests were carried out both on untreated and treated soils. Clay soils were mixed with 5%, 10% and 15% of fly ash.

3. Results of laboratory tests

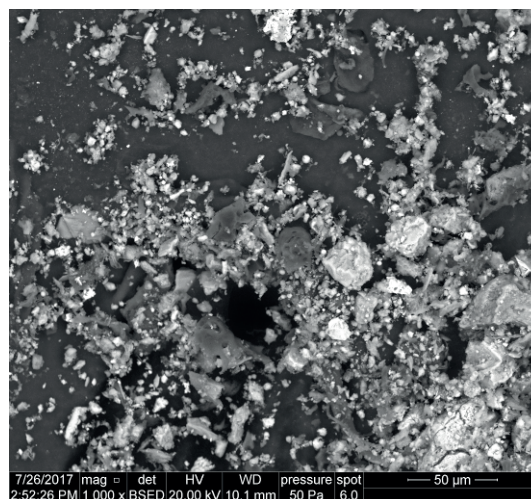
3.1. Properties of calcareous fly ash FAT

Fly ash from the Trinec Ironworks Power Station has hydraulic properties typical for calcareous fly ash. Hydraulic behaviour



Rys. 1. Popiół lotny krzemionkowy PLO

Fig. 1. Siliceous fly ash FAO



Rys. 2. Popiół lotny wapienny PLT

Fig. 2. Calcareous fly ash FAT

popiołu lotnego wapiennego PLT mają nieregularne kształty, co jest wynikiem działania niższej temperatury podczas spalania węgla. Takie ziarna są bardziej reaktywne w porównaniu do ziaren kulistych.

Badane grunty zmieszano z popiołem lotnym krzemionkowym oraz wapiennym i zbadano ich właściwości. Badania laboratoryjne przeprowadzono zarówno na gruntach z dodatkiem popiołów, jak i bez dodatków. Grunty gliniaste zmieszano z dodatkiem 5%, 10% i 15% popiołu lotnego.

3. Wyniki badań

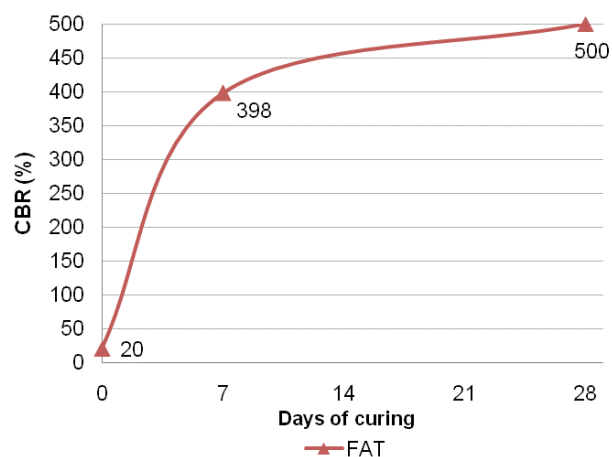
3.1. Właściwości popiołu lotnego wapiennego PLT

Popiół lotny z elektrowni przy hucie żelaza i stali w Trzyńcu wykazuje właściwości hydrauliczne, typowe dla popiołu lotnego wapiennego. Właściwości te są związane z większą zawartością CaO w składzie PLT oraz kształtem ziaren.

Wartości kalifornijskiego wskaźnika nośności KWN popiołu lotnego wapiennego PLT pokazano na rysunku 3. Wartość tego wskaźnika nośności zmierzona bezpośrednio po nasyceniu wodą próbki wynosiła 20% i wzrosła 25 razy do 500% po 28 dniach dojrzewania. Popiół lotny PLT twardnieje po zmieszaniu z wodą bez dodatku domieszki lub spoiwa. Zgodnie z uzyskanymi wynikami zależności wartości wskaźnika nośności KWN po nasyceniu wodą od ilości popiołu lotnego i czasu dojrzewania mieszanek F6 CI z popiołem PLT [rysunek 4], można stwierdzić, że wartości te rosną wraz ze wzrostem ilości dodawanego popiołu lotnego. Mieszanki z dodatkiem 5% i 10% PLT osiągnęły maksymalne wartości wskaźnika nośności KWN po 7 dniach, które pozostały niezmiennie mimo upływu czasu. Natomiast wartości wskaźnika nośności mieszanek z dużą zawartością popiołu lotnego [15%] wzrastały aż do 28 dnia.

3.2. Porównanie właściwości mechanicznych F6 CI z dodatkiem PLO i PLT

Wszystkie badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego określono



Rys. 3. Zależność wartości wskaźnika nośności KWN od czasu namaczania w wodzie popiołu PLT

Fig. 3. Dependence of CBR values after soaking time of FAT

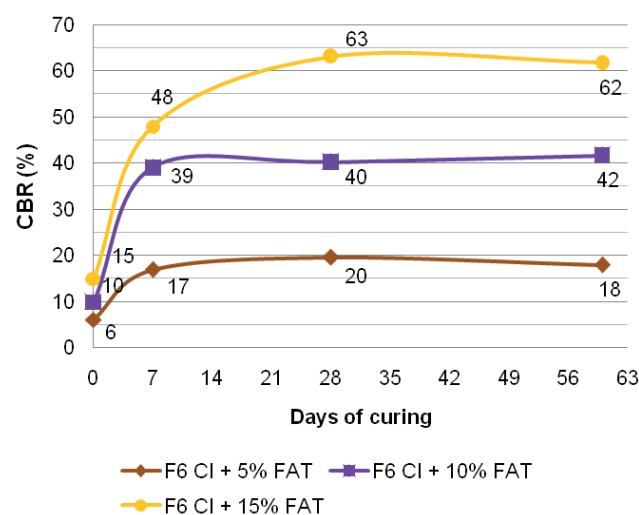
causes higher content of CaO in the composition of FAT and shape of grains.

Values of California bearing ratio [CBR] of calcareous fly ash FAT are presented in the Fig. 3. The measured CBR value immediately after soaking of sample was 20% and it increased 25 times to 500% after 28 days of curing. FAT fly ash hardens in the mixture with water without admixture or any binder. According to the results of dependence of CBR values after soaking of fly ash and time of curing of the mixtures of F6 CI and FAT [Fig. 4] can be considered, the values increase with increasing fly ash addition. The mixtures with 5% and 10% of FAT achieve the maximum of CBR values after 7 days and subsequently did not change over time. On the other hand, CBR values of the mixtures with high share of fly ash [15%] increased up to 28 days.

3.2. Comparison of mechanical properties of F6 CI treated by FAO and FAT

All tests were carried out under laboratory conditions. A maximum dry density [MDD] was set by Proctor Standard test. MDD values of untreated soils were 1850 and 1730 kg·m⁻³, respectively. Measured values of all samples are shown in the Fig. 5. Addition of fly ash caused the reduction of the maximum dry density of the mixtures about 100 kg·m⁻³ for F6 CI with siliceous fly ash FAO. In the case of the mixtures with FAT fly ash MDD decreased of about 250 kg·m⁻³.

Tested mixtures of F6 CI + FAO exceeded minimal demanded value of IBI [min = 10%] for treating soils and values were not considerably different [Fig. 6]. Siliceous fly ash FAO alone did not cause any hydraulic behaviour of mixtures. Loess loam treated by FAT had lower bearing capacity immediately after compaction, due to higher content of clay components [in range of 4–15%]. The highest change was observed in the case of both mixtures with 15% addition of fly ash.



Rys. 4. Zależność wartości wskaźnika nośności KWN po nasyceniu wodą w wodzie mieszanek F6 CI z PLT od ilości dodanego popiołu lotnego i czasu dojrzewania

Fig. 4. Dependence of CBR values after soaking time of the mixtures of F6 CI with FAT on the amount of fly ash and time of curing

wykonując normowe badanie Proctora. Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntów bez dodatku popiołu wynosiły odpowiednio 1850 i 1730 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Uzyskane wartości dla wszystkich próbek pokazano na rysunku 5. Dodatek popiołu lotnego spowodował zmniejszenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego mieszanek o około 100 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ w przypadku F6 CI z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego PLO. Natomiast w przypadku mieszanek z popiołem lotnym PLT wartości te zmalały o około 250 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

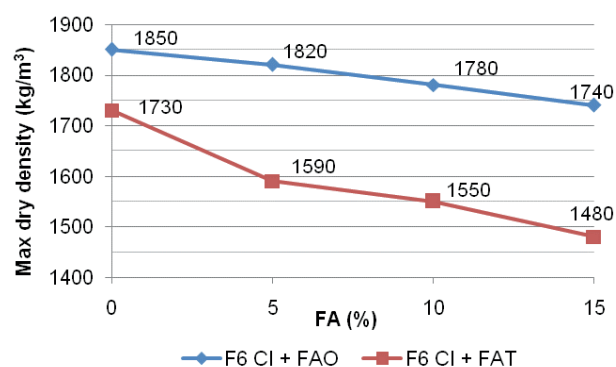
Badane mieszanki F6 CI + PLO przekraczały wymaganą minimalną wartość natychmiastowego wskaźnika nośności [min = 10%] dla gruntów uzdatnianych, a uzyskane wartości nie różniły się znacząco [rysunek 6]. Sam popiół lotny krzemionkowy PLO nie wpływał na poprawę właściwości hydraulicznych mieszanek. Głina lessowa z dodatkiem PLT miała gorszą nośność bezpośrednio po zagęszczaniu, co było wynikiem dużej zawartości frakcji ilowej [w zakresie 4–15%]. Największą zmianę zaobserwowano w przypadku obu mieszanek z dodatkiem 15% popiołu lotnego.

Zmiany objętości [pęcznienie] stanowią kluczowy parametr w przypadku popiołu lotnego. Ograniczają one jego wykorzystanie do uzdatniania gruntów wykorzystywanych do budowy dróg. Pęcznienie liniowe bada się na próbce w formie do badania wskaźnika nośności KWN po 3 dniach dojrzewania w wodzie, zgodnie z czeskimi Wymaganiami Technicznymi TP 93. Wszystkie próbki spełniały czeskie wymagania dotyczące zmian objętości [$L_s \leq 3\%$, rysunek 7]. Wartości pęcznienia liniowego próbek F6 CI + FAT były bardzo małe 0,1% – 0,7%. Krzywe pęcznienia liniowego gruntów z PLO uwiarydlały malejącą tendencję do pęcznienia wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego krzemionkowego.

4. Wnioski

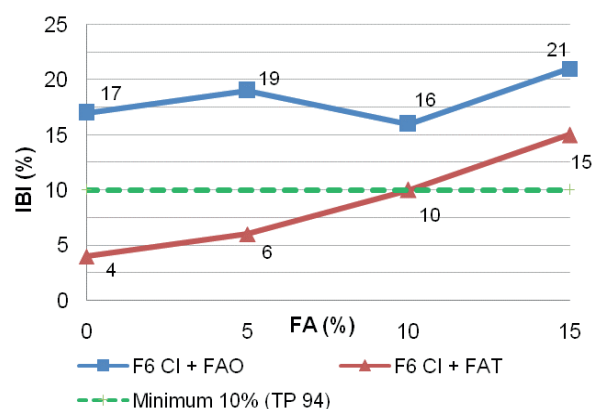
Na podstawie wyników badań laboratoryjnych mieszanek gliny lessowej z regionu Moraw [F6 CI] z popiołami lotnymi krzemionkowym i wapiennym, można przedstawić następujące wnioski:

1. Badane próbki popiołu lotnego krzemionkowego i wapiennego mogą być stosowane do uzdatniania gruntów.
2. Właściwości mechaniczne gruntów zależą od składu ziarnowego oraz zawartości frakcji ilowej. Wpływają one głównie na wilgotność oraz nośność.
3. Popiół lotny wapienny z elektrowni przy hucie żelaza i stali w Trzyńcu wykazuje właściwości hydrauliczne, a jego wartość wskaźnika nośności KWN wynosiła 500% po 28 dniach dojrzewania. Dodatek tego popiołu lotnego spowodował zmniejszenie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego uzdatnionych gruntów oraz zwiększenie wytrzymałości na ścinanie, a także wpłynął na kontrolę zmian objętości.
4. W przyszłości można wykonać badania sprawdzające właściwości mieszanek na dużą skalę na miejscu budowy, przy zastosowaniu odpowiedniego sprzętu.



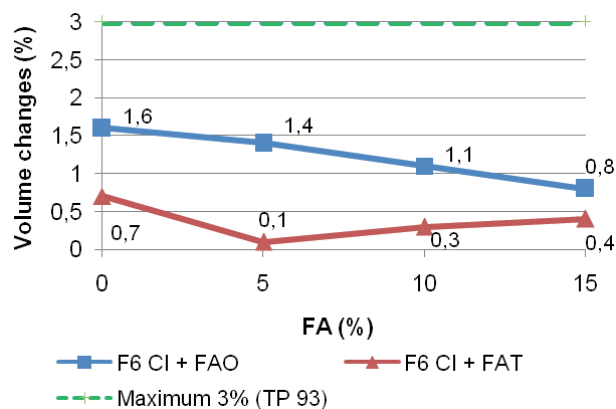
Rys. 5. Wpływ dodatku popiołu lotnego na maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego mieszanek F6 CI z popiołem lotnym

Fig. 5. The influence of the fly ash addition on the maximum dry density of the mixtures of F6 CI with fly ash



Rys. 6. Wpływ dodatku popiołu lotnego na natychmiastowy wskaźnik nośności mieszanek F6 CI z popiołem lotnym

Fig. 6. The effect of fly ash addition on the IBI values of the F6 CI mixtures with fly ash



Rys. 7. Pęcznienie liniowe próbek F6 CI z dodatkiem popiołu PLO i PLT

Fig. 7. Linear swelling of F6 CI treated with fly ashes FAO and FAT

Volume changes [swelling] represent a crucial parameter of fly ash. They limit its utilisation as treatment of ground in road construction. Linear swelling is measured in the CBR mould after 3 days of curing in wet conditions, according to the Technical Requirement TP 93. All samples fulfilled requirements of Czech specification regarding value of volume changes [$L_s \leq 3\%$, Fig. 7]. Values of

Podziękowanie

Autorzy pragną podziękować za wsparcie finansowe uzyskane w ramach Konkursu Grantów Studenckich VŠB-TUO - Projekt nr SP2017/155.

Literatura / References

1. American coal ash association, *Fly ash facts for highway engineers* (Washington DC:FHWA) 2003.
2. P. Fečko, *Fly ash* (Ostrava: Editorial Centre VŠB-TU Ostrava) 2003.
3. F. Kresta, *Secondary materials in highway construction* (Ostrava: Editorial Centre VŠB-TU Ostrava) (2013).
4. V. Mencl, *Mechanics of soils and rock rocks* (Prague: Academia) 1966.
5. J. Brandštetr, J. Havlica, Phase composition of solid residues of fluidized bed coal combustion quality tests and application possibilities, *Chemical Papers* **50**188-194 (1996).
6. A. Mezencevová, Possibilities of utilizing power plant fly ashes, *Acta Montanistica Slovaca* **8**146-151(2003).
7. F. Michalíková, M. Sisol, I. Krinická, Chemical and mineralogical properties of ash of coal combustion in thermal power plants *Waste forum* **11**, 15-16 (2010).
8. L. K. A. Sear, *Properties and use of coal fly ash* (London: Thomas Telford Ltd) 2001.
9. L. Bulíková, F. Kresta, Mineralogical and mechanical properties of fly ash produced by AMO power station with respect to soil treatment, *Euro-CoalAsh 2017* (Brno).
10. L. Bulíková, F. Kresta, Chemical properties of fly ashes produced in the Arcelor Mittal power station and the Třinec ironworks power station, *Advances in Environmental Engineering 2017* (Ostrava).
11. F. Kresta, Fly ash from the Předmostí a Prosenice tips - potential source of fill for the D1 Motorway section Přerov – Lipník nad Bečvou *Conference Fly ash in civil engineering 2015* (Brno) 141-51.
12. European Committee for Standardization (CEN) *Unbound and hydraulically boundmixtures, Part 2(EN 13286-2)* 2011.
13. European Committee for Standardization (CEN) *Unbound and hydraulically boundmixtures, Part 47 (EN 13286-47)* 2012.
14. European Committee for Standardization (CEN) *Specifications - Hydraulically boundmixtures, Part 15 (EN 14227-15)* 2016.
15. Ministry of Transportation Department of Roads, Design and construction of highway structures using fly and ash *Technical Requirement 93*, 2011.
16. Ministry of Transportation Department of Roads, Soil treatment *Technical Requirement 94*2013.

linear swelling of samples of F6 CI + FAT were very low 0.1% – 0.7%. The curves of linear swelling development in the case of soils with FAO indicate decreasing tendency to swelling, when the addition of siliceous fly ash is increased.

4. Conclusions

Based on results of laboratory tests of mixtures of loess loam from the Morava region [F6 CI] with siliceous and calcareous fly ashes, following conclusions can be drawn:

1. Tested siliceous and calcareous fly ashes have the potential for soil treatment.
2. The mechanical properties of soils depend on the particle size distribution and the share of clay components. They influence water content and bearing capacity principally.
3. Calcareous fly ash from the Třinec Ironworks Power Station shows the hydraulic properties and its CBR value was 500% after 28 days of curing. Addition of fly ash reduces maximum dry density of treated soils and increases shear strength as well as controls volume changes.
4. The next step in the future research would be to check the mixture properties in large-scale tests on construction site using the appropriate machinery.

Acknowledgement

Financial support is gratefully acknowledged through the Student Grant Competition VŠB-TUO - Project No. SP2017/155.