

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 199–206  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 199–206  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.19

**Stanisław ŁUKASIK, Marcin WITOWSKI**

Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu, Instytut Techniki Budowlanej  
Building Structures, Geotechnics and Concrete Department, Building Research Institute

## **Wyznaczanie maksymalnego modułu ścinania popiołów składowanych na składowisku mokrym Determination of the maximum shear modulus of ash stored in a landfill**

**Słowa kluczowe:** badania polowe SASW, CSWS, badania w aparacie trójosiowego ściskania, moduł ścinania, reakcja sprężysta, elementy piezoelektryczne typu *bender elements*  
**Key words:** SASW, CSWS field tests, triaxial compression tests, shear modulus, elastic reaction, bender element piezoelectric elements

### **Wprowadzenie**

Zastosowanie metody elementów skończonych (MES) do oceny stanu bezpieczeństwa wysokich nadpoziomowych składowisk popiołów, które są składowane w technologii mokrej, pozwala dokładniej prognozować reakcję bryły składowiska, zarówno w zakresie osiadań, jak i stateczności skarp. Wymaga to jednak ustalenia właściwych parametrów popiołów, w tym modułu odkształcenia postaciowego ( $G$ ). Wartość  $G_{\max}$

w zakresie bardzo małych odkształceń jest istotnym elementem charakterystyki sztywności gruntu. Metoda MES pozwala na połączenie w jednym procesie obliczeniowym analizy odkształceń oraz nośności przy jednoczesnym uwzględnieniu geometrycznej zmienności danego zagadnienia, zmiany warunków brzegowych w czasie budowy, a także skomplikowanej interakcji sztywnych elementów konstrukcyjnych z podłożem. Analiza numeryczna pozwala na uwzględnienie takich czynników jak nieliniowość w modelu konstytutywnym gruntu czy przestrzenność stanów deformacji i naprężeń. Ustalenie przebiegu krzywej degradacji sztywności popiołów wymaga wykonania badań terenowych oraz laboratoryjnych. Połączenie wyników z opisanymi w artykule metod pozwala opracować krzywą sztywności

w możliwie szerokim przedziale odkształceń. W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań  $G_{\max}$  dla popiołów dostarczanych na składowiska w postaci mieszaniny popiołowo-wodnej o różnym składzie fazowym.

## Badania terenowe oraz laboratoryjne

### Sprzęt terenowy i procedura

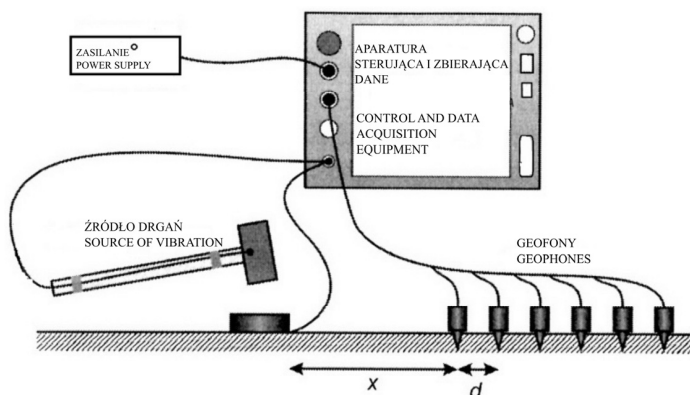
Metody sejsmiki powierzchniowej wykorzystujące fale Rayleigha nabierają coraz większego znaczenia praktycznego. Ich duży potencjał jako dodatkowego źródła danych wynika z nieinwazyjnego działania. Możliwe jest też uzupełnienie danymi interesującego obszaru między punktami badawczymi (wierceniami, sondowaniami), weryfikując zmienność parametrów sprężystych ośrodka gruntowego między nimi.

Wynikiem badań są profile sztywności gruntu, tj. rozkład zmienności maksymalnego modułu ścinania lub modułu odkształcenia wraz z głębokością. Zaletą badań jest możliwość ich wykonania na

każdym etapie inwestycji budowlanej. Wyniki badań z wymienionej metody znajdują zastosowanie m.in. w obliczaniu osiadań, kontroli zagęszczania lub konsolidacji podłoża gruntowego czy też modelowaniu współpracy budowli z podłożem za pomocą oprogramowania wykorzystującego MES.

W badaniach wykorzystywane są dwie metody: SASW (ang. *spectral analysis of surface waves*) i CSWS (ang. *continuous surface wave system*).

W systemie SASW fale wzbudza się przez uderzenie młotkiem bądź innym przedmiotem (w zależności odżądanego zakresu częstotliwości). Generowane jest szerokie spektrum częstotliwości. Fala rozchodzi się promieniście od źródła (podobnie jak fala na powierzchni wody) i dociera do geofonów (od 2 do 6) rozstawionych w linii prostej od źródła, w znanych odległościach (rys. 1). Metodami numerycznymi, używając FFT (ang. *fast Fourier transform*), analizuje się sygnały elektryczne wzbudzone na geofonach, aby znaleźć przesunięcie fazowe fali na każdym z nich.



RYSUNEK 1. Układ badawczy aparatury w systemie SASW  
FIGURE 1. Test system of the apparatus in the SASW system

System CSWS różni się od SASW obecnością sterowanego komputerem wibratora o masie inercyjnej 63 kg. Dzięki niemu możliwe jest ciągle generowanie fali o dowolnej częstotliwości w zakresie 6–600 Hz. Pozwala to dużo dokładniej kontrolować warunki badania, związane z tym, że im mniejsza częstotliwość fali powierzchniowej, tym większa strefa sprężystych odkształceń gruntu. Zmieniając zatem zakres częstotliwości generowanych fal powierzchniowych, uzyskuje się różną głębokość badania. Znając przesunięcie fazowe fali ( $\varphi$ ) na poszczególnych geofonach, których rozstaw ( $d$ ) również jest znany, można obliczyć długość fali ( $\lambda$ ):

$$\lambda = 360 d / \varphi \text{ [m]}$$

Z długości fali oraz z jej częstotliwości obliczana jest prędkość rozchodzenia się fali powierzchniowej Rayleigha ( $V_R$ ):

$$V_R = \lambda f \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$$

Między prędkością fali Rayleigha a prędkością fali poprzecznej ( $V_s$ ) istnieje zależność:

$$V_s = P V_R, \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$$

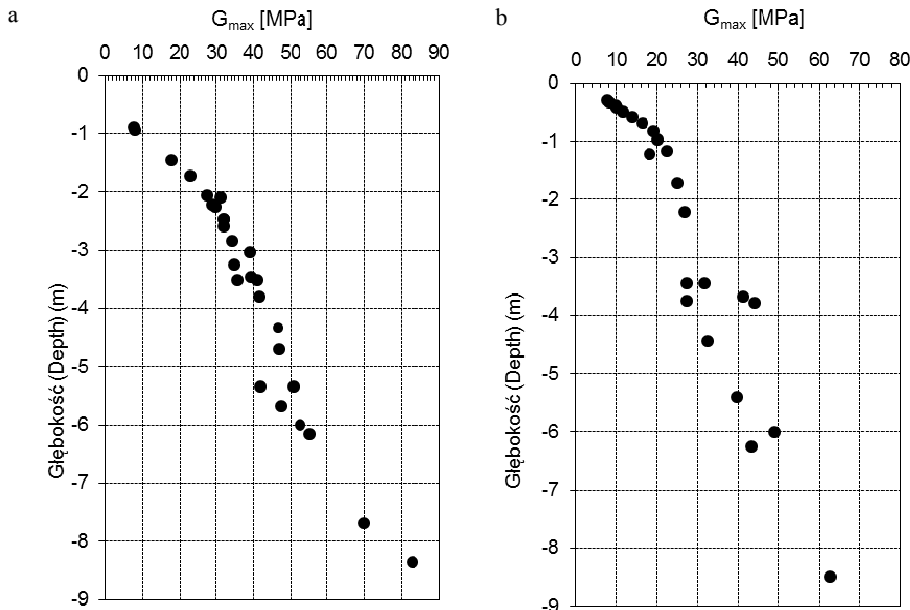
gdzie:

$P$  – parametr zależny od współczynnika Poissona (dla  $\nu = 0,25$   $P = 1,09$ , a dla  $\nu = 0,50$   $P = 1,05$ ), średnio przyjmuje się najczęściej  $P = 1,07$ .

Z prędkości fali poprzecznej i gęstości objętościowej ( $\rho$ ) gruntu obliczana jest maksymalna wartość modułu ścinania ( $G_{max}$ ):

$$G_{max} = \rho V_s^2 \text{ [MPa]}$$

Przykładowe rozkłady wartości maksymalnego modułu ścinania gruntu wraz z głębokością przedstawiono na rysunku 2.



RYSunEK 2. Rozkład wartości maksymalnego modułu ścinania ( $G_{max}$ ) popiołów na składowisku  
FIGURE 2. The distribution of the values of the maximum shear modulus ( $G_{max}$ ) of ashes in the storage site

Przedstawiony na rysunku 2 rozkład modułu ścinania otrzymano na podstawie inwersji krzywej dyspersji z wykorzystaniem metody czynnika podziału fali. W metodzie tej przyjęto założenie, że parametr sprężysty jest wyznaczany dla gruntu znajdującego się na głębokości odpowiadającej  $1/3$  długości danej fali powierzchniowej ( $\lambda/3$ ). W literaturze można spotkać także inne podejścia do zagadnienia inwersji. Wykorzystana w artykule metoda czynnika podziału długości fali jest wprawdzie najmniej dokładna, ale jest najprostsza.

Należy pamiętać, że wartość  $G_{\max}$  jest uzależniona od wielkości odkształceń postaciowych gruntu, które wystąpią jako efekt pracy w trakcie eksploatacji. Dla zagęszczonych gruntów sypkich oraz dla gruntów spoistych w stanie co najmniej półzwartym odkształcenia postaciowe są niewielkie i wartości modułów sprężystych odpowiadają średnio 80–90% wartości modułu maksymalnego, wyznaczonego z badań geofizycznych dzięki np. falom powierzchniowym typu Rayleigha.

### Aparatura laboratoryjna i procedura badawcza

Próbki popiołów zostały pobrane ze składowiska w postaci sześciennych bloków o długości boku wynoszącej 50 cm. Następnie w laboratorium próbki zostały przycięte do odpowiednich wymiarów umożliwiających badanie w komorze trójosiowej. Suspensja została zbadana w dwóch aparatach trójosiowych z zamontowanymi elementami piezoelektrycznymi typu *bender*. Pierwszy z aparatów jest wyposażony w generator sy-

gnałów typu TTi TGA1241, oscyloskop cyfrowy PicoScope 3203 oraz elementy piezoelektryczne typu 28-WF4077 produkcji Wykeham-Ferrance. W tym aparacie jest możliwość badania próbek o średnicy 70 mm oraz wysokości 140 mm. Drugi z aparatów jest wyposażony w zbudowane we własnym zakresie elementy typu *bender* (Lings i Greening, 2001; Witowski i Godlewski, 2017), dodatkowo jest wyposażony w generator sygnałów GW-Instek AFG 2012 oraz cyfrowy oscyloskop PicoScope 3203D (rys. 3). Aparat umożliwia badanie próbek o średnicy 38 mm i wysokości 75 mm. Procedura badawcza obejmowała nasycenie próbek do maksymalnej i do uzyskania wartości parametru  $B$  oraz konsolidacji izotropowej nasyconych wodą próbek. Po etapie konsolidacji przeprowadzano procedurę oznaczania prędkości fali poprzecznej. W celu zminimalizowania efektu *near-field* zastosowano metodę pomiaru pierwszego nadejścia fali (Dyvik i Madshus, 1985; Lee i Santamarina, 2005; Godlewski i Szczepański, 2012).



RYSUNEK 3. Standardowa komora trójosiowa z dodanymi elementami piezoelektrycznymi  
FIGURE 3. Standard triaxial cell with added piezoelectric elements

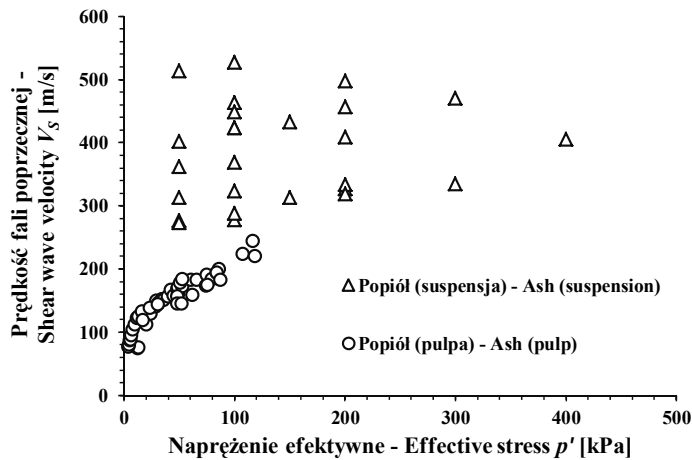
## Analiza wyników badań

Problem wyznaczenia parametrów geotechnicznych niezbędnych do oceny stanu bezpieczeństwa nadpoziomowych mokrych składowisk popiołów ma istotne znaczenie dla jego zaprojektowania i eksploatacji. Duże składowiska popiołów w Polsce są zwykle eksploatowane w systemie mokrym z uwagi na aspekty praktyczne (zapewniają większą efek-

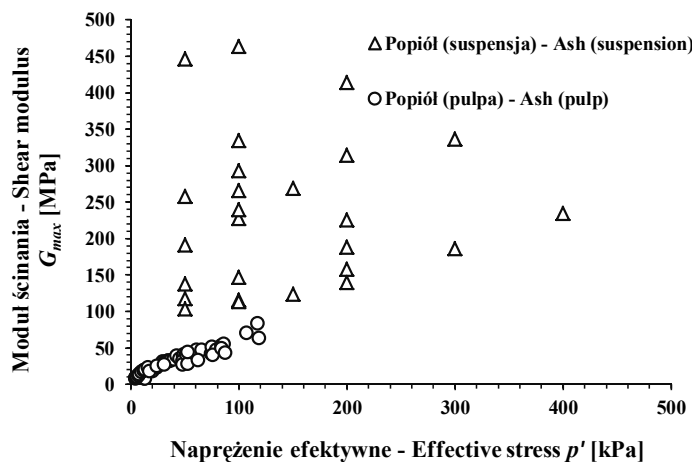
tywność). Stosunek wody do popiołu może być różny, najczęściej wynosi 10 : 1. W przypadku zmiany tego składu i ograniczenia ilości używanej wody (np. na 1 : 1), zakłada się, że zmieniają się także parametry wytrzymałościowe i sztywność namywanych warstw. Aby wykazać różne sztywności podłoża namytego w postaci pulpy i suspensji, przeprowadzono badania porównawcze metodą CSWS oraz metodą laboratoryj-

TABELA. Charakterystyka badanych suspensji, warunki badania oraz wyniki pomiarów  
TABLE. Characteristics of the suspensions tested, test conditions and measurement results

Numer próbki Sample number	Wilgotność Moisture content w [%]	Wskaźnik porowatości Void ratio e [-]	Gęstość objętościowa Volume density $\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Napężenie efektywne Effective stress $\rho'$ [kPa]	Parametr Skempton Skempton parameter B [-]	Prędkość fali poprzecznej Shear wave velocity $V_s$ [m/s]	Moduł ścinania Shear module $G_{max}$ [MPa]
1	55,3	1,44	1,59	50	0,96	402,4	257,9
2	61,6	1,60	1,56	100	0,72	464,0	335,0
3	63,3	1,62	1,56	150	0,87	312,8	124,0
4	102,9	2,73	1,40	50	0,95	312,9	137,8
5	101,4	2,82	1,40	100	0,87	323,4	146,4
6	43,5	1,22	1,66	100	0,89	369,0	227,7
7	69,6	1,88	1,52	200	0,91	327,0	188,6
8	49,1	1,28	1,34	300	0,86	335,0	186,5
9	78,5	2,10	1,48	100	0,93	423,9	266,0
10	76,9	2,03	1,51	200	0,87	457,4	314,0
11	77,3	2,00	1,53	300	0,99	470,1	337,0
12	138,9	2,09	1,69	50	0,93	513,7	446,6
13	140,2	2,07	1,67	100	0,85	527,3	463,9
14	142,3	2,14	1,67	200	0,93	498,0	414,6
15	85,9	2,22	1,49	50	0,93	277,0	117,4
16	86,7	2,21	1,50	100	0,93	277,5	116,0
17	71,9	2,14	1,41	200	0,93	334,3	157,8
18	93,1	2,43	1,45	50	0,93	362,3	191,7
19	93,4	2,48	1,46	100	0,92	448,4	293,0
20	93,7	2,58	1,43	150	0,88	432,6	268,6
21	103,7	2,21	1,64	100	0,83	423,7	239,5
22	97,4	2,61	1,42	200	0,88	409,1	225,6
23	97,2	2,59	1,43	400	0,84	405,3	234,6
24	98,2	2,21	1,38	50	0,83	273,5	103,3
25	101,1	2,61	1,36	100	0,88	287,9	113,1
26	97,9	2,59	1,37	200	0,95	319,3	139,4



RYSUNEK 4. Zależność między naprężeniem efektywnym a prędkością fali poprzecznej  
 FIGURE 4. The relationship between the effective stress and the velocity of the shear wave



RYSUNEK 5. Zależność między średnim naprężeniem efektywnym a wartością modułu sztywności  
 FIGURE 5. Relationship between effective stress and stiffness modulus value

ną z wykorzystaniem elementów piezo-elektrycznych typu *bender*.

W tabeli przedstawiono podstawowe parametry badanych suspensji oraz uzyskane wartości prędkości fali poprzecznej oraz wartości maksymalnego modułu ścinania.

Na rysunku 4 przedstawiono zestawienie wyników prędkości fali po-

przecznej w zależności od naprężenia efektywnego. Wyraźnie widać, że wraz ze wzrostem naprężeń wzrasta prędkość fali poprzecznej. Poza tym prędkości fali w próbkach suspensji osiągają ponad dwa razy większe wartości w stosunku do wartości uzyskanych metodami polowymi.

Moduł sztywności  $G_{\max}$  zależy od prędkości i gęstości ośrodka. Różnice między modułami sztywności popiołów są istotne z punktu mechaniki gruntów. Porównanie wartości modułów sztywności przedstawiono na rysunku 5. Wyraźnie widać, że popioły namywane w postaci pulpy mają mniejsze wartości niż suspensja popiołowa przy tych samych naprężeniach efektywnych. Badania na suspensji wykonano na próbkach w laboratorium, gdyż nie ma jeszcze dostępnego podłoża o wystarczającej grubości dla pulpy, aby zastosować również metodę CSWS.

## Wnioski

Prowadzone przez autorów badania wskazują na duże zróżnicowanie modułów sztywności popiołów dostarczanych na składowisko przy różnym udziale wody w mieszaninie.

Popioły sedymentujące w postaci pulpy o składzie woda i popiół w 10 : 1 mają zdecydowanie mniejsze wartości modułów sztywności niż popioły składowane w formie suspensji (1 : 1).

Ma to istotne znaczenie dla bezpieczeństwa eksploatacji składowiska. Namywanie popiołów w formie suspensji ma również duży wpływ na środowisko otoczenia, gdyż ogranicza powierzchnię terenu wymaganą do budowy składowiska, tzn. może ono być większe i mieć większe kąty nachylenia skarp.

## Literatura

Dyvik, R. i Madshus, C. (1985). Lab measurements of  $G_{\max}$  using bender elements. W *Proceedings of the ASCE Annual Convention*

*on Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions* (strony 186-196). New York: ASCE.

Godlewski, T. i Szczepański, T. (2012). Determination of soil stiffness parameters using in-situ seismic methods – insight in repeatability and methodological aspects. W *4th International Conference on Site Characteristics*, Porto Galinhas (strony 441-446). Boca Raton: CRC Press.

Lee, J-S. i Santamarina, J.C. (2005). Bender Elements: Performance and Signal Interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1063-1070. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:9\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1063))

Lings, M.L. i Greening, P.D. (2001). A novel bender/extender element for soil testing. *Géotechnique*, 51(8), 713-717. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.8.713>

Witowski, M. i Godlewski, T. (2017). Wykorzystanie piezoelementów typu bender w pomiarach propagacji fali podłużnej w gruntach. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 26(3), 307-316. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.3.30>

## Streszczenie

**Wyznaczanie maksymalnego modułu ścinania popiołów składowanych na składowisku mokrym.** Projektowanie nadpoziomowych składowisk popiołów składowanych w technologii mokrej wymaga oceny stanu bezpieczeństwa składowania (GEO). Wykorzystuje się do tego najczęściej metody elementów skończonych (MES), dla których należy podać parametry geotechniczne oznaczone w zakresie małych odkształceń. W artykule zostały porównane wyniki oznaczenia maksymalnego modułu ścinania uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych i polowych. Parametr ten pochodzi z teorii sprężystości i jest miarą reakcji materiału na obciążenia zewnętrzne w zakresie małych odkształceń ( $10^{-6}$ – $10^{-3}\%$ ). W analizie wyników zakłada się, że zakres małych odkształceń odpowiada reakcji gruntu na przyłożone

obciążenia zewnętrzne. W artykule przedstawiono zależności maksymalnego modułu ścinania w stosunku do naprężenia efektywnego oraz wskaźnika porowatości uzyskane na podstawie badań w komorze trójosiowej z zamontowanymi elementami piezoelektrycznymi typu *bender*. Do określenia  $G_{\max}$  *in situ* wykorzystano metody SASW/CSWS pozwalające zmierzyć prędkości fal akustycznych generowanych z powierzchni terenu. Wieloletnie doświadczenia autorów dowodzą, że ustalanie parametrów sztywności ośrodka w zakresie małych odkształceń ma podstawowe znaczenie dla oceny zachowania się podłoża pod wpływem zmiany naprężeń. Popioły namywane w postaci suspsji po związaniu charakteryzują się dużą wytrzymałością na ścinanie, a wyniki badań sztywności w zakresie małych odkształceń powinny stanowić podstawę ustalania parametrów do obliczeń nośności i stateczności metodami numerycznymi.

## Summary

**Determination of the maximum shear modulus of ash stored in a landfill.** The design of above-ground ash storage sites requires an assessment of the safety performance of the structure (GEO). This is usually done by using finite elements methods, for which the geotechnical parameters measured in the range of small deformations should be provided. The paper compares the results of the maximum shear modulus obtained on the basis of laboratory and field tests. This

parameter is derived from the theory of elasticity and is a measure of the material's reaction to external loads in the range of small deformations ( $10^{-6}$ – $10^{-3}\%$ ). The analysis of the results assumes that the range of low deformations corresponds to the response of the soil to the applied external loads. The paper presents the dependence of the maximum shear modulus on the effective stress and void ratio obtained on the basis of tests in a triaxial cell with piezoelectric elements. To determine  $G_{\max}$  *in situ*, SASW/CSWS methods were used to measure the velocity of acoustic waves generated from the ground surface. The authors' many years of experience prove that determining the parameters of stiffness of a medium in the range of small deformations is essential for assessing the behavior of the material under the influence of stress changes. Ash stored in the form of post-bonded suspension has a high shear strength and the results of small strain stiffness tests should form the basis for determining the parameters for numerical methods for resistance and stability calculations.

### Authors' address:

Stanisław Łukasik, Marcin Witowski  
Instytut Techniki Budowlanej  
Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki  
i Betonu  
02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21  
Poland  
e-mail: s.lukasik@itb.pl  
m.witowski@itb.pl