

Wpływ popiołu lotnego na wybrane cechy mechaniczne gruntów organicznych



dr inż.

WITOLD TISLER

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska

ORCID: 0000-0003-1501-8097



DOMINIK MACIEJEWSKI

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska

ORCID: 0009-0007-4986-9750



PAWEŁ MARKOWSKI

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska

ORCID: 0009-0008-6134-8082



MATEUSZ MICHALSKI

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska

ORCID: 0009-0003-7161-224X



MARTA MOROZ

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska

ORCID: 0009-0005-9297-0067

Wzmacnianie gruntów polega na poprawie ich właściwości poprzez dodawanie spoiw, których zadaniem jest ulepszenie charakterystyk materiałowych. Najpopularniejszym jest cement, który jednak jest drogi i nieekologiczny. Poszukiwane są zatem inne, zamienne rozwiązania, a jednym z nich jest popiół lotny. Badania przedstawione w literaturze udowadniają, że dodatek w postaci popiołu może pozytywnie wpływać na parametry wytrzymałościowe, co zostało potwierdzone w niniejszej pracy.

Pod względem morfologicznym Polska jest krajem nizinnym, tzn. średnia wysokość terenu nad poziomem morza nie przekracza 300 m [1, 2]. W całym obrębie kraju rozwinięta jest sieć rzeczna, a na północy wskutek działalności lądolodu powstały liczne jeziora. Środowisko to jest idealne do rozwoju obszarów, na których występują gleby organiczne. Działalność lądolodu i towarzyszące mu stadia lodowcowe oraz interglacjalne przyczyniły się do pokrycia obszaru (szczególnie w północnej Polsce) warstwami gleb słabonośnych o dużej miąższości. Grunty te zazwyczaj klasyfikowane są jako organiczne, co bardzo często wiąże się z koniecznością ich wzmocnienia [3]. Składają się one ze szkieletu, przestrzeni porów (wypełnionych wodą i/lub gazem) oraz materii organicznej. W Polsce najczęściej występującymi gruntami organicznymi są: torf, namuł oraz gytia. Szacuje się, że zajmują one około 5,5% powierzchni Polski [1]. Grunty te charakteryzują się dużą ścisłością, plastycznością oraz bardzo niską wytrzymałością. Ze względu na złożoność struktury organiki

określenie cech materiałowych jest stosunkowo skomplikowane, co związane jest z dużą podatnością na uszkodzenia pobieranych próbek.

Badania zarówno cech fizycznych, jak i mechanicznych gruntów organicznych oraz spoiw są obecnie przedmiotem wielu prac badawczych, np. [4, 5, 6]. Wykorzystywanymi dodatkami są cementy różnych klas, wapno palone czy popiół lotny, ale również rzadziej używane materiały, takie jak montmorylonit [7]. W niektórych pracach wymienione materiały przekształcane są w nanomateriały, aby sprawdzić, czy zmiana kształtu i powierzchni cząstek na poziomie nanostruktur wpływa na poprawę wytrzymałości mieszanki w porównaniu do materiałów tradycyjnych [8].

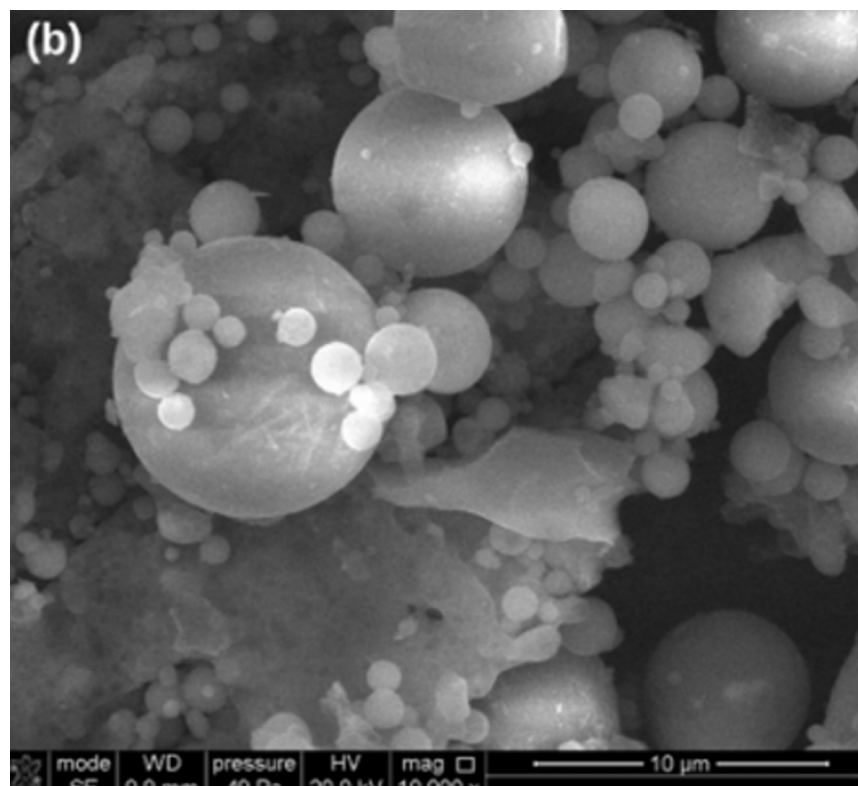
W pracy [6] opisano wpływ ilości cementu (typ popiołowy-portlandzki klasa 32R) na wytrzymałość jednoosiową próbek. Próbkę uformowano w cylindrycznych kształtach i obciążono naprężeniem 18 kPa. Po 7 oraz 28 dniach zbadano je w prasie jednoosiowej, uzyskując wzrost wytrzymałości, który nie różnił się jednak w odniesieniu do czasu dojrzewania. Z kolei w [4] wykonano podobne



badania dla różnych gruntów organicznych: torf, namuł, kreda jeziorna. Po wymieszaniu z cementem hutniczym oraz popiołem uformowano walce i obciążono 18 kPa na okres 28 dni. Najlepsze wyniki uzyskano dla kredy jeziornej, natomiast najgorsze (ponad 10-krotnie niższe) dla torfu. Tłumaczy to duża zawartość reagującego tlenu wapnia, w który bogata jest kreda. Warty odnotowania fakt to skok wytrzymałościowy w każdej z mieszanin otrzymany przy zwiększeniu masy stabilizatora ze 150 do 250 kg/m³. Kolejnym ważnym aspektem jest zastąpienie cementu popiołem, gdzie obserwuje się znaczny spadek wytrzymałości jednoosiowej. Inne bardzo obszerne badania przedstawiono w artykule [5]. Przebadano 3 różne rodzaje gruntu (o zawartości części organicznych 5, 6 oraz 27%) oraz 6 rodzajów popiołów lotnych o różnym składzie chemicznym. Przygotowanie próbek wykonano zgodnie z ASTM D5102-09 i zbadano moduł sprężystości oraz wytrzymałość jednoosiową. W każdej z prób uzyskano poprawę parametrów, jednakże nie zawsze wzrost ten wynikał ze wzrostu zawartości popiołu lotnego. Grunty o niższej zawartości części organicznych (około 5%) poprawiały swoje parametry kilkukrotnie, natomiast grunt organiczny posiadający 27% cząstek organicznych tylko nieznacznie. Autor w podsumowaniu zwracał uwagę na fakt zawartości organiki w badanych próbkach, która okazała się czynnikiem decyzyjnym w kontekście uzyskiwanych wytrzymałości.

Cel przeprowadzonych badań

Podłoże, w którym znajdują się grunty organiczne, pod względem inżynierskim określa się jako nienośne. Dlatego przed rozpoczęciem budowy konieczna jest wymiana tych gruntów na inne (o lepszych parametrach), wzmocnienie, stabilizacja lub konsolidacja. Pierwsza z tych metod jest najdroższa, a ostatnia wymaga dużej ilości czasu, co ściśle wiąże się ze współczynnikiem filtracji gruntu. Dlatego zdecydowanie częściej praktykuje się wzmocnienie lub stabilizację. Najstarszy sposób na stabilizację gruntu to procesy zachodzące w środowisku naturalnym, gdzie konsolidacja zachodzi w określonym czasie t. Natomiast rozwiązania mechaniczne obejmują fizyczną ingerencję w podłoże. Wiąże się to najczęściej ze zmieszaniem z jednym lub kilkoma dodatkami, a następnie zagęszczeniem. Jedną z najpopularniejszych metod jest metoda węgłnego mieszania gruntu – DSM. Polega ona na mieszaniu gruntu z cementem, wapnem palonym, popiołem lotnym, piaskiem drobnym lub żwirem. Najbardziej popularnym spoiwem ze wszystkich wymienionych jest cement, który określa się jako spoiwo hydrauliczne (wiąże na powietrzu i pod wodą). Powodem powszechnego zastosowania cementu są jego właściwości pucolanowe,



Rys. 1. Zdjęcie mikroskopowe popiołu lotnego użytego w badaniach

które w znacznym stopniu poprawiają parametry wykonywanej mieszanki. Niestety są one stosunkowo drogie oraz nieprzyjazne dla środowiska. Przykładowo na produkcję 1 tony cementu portlandzkiego zużywa się 5,6 GJ/t energii oraz powoduje to emisję 0,9 t CO₂ [9, 10]. Dodatkowo w wielu dużych krajach, takich jak USA, Chiny czy Indie, utylizacja popiołu powstającego w wyniku spalania odpadów wynosi około 50% i ciągle pracuje się nad jej zwiększeniem [11], do czego mogłoby się przyczynić wykorzystanie w inżynierii. Z wymienionych powodów naukowcy poszukują materiałów, które mogłyby zastąpić cement czy wapno. Jak dotąd najbardziej popularnym z nich jest popiół lotny, który również przejawia właściwości pucolanowe. Produkt ten nie pozostawia śladu węglowego, ponieważ sam w sobie jest produktem powstającym podczas spalania [11].

Popiół lotny według PN-EN 450-1:2012 to drobno uziarniony pył składający się głównie z kulistych, zeszkliwionych ziaren (rys. 1), otrzymany przy spalaniu pyłu węglowego, przy udziale lub bez udziału materiałów współspalanych, wykazujący właściwości pucolanowe i zawierający przede wszystkim tlenki glinu i krzemu. Według amerykańskiej normy ASTM C618-12 (2022) [12] popioły dzielą na dwie klasy: C, F. Klasa C ma zawartość CaO większą niż 10%, klasa F mniej niż 10%. Natomiast popioły niemieszczące się w wymienionych klasach zalicza się do typu N (nieklasyfikowany). Popioły lotne klasy F, np.

popioły krzemionkowe, niskowapienne są najbardziej powszechne i pochodzą ze spalania węgla bitumicznego. Z kolei do klasy C zaliczane są popioły wysokowapienne, powstałe ze spalania węgla subbitumicznych i lignitów. Oba typy popiołów są bogate w tlenki krzemu oraz glinu, co w procesie hydratacji sprzyja rozwojowi reakcji pucolanowych.

W niniejszych badaniach skupiono się na popiole klasy F, aby odpowiedzieć na pytanie, czy mimo mniejszej zawartości tlenu wapnia można używać go jako potencjalnego wzmocniacza gruntów słabonośnych. Na próbkach namułu przeprowadzono badania laboratoryjne w celu określenia wpływu popiołu lotnego na jednoosiową wytrzymałość gruntów oraz zastosowania go jako potencjalnego zamiennika dla cementu. Jako parametr identyfikujący przyjęto jednoosiową wytrzymałość gruntu – q_u , która używana jest do określenia innych cech materiałowych, np. wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu [9, 13, 5, 14].

Materiały i metoda badawcza

Skład chemiczny popiołu lotnego użytego na potrzeby badań zbadano w pracowni analiz instrumentalnych na Wydziale Chemii UMK. Na podstawie analizy SEM (ang. scanning electron microscope) określono skład chemiczny, który przedstawia tab. 1. Proporcje określono, podając przedziaty z uwagi na trzy różne miejsca pobrania popiołu z próbek reprezentatywnych. Na podstawie niskiej zawartości CaO oraz wysokiej zawartości

Tab. 1. Skład chemiczny popiołu lotnego użytego w badaniach

Tlenki	Proporcje [%]
SiO ₂	38.00~41.15
Al ₂ O ₃	25.55~27.88
Fe ₂ O ₃	10.87~11.94
CaO	2.73~3.16
MgO	2.46~3.22
Na ₂ O	2.83~3.20
K ₂ O	1.88~2.85
SO ₃	0.97~1.20
TiO ₂	1.43~1.54
P ₂ O ₅	0.73~0.94

Al₂O₃ oraz SiO₂ zdefiniowano klasę popiołu lotnego jako F.

Próbki gruntu organicznego, dla których wykonano badania, zostały pobrane na terenie portu gdańskiego z głębokości 5–7 m p.p.t. i znajdowały się poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej. Po pobraniu przechowywano je w pojemniku wykonanym z tworzywa sztucznego, umieszczonym w piwnicy budynku, aby utrzymać stałą temperaturę i zapobiec ewentualnemu niepożądanemu działaniu światła słonecznego. Na podstawie zawartości części organicznych określono rodzaj gruntu organicznego jako namuł. Po wyjęciu z pojemników próbki gruntu mieszano przez 60 sekund w ściśle określonych proporcjach (tab. 2.). Ilość dodatków podana

Tab. 2. Proporcje dodatków użytych w badaniach

Grunt organiczny [%]	Dodatek [%]		
	Cement (7 dni)	Cement (28 dni)	Popiół lotny (7 dni)
100	0	0	0
95	5	5	5
90	10	10	10
85	15	15	15
80	20	20	20
75	25	25	25

w tabeli odnosi się do suchej masy szkieletu gruntowego.

Mieszanki (po dwie dla każdej proporcji) umieszczono w specjalnie przygotowanych formach (rys. 2.), które następnie przeniesiono do wanny zawierającej wodę gruntową pobraną z miejsca pochodzenia próbek. Poziom wody dobrano w taki sposób, aby mieszanki znajdowały się pod wodą, co oddaje warunki in situ. Aby zapewnić pionowość próbek, przymocowano je do specjalnego stojaka. Następnym krokiem było obciążenie masą 4,33 kg, co w stosunku do średnicy rury sprowadzało się do naprężenia wynoszącego 20 kPa. Czas konsolidacji był zmienny i wynosił 7 oraz 28 dni w zależności od serii badawczej (patrz tab. 2.). Po zakończeniu dojrzewania próbek wykonano

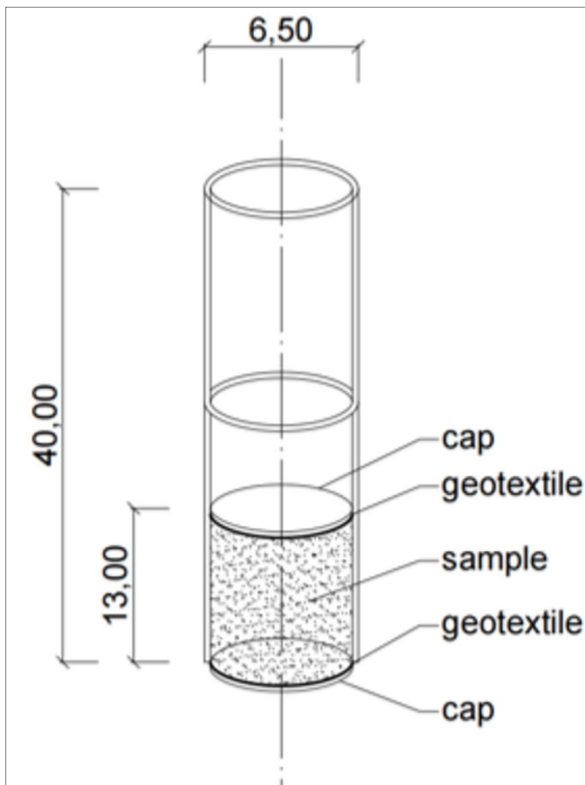
badania jednoosiowego ściskania ze stałą prędkością wynoszącą 2 mm/min w maszynie Zwick/Roell Z100. Badanie trwało do momentu osiągnięcia 30% odkształcenia, oprócz którego mierzono również zmianę wysokości próbki oraz naprężenie niszczące, które wartość przeliczono wg wzoru:

$$\sigma_a = \sigma \cdot \left(1 - \frac{\epsilon}{100}\right) \quad (1)$$

gdzie σ_a i σ to naprężenia ściskające, które odnoszą się odpowiednio do powierzchni przeliczonej oraz początkowej próbki, ϵ to odkształcenie.

Wyniki badań

Przykładową krzywą uzyskaną w trakcie badania przedstawia rys. 3. oraz rys. 4. Kształt



Rys. 2. Zdjęcie badanych próbek (wymiarów podano w cm)

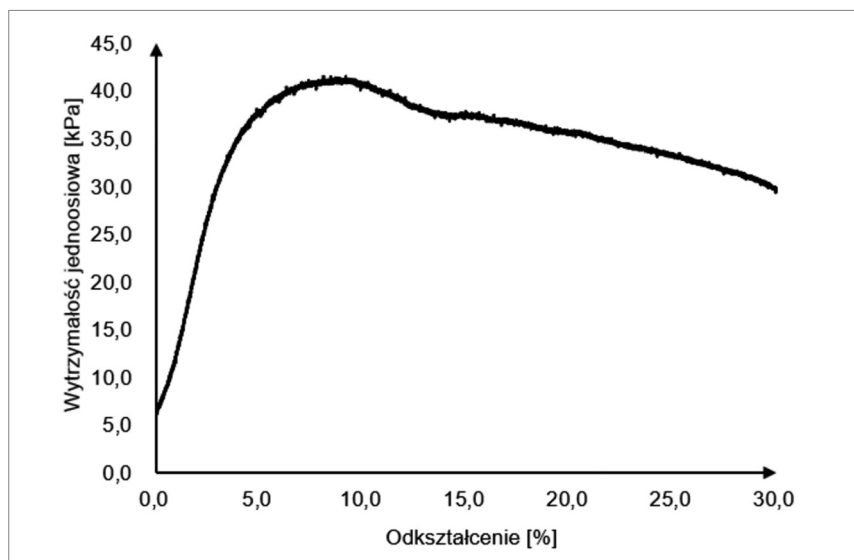
krzywej jest typowy dla wszystkich analizowanych mieszanek. Początkowo naprężenie jednoosiowe rośnie liniowo wraz z odkształceniem, a po osiągnięciu wartości maksymalnej maleje wraz ze wzrostem odkształcenia. W pierwszej części obserwujemy wzmocnienie materiału, natomiast w drugiej relaksację. Podsumowanie wytrzymałości jednoosiowej w zależności od dodatku przedstawiono na rys. 5. Wartości naprężeń odnoszą się do średniej wyciągniętej z dwóch niezależnych pomiarów. Dla gruntu organicznego naprężenie oscylowało wokół 12,5 kPa. Natomiast po dodaniu dowolnej ilości cementu lub popiołu obserwuje się wzrost wytrzymałości. Na podkreślenie zasługuje fakt uzyskania bardzo zbliżonych wyników dla cementu oraz popiołu lotnego po 7 dniach od wykonania badania. Z kolei dla dłuższego czasu dojrzewania (28 dni) wytrzymałość jest znacznie większa (o około 50%), co powodują procesy cementacji, które w ciągu 7 dni nie wystąpiły lub wystąpiły w niewielkiej skali.

Najwyższą wytrzymałość uzyskano dla dodatku cementowego przy 28-dniowym czasie dojrzewania. W tej serii wyniki były dwu- (dla dodatków 5, 10 oraz 15%) i trzykrotnie (dla dodatków 20 oraz 25%) większe niż dla gruntu rodzimego. Zauważalnie mniejszą, ale wciąż znaczącą poprawę otrzymano dla próbek dojrzewających 7 dni. Analizując wyniki dla popiołu lotnego, można zaobserwować, że są one bardzo zbliżone do cementu przy tygodniowej konsolidacji. Może się to wiązać z kilkoma czynnikami, m.in. warunkami dojrzewania, składem chemicznym gruntu oraz popiołu czy rodzajem cząstek organicznych znajdujących się w namule. Wszystkie te charakterystyki mogą decydować o zmniejszonej lub zwiększonej wytrzymałości [5]. Dokładne ich określenie wymaga jednak wykonania większej ilości badań, które dotyczyć będą również składu chemicznego badanego gruntu oraz stopnia rozkładu materii organicznej.

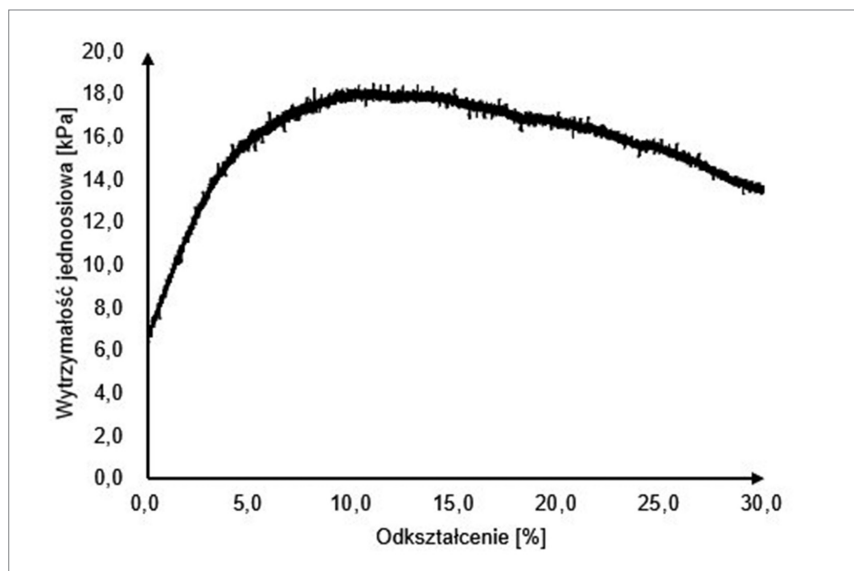
Podsumowanie i wnioski

Celem badań było określenie, czy stosując dodatek w postaci popiołu lotnego klasy F, jesteśmy w stanie poprawić cechy materiałowe gruntów organicznych. Odpowiadając na to pytanie, przeprowadzono badania gruntu organicznego klasyfikowanego jako namuł (orSi), który wzmocniono popiołem oraz cementem portlandzkim i konsolidowano w czasie od 7 do 28 dni. Po zakończonym procesie dojrzewania zbadano próbki w prasie, określając jednoosiową wytrzymałość na ściskanie. Najważniejsze wnioski zestawiono dalej.

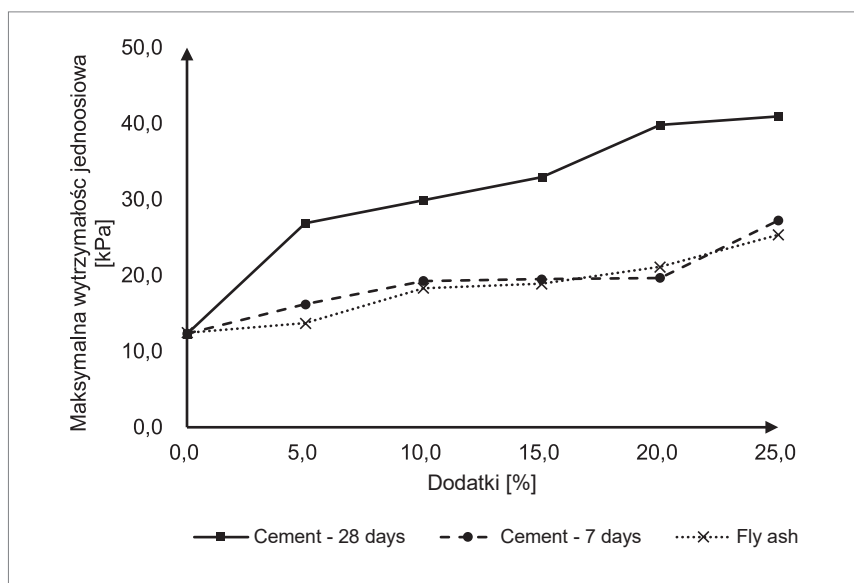
Zastosowanie dodatku zarówno w postaci cementu, jak i popiołu lotnego poprawia cechy wytrzymałościowe gruntu organicznego. Wzrost wytrzymałości ściśle wiąże się z czasem dojrzewania próbki.



Rys. 3. Zmiana wytrzymałości jednoosiowej dla próbek z zawartością 85% gruntu organicznego oraz 15% cementu po 28 dniach



Rys. 4. Zmiana wytrzymałości jednoosiowej dla próbek z zawartością 85% gruntu organicznego oraz 15% popiołu po 7 dniach



Rys. 5. Zmiana wytrzymałości jednoosiowej dla próbki z zawartością 85% gruntu organicznego oraz 15% cementu po 28 dniach.

Dla 7-dniowej konsolidacji różnice między mieszanką grunt–cement a grunt–popiół są nieznaczne. Natomiast dla 28-dniowego okresu dojrzewania cement charakteryzuje się znacznie wyższą wytrzymałością niż próbka gruntowo-popiołowa. W tym miejscu należy zaznaczyć, że badania dla popiołu i 28 dni dojrzewania nie zostały wykonane, jednak analizując skład chemiczny i niską zawartość tlenu wapnia, można zakładać, że szanse na uzyskanie realnych wzrostów wytrzymałości są niewielkie.

Popiół klasy F może być stosowany jako dodatek do gruntów organicznych. W porównaniu do popiołu klasy C charakteryzuje się jednak mniej korzystnym składem chemicznym, co może przełożyć się na wartości uzyskiwanej wytrzymałości. Dla wykorzystanego na potrzeby badań popiołu klasy F zawartość CaO na poziomie 3% spowoduje powstanie niewielkich ilości Ca(OH)₂. W związku z powyższym hydratacja, która sprzyja rozwojowi reakcji pucolanowych, nie zachodzi lub zachodzi bardzo powoli i nie ma wpływu na oczekiwany wzrost wytrzymałości mieszanki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Maksimow, A. (1965). Torf i jego użytkowanie w rolnictwie. Państw. Wyd. Roln. i Leśne.
- [2] Żurek, S. (1983). Stan inwentaryzacji torfowisk w Polsce. „Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie”, 7, 210–215.
- [3] Straż, G. (2018). Identyfikacja, oznaczenie oraz metody klasyfikowania gruntów organicznych w aspekcie Eurokodu 7 i norm związanych. „Przełęcz Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska”, 27(2) [80].
- [4] Filipiak, J. (2011). Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszanką popiołowo-cementową. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 13, 1043–1054.
- [5] Tasthan, E.O., Edil, T.B., Benson, C.H., and Aydišek, A.H. (2011). Stabilization of Organic Soils with Fly Ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(9): 819–833. American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000502.
- [6] Topoliński, S. (2018). TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF CEMENT STRENGTHENING OF SOFT ORGANIC SOIL. In 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018 (pp. 67–74).
- [7] Genest, S.C., Simpson, M. J., Simpson, A.J., Soong, R., McNally, D.J. (2014). Analysis of soil organic matter at the solid–water interface by nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Environmental Chemistry*, 11(4), 472–482.
- [8] Majeed, Z.H., Taha, M.R. (2013). A review of stabilization of soils by using nanomaterials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2), 576–581.
- [9] Jafer, H., Atherton, W., Sadique, M., Ruddock, F., Loffill, E. (2018). Stabilisation of soft soil using binary blending of high calcium fly ash and palm oil fuel ash. *Applied Clay Science*, 152: 323–332. doi:10.1016/j.clay.2017.11.030.
- [10] Zhang, X., Shen, J., Wang, Y., Qi, Y., Liao, W., Shui, W., Li, L., Qi, H., and Yu, X. (2017a). An environmental sustainability assessment of China's cement industry based on emergy. *Ecological Indicators*, 72: 452–458. doi:10.1016/j.ecolind.2016.08.046.
- [11] Noaman, M.F., Khan, M.A., Ali, K., Hassan, A. (2022). A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Clean. Mater.* 6, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100151>.
- [12] ASTM C618, 2022. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [13] Pokharel, B., Siddiqua, S. (2021). Effect of calcium bentonite clay and fly ash on the stabilization of organic soil from Alberta, Canada. „Eng. Geol.” 293, 106291. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106291>.
- [14] Turan, C., Javadi, A.A., and Vinai, R. (2022). Effects of Class C and Class F Fly Ash on Mechanical and Microstructural Behavior of Clay Soil—A Comparative Study. *Materials*, 15(5): 1845. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:10.3390/ma15051845.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.8437

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Tisler Witold, Maciejewski Dominik, Markowski Paweł, Michalski Mateusz, Moroz Marta, 2024, Wpływ popiołu lotnego na wybrane cechy mechaniczne gruntów organicznych, „Builder” 12 (329). DOI: 10.5604/01.3001.0054.8437

STRESZCZENIE:

Wzmacnianie gruntów polega na poprawie ich właściwości poprzez dodawanie innych materiałów lub spoiw. Obecnie stosuje się głównie wapno palone i cement, które są skuteczne, ale drogie i nieekologiczne. Produkcja cementu emituje znaczne ilości CO₂, dlatego poszukuje się alternatywy, którą może być popiół lotny. W niniejszej pracy do badań wykorzystano popiół lotny klasy F (wg ASTM) i sprawdzono czy mimo mniejszej zawartości tlenu wapnia jest w stanie być alternatywą dla cementu czy wapna. Przeprowadzono serię badań polegających na wymieszaniu gruntu organicznego (namut) z cementem oraz popiołem, a następnie zbadano wytrzymałość jednoosiową po 7 oraz 28 dniach. Uzyskane wyniki pokazują, że popiół może być alternatywą dla cementu. Kluczowy jest jednak okres dojrzewania oraz powstanie reakcji pucolanowych, których efektem jest wzrost wytrzymałości gruntu.

SŁOWA KLUCZOWE:

popiół lotny, wytrzymałość jednoosiowa, grunty organiczne, stabilizacja

ABSTRACT:

THE INFLUENCE OF FLY ASH ON SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF ORGANIC SOILS.

Stabilization of soils is strongly connected with improving their properties by adding other materials or additives. Currently lime and cement are the most popular due to pozzolanic properties. Unfortunately, there are expensive and ecological unfriendly. Production of cement emits significant amount of CO₂, therefore researches still search a reasonable alternative. One of them could be fly ash. In this work fly ash class F (according to ASTM) was used for experiments. The main goal of research was to answer the question whether, despite low CaO content fly ash could be an alternative for cement or lime. A series of tests was carried out, consisting of mixing organic soil (orSi) with cement and ash. Then the mixtures were testing in uniaxial compressive test after 7- and 28-days curing. The obtained results show that fly ash could be an alternative to cement. However, the key is the curing period and the occurrence of pozzolanic reactions which is crucial for increase in strength of the mixture.

KEYWORDS:

fly ash, uniaxial compressive strength, organic soil, stabilization