

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (1), 75–84  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (1)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (1), 75–84  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (1)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.1.07

**Tomasz SZCZEPAŃSKI<sup>1</sup>, Tomasz GODLEWSKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Zakład Geologii Inżynierskiej, Uniwersytet Warszawski  
Engineering Geology Department, University of Warsaw

<sup>2</sup>Zakład Konstrukcji Budowlanych i Geotechniki, Instytut Techniki Budowlanej  
Building Structures and Geotechnics Department, Building Research Institute

## **Wybrane aspekty prawidłowego doboru parametrów badania i weryfikacji wyników oznaczeń dla określania modułu sztywności ( $G_0$ ) w metodzie BET**

### **Some aspects of proper selection and verification of the test conditions for BET methods of soil stiffness modulus ( $G_0$ ) determination**

**Słowa kluczowe:** sztywność gruntu, moduł odkształcenia postaciowego ( $G_0$ ), metoda BET

**Key words:** soil stiffness, stiffness modulus ( $G_0$ ), BET method

#### **Wprowadzenie**

Jednym z aspektów dotyczących badań parametrów sztywności (mówimy też o parametrach sprężystości lub pseudosprężystości w zakresie małych odkształceń) jest brak spójnych wytycznych co do metodologii ich wykonywania. Dotyczy to między innymi metody BET (ang. *bender element test*). Metody badań z wykorzystaniem piezoelementów, mimo że znane i wykorzystywane od kilkudziesięciu lat (Dyvik i Madhus,

1985; Viggiani i Atkinson, 1995), nie doczekały się żadnych formalnych norm czy standardów. Opracowane były według kryteriów stworzonych na potrzeby kolejnych ośrodków badawczych i niekoniecznie mogą być uniwersalnie adaptowane. Mnogość rozwiązań konstrukcyjnych aparatury, spowodowana tym, że oprócz kilku rozwiązań dostępnych komercyjnie jest bardzo wiele urządzeń konstruowanych głównie w ośrodkach naukowych, nie pomaga w unifikacji. Aparaty te oprócz tej samej głównej zasady działania różnią się dość istotnie co do szczegółowych rozwiązań sprzętowych i oprogramowania. W celu usystematyzowania tego zagadnienia i próby oszacowania wpływu metodologii na wyniki pod auspicjami Japanese Techni-

cal Committee TC-29 przeprowadzono badania równoległe, których opublikowane rezultaty dają wgląd w skalę problemu (Yamashita i in., 2009). Niniejszy artykuł wpisuje się w próbę analizy niektórych zagadnień metodologicznych BET, a w konsekwencji ujednoczenia warunków i zasad wykonywania tych badań oraz ich interpretacji i jest kontynuacją badań autorów prowadzonych w tym kierunku (Godlewski i Szczepański, 2015a, b).

## Material i metody

Dwa aspekty w metodologii sejsmicznych badań sztywności mają podstawowe znaczenie. Pierwszy jest aspekt interpretacji czasu dojścia fali, druga jest kwestia doboru częstotliwości fali użytej w badaniu.

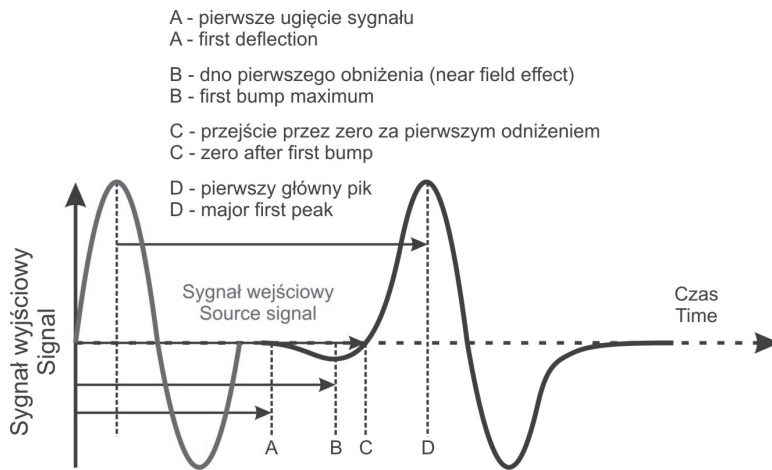
Jeśli chodzi o czas dojścia fali, to generalnie stosowane są trzy grupy metod: metoda korelacji krzyżowej, metoda analizy spektralnej i metoda obserwacyjna. Dwie pierwsze zaprzęgające aparat matematyczny to tematyka na osobny artykuł i nie będą tutaj analizowane. Warto jedynie wspomnieć, że nie są one powszechnie stosowane i nie zyskały zbyt wysokiej oceny w cytowanych analizach badań równoległych (Yamashita i in., 2009). Dalsze rozważania będą więc dotyczyły tej ostatniej metody, która pomimo wymuszonej subiektywności jest najpowszechniej stosowana.

Jednym z podstawowych elementów interpretacji badania BET metodą obserwacyjną jest określenie punktu charakterystycznego na krzywej rejestrowanego sygnału, określanego jako moment dojścia fali w układzie amplituda sygnału

– czas (ang. *time domain*). Wydaje się to znacznie prostsze niż jest w rzeczywistości, gdzie w wyniku różnych procesów (np. *near field effect*, odbicia i fale refrakcyjne i inne) sygnał wyjściowy jest na tyle zniekształcony, że stosowanie jednego uniwersalnego kryterium momentu dojścia fali nie jest możliwe. W związku z powyższym stosowane są w tej metodzie cztery podstawowe punkty charakterystyczne, nazywane A, B, C, D (zgodnie z rys. 1).

Przy porównywaniu wyników zawsze powinno się podawać, jaka metoda była zastosowana. Miarodajność wyniku przy zastosowaniu poszczególnych metod to jednak temat na zupełnie osobną dyskusję. Kolejna kwestia to próby zbiektywizowania interpretacji poprzez zastosowanie narzędzi, które w sposób automatyczny lub półautomatyczny mogłyby dokonywać interpretacji. Określony algorytm matematyczny ma teoretycznie szansę uwolnić nas od subiektywności interpretatora. Takim narzędziem jest oprogramowanie BEAT (udostępniane nieodpłatnie przez firmę GDS Instruments) (Rees i in., 2013). Program umożliwi automatyczną interpretację wyników wszystkimi wymienionych metod.

Drugim analizowanym aspektem metodycznym jest wybór częstotliwości fali użytej w badaniu. Różne częstotliwości dają odmienne wyniki, a nie wszystkie stosowane do badań urządzenia mają możliwość wyboru częstotliwości. Niestety ze względu na różnicowanie aparaturowe, ale również różnicowanie materiału gruntowego nie jest możliwe jednolite podejście. Jest jedna bardzo istotna i szeroko komentowana w literaturze wytyczna (Camacho i in., 2012;



RYSUNEK 1. Wyidealizowany obraz sygnału wejściowego i wyjściowego obrazującego falę S w badaniu BET (za Lee i Santamarina, 2005)

FIGURE 1. Idealized received signal output of the S wave (after Lee and Santamarina, 2005)

Godlewski i Szczepański, 2015b) powiązana z użytecznym zakresem częstotliwości. Jest to warunek mówiący, że długości drogi do długość fali ( $L/\lambda$ ) nie powinna być mniejsza niż 2, w niektórych przypadkach i gruntach 3 (sięgając według niektórych autorów nawet zakresu  $2 < L/\lambda < 9$ ; Camacho i in., 2012), z powodu na silne zjawiska związane z *near field effect* (Lee i Santamarina, 2005) zaburzające odebrany sygnał w sposób uniemożliwiający prawidłową interpretację. Rekomendacja TC-29 w tym względzie to wykonanie badań w zakresie szerszego spektrum częstotliwości i analiza wyników pod kątem ich spójności. Właśne przykłady obrazujące to zagadnienie przedstawiono w sekcji „wyniki”.

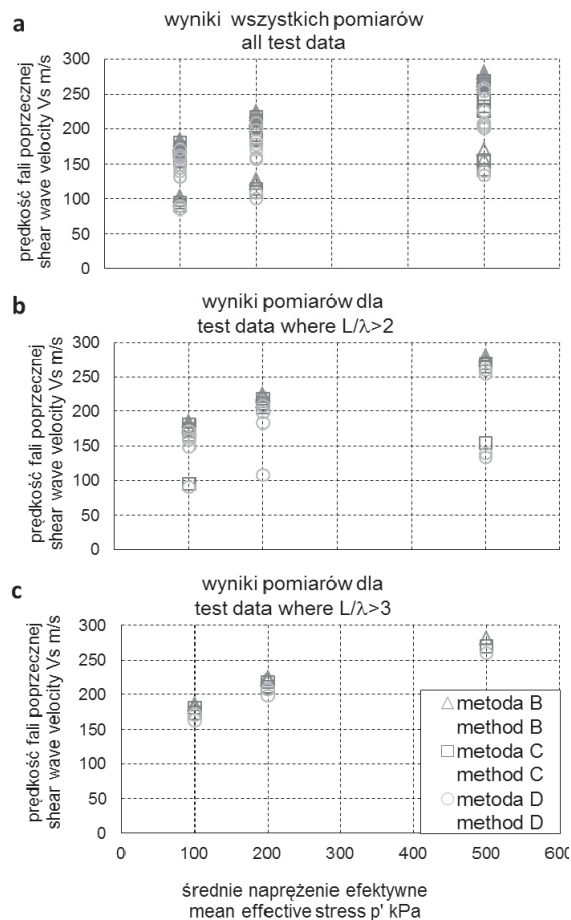
Badania przeprowadzono na dwóch grupach próbek. Pierwsze z nich to holocenijskie rzeczne piaski gruboziarniste pobrane z rejonu poletka testowego (Godlewski i Szczepański, 2015a) z głębokości 8 m. Drugie to ropy pliocenijskie

z rejonu Bełchatowa, pochodzące z szerokiego przedziału głębokości 17–108 m o różnym stopniu przekonsolidowania. Cykl badawczy na piaskach przeprowadzony był na próbkach o średnicy 70 mm i wysokości 135 mm, zagęszczonych początkowo do  $I_D = 0,5$ . Próbki obciążano do wartości średniego efektywnego naprężenia izotropowego ( $p'$ ) równego 100, 200, 500 kPa, przy stałym ciśnieniu wstecznym (ang. *back pressure*) równym 500 kPa. Przy każdym naprężeniu wykonywano serię pomiarów BET przy częstotliwościach 1–10 kHz, interpretując wyniki z użyciem metody obserwacyjnej dla punktów B, C, D przy użyciu oprogramowania BEAT. Badania na łąkach obejmowały 11 próbek (Szyszło, 2015). Pełen program to testy przy wartości średniego efektywnego naprężenia izotropowego ( $p'$ ) równego 100, 300, 600, 1000 kPa, przy częstotliwościach 1–10 kHz.

## Wyniki

Rysunek 2 reprezentuje zestawienie wszystkich wyników badań dla piasku. Punkty na wykresie zgrupowane wzdłuż pionowych linii dla poszczególnych naprężeń to wyniki otrzymane przy różnych częstotliwościach fali i interpretowane dla punktów B, C, D. Widoczny rozrzut

wartości prędkości fali poprzecznej reprezentuje niejako zróżnicowanie wyników, które potencjalnie uzyskaliby różni badacze dla tego samego materiału, używając różnych częstotliwości i oszacowań czasu przejścia fali. W takim przypadku konieczne jest filtrowanie i analiza wyników.

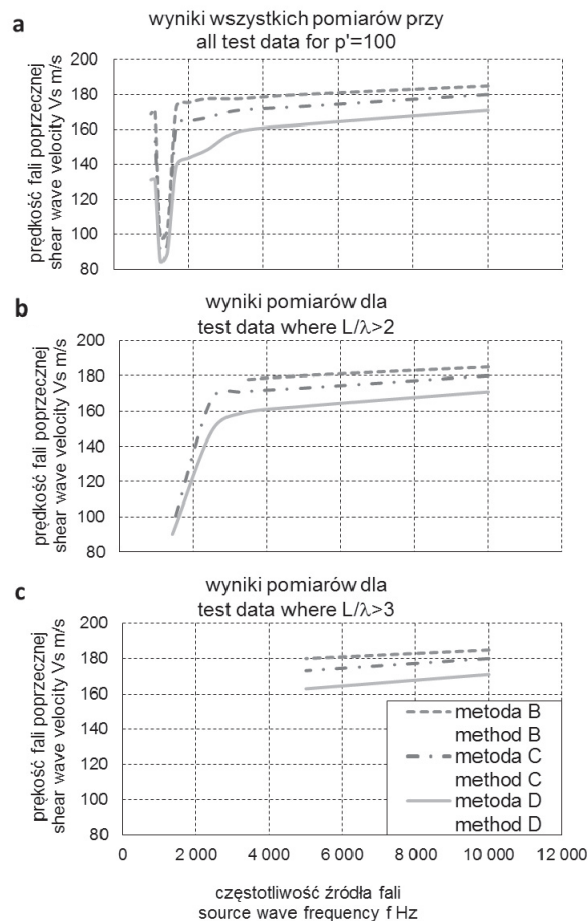


RYSUNEK 2. Wyniki badań dla holocenijskich piasków rzecznych, dla wszystkich naprężeń: (a) dla wszystkich użytych częstotliwości; (b) dane spełniające warunek  $L/\lambda > 2$ ; (c) dane spełniające warunek  $L/\lambda > 3$  (Godlewski i Szczepański, 2015a)

FIGURE 2. Test data on sand from the test site, for all effective stress: (a) data from all source wave frequencies; (b) data filtered to satisfy the condition  $L/\lambda > 2$ ; (c) data filtered to satisfy the condition  $L/\lambda > 3$  (Godlewski and Szczepański, 2015a)

Gdy analizujemy powyższe prędkości  $V_s$  dla jednego naprężenia w odniesieniu do częstotliwości fali, można zauważyć dużą niespójność w przebiegu trendów w zakresie niższych częstotliwości (rys. 3a). Po odfiltrowaniu danych wspomnianym wcześniej kryterium  $L/\lambda > 2$  (rys. 3b) pozbywamy się w tym przypadku części niewiarygodnych da-

nych. Dalsze zwiększanie dopuszczalnego progu  $L/\lambda$  (rys. 3c) pokazuje, że w tym przypadku warunek na poziomie wartości 3 pozwala na otrzymanie spójnych i wiarygodnych wartości  $V_s$ . Przedstawiona procedura analizy danych jest zobrazowaniem zaleceń TC-29, co do walidacji danych ze względu na znane



RYSUNEK 3. Wyniki badań piasku dla  $p' = 100$  kPa: (a) dane dla wszystkich użytych częstotliwości, (b) dane spełniające warunek  $L/\lambda > 2$ , (c) dane spełniające warunek  $L/\lambda > 3$  (Godlewski i Szczepański, 2015a)

FIGURE 3. Test data on sand from the test site, test with  $p' = 100$  kPa: (a) data from all source wave frequencies; (b) data filtered to satisfy the condition  $L/\lambda > 2$ ; (c) data filtered to satisfy the condition  $L/\lambda > 3$  (Godlewski and Szczepański, 2015a)

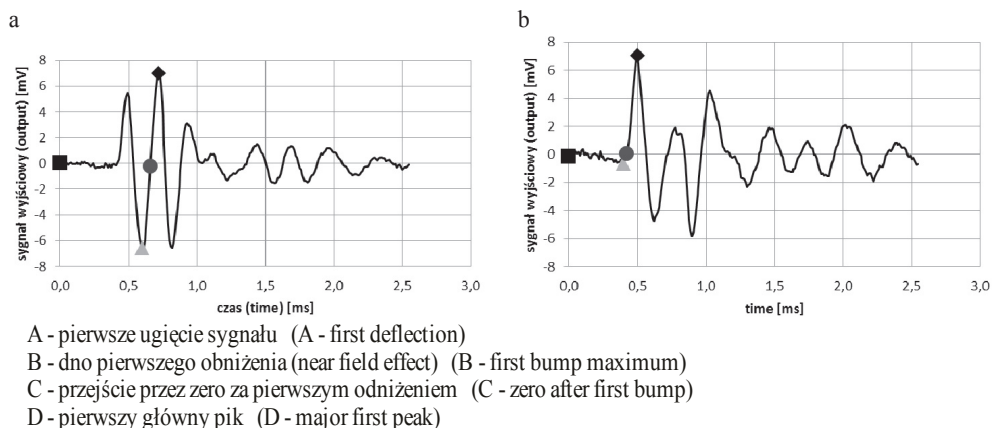
niekorzystne wpływy (w tym przypadku głównie efekt bliskiego pola).

Opisane powyżej badania dla piasku można traktować poniekąd jako sytuację modelową z uwagi na jednorodny materiał, kontrolowany stan zagęszczenia i naprężeń. Nieco inny charakter wykazywały wyniki badań gruntów ilastych z okolic Bełchatowa, o niejednorodnej litologii, granulometrii i stanie skonsolidowania (zróżnicowany stopień przekonsolidowania z uwagi na szeroki przedział głębokości). Ograniczenia objętościowe nie pozwalają na zamieszczenie tutaj wyników dla wszystkich 11 próbek, ponieważ ich indywidualny charakter okazał się mieć duży wpływ na rezultaty. W aspekcie powyższych rozważań autorzy chcieliby przedstawić przykład ilustrujący trendy i zjawiska obserwowane w pozostałych badaniach, będący do pewnego stopnia ich uogólnieniem.

Przykład ten będzie dotyczył drugiego aspektu metodycznego, a mianowicie automatyzacji interpretacji czasu dojścia fali. Wcześniej prezentowane badania

na piaskach pokazały dużą użyteczność stosowania narzędzia BEAT. Automataczne oszacowania czasu pokrywały się bardzo dobrze z wartościami otrzymanymi z interpretacji manualnej. Co więcej dla poszczególnych metod obserwacyjnych automatyka również dawała bardzo spójne w trendach wartości. Tym razem materiałem badawczym były silnie przekonsolidowane ility mio-plioceńskie, przy których badaniu wyniki analiz przejścia fali okazały się dużo trudniejsze w interpretacji. Próba stosowania oprogramowania BEAT wykazała duże niedoskonałości w stosowanych algorytmach i generalnie nie można ufać wynikom generowanym automatycznie (w stosowanej wersji oprogramowania).

Rysunek 4 przedstawia sygnały prawidłowo i nieprawidłowo zinterpretowane przez oprogramowanie. Widać, że sygnał po prawej jest bardzo przyzwoitej jakości (nie stanowi problemu dla manualnej interpretacji doświadczonego operatora). Wystarczyło jednak, żeby nie było w nim tak charakterystycznego



RYСУNEK 4. Poprawnie (a) i niepoprawnie (b) działający algorytm wychwytywania charakterystycznych punktów sygnału (oprogramowanie BEAT) (Szyszło, 2015)

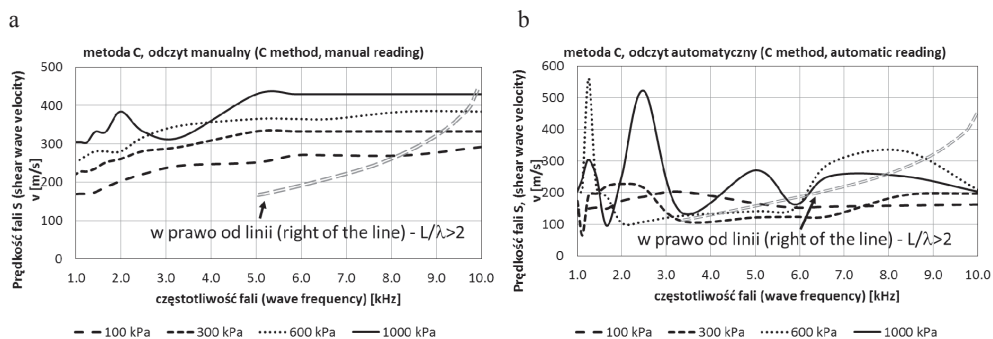
FIGURE 4. Correct (a) and incorrect (b) interpretation of the characteristic signal points (BEAT software) (Szyszło, 2015)

dla pomiarów fali S obniżenia przez nadjeściem pierwszego „piku”, a kolejny miał nieco większą amplitudę, aby algorytm źle umiejscowił punkty B, C, D, A – pierwsze ugięcie sygnału.

W zasadzie jedyne wiarygodne, miarodajne, powtarzalne wyniki otrzymano dla badanych iłów z interpretacji manualnej. Na dalszy plan przesunięto rozważania co do wykorzystania poszczególnych metod A, B, C, D, ponieważ rozbieżności spowodowane ich stosowaniem przy manualnej interpretacji są mniejsze (i bardziej przewidywalne) niż rozbieżności między interpretacją manualną a automatyczną. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki dla interpretacji metodą C, dla jednej z próbek iłu. Prędkości ukazane na wykresie po lewej obrazują prawidłowe tendencje wzrostu tego parametru wraz z przyrostem naprężenia izotropowego, oraz są porównywalne (co do wartości) z prędkościami z podobnych próbek badanej serii. Po prawej widać rezultaty interpretacji automatycznej tą samą metodą, niemające wiele wspólnego z rzeczywistością. Co więcej odczyty

automatyczne np. metodą B lub D, które w przypadku manualnej interpretacji dają bardzo zbliżony obraz z metodą C, tu generują odczyty dość przypadkowe i niepotwierdzające interpretacji automatycznej metodą C.

Analizując dodatkowo na tych danych kwestię doboru częstotliwości i filtrowania danych, możemy zauważyć, że w przypadku manualnej interpretacji zastosowanie łagodnego kryterium  $L/\lambda > 2$  (które reprezentuje na wykresie obszar w prawo od przerywanej linii) pozwala skorzystać z danych dla wszystkich obciążeń, choć nawet przy braku filtrowania danych nie ma wątpliwości co do stabilnych wartości prędkości uzyskanych dla częstotliwości powyżej 6 kHz. Odwrotnie jest dla danych z odczytu automatycznego, jakiegokolwiek kryterium nie pozwala odrzucić błędnych danych, ponieważ nie da się tu wychwycić ustalonej co do wartości prędkości części wykresów i wartości porównywalnych do referencyjnych (bo niebudzących interpretacyjnych wątpliwości) z odczytu manualnego.

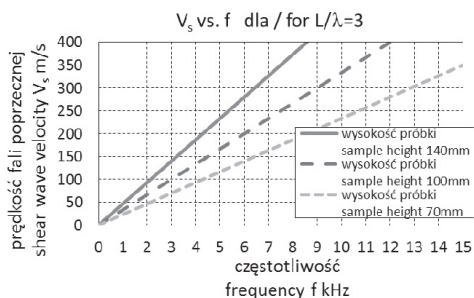


RYСУNEK 5. Interpretacja wyników pomiarów dla przykładowej próbki iłu metodą C w sposób manualny (a) i automatyczny programem BEAT (b)

FIGURE 5. Example test result interpretation with use of point C, manually (a) and automatically by BEAT (b)

## Podsumowanie i dyskusja

Aspekt doboru częstotliwości badania, w celu zminimalizowania wpływu niekorzystnych efektów *near field effect* na wyniki, jest jednym z podstawowych, jakie powinny być brane pod uwagę przy projektowaniu badań BET. Doświadczenie pokazuje, że wychwycenie wpływu tych zjawisk na obserwowany kształt pojedynczego sygnału wyjściowego czy to w trakcie manualnej interpretacji, czy wspomaganą oprogramowaniem nie jest wiarygodne, a często również nie jest możliwe. Dopiero wizualizacja wyników  $V_s$  w szerszym zakresie częstotliwości pozwala na wychwycenie zaburzeń w trendach. Tym niemniej pierwszym krokiem w planowaniu badań może być oszacowanie, jakie częstotliwości powinny być dla nas użyteczne, a jakie raczej nie. Służyć do tego może proponowany diagram na rysunku 6.



RYСУNEK 6. Propozycja diagramu (według kryterium  $L/\lambda > 3$ ) do oszacowania właściwej częstotliwości fali w badaniu BET na podstawie wysokości próbki i spodziewanej prędkości fali (Godlewski i Szczepański, 2015a)

FIGURE 6. Diagram proposed (according to  $L/\lambda > 3$ ) for assessment of proper choice of testing frequency for shear wave velocity measurement, depending on sample height and assuming permissible value of wave velocity (Godlewski and Szczepański, 2015a)

Przedstawiona w pracy (Godlewski i Szczepański, 2015a) propozycja diagramu dotyczy warunku  $L/\lambda > 3$ . Oczywiście można łatwo wyznaczyć podobny diagram dla innej wartości wyrażenia  $L/\lambda$ , a doświadczenia autorów pokazują, że jest on wystarczający w większości przypadków.

Przedstawione wyniki testów nie pozwalają na jednoznaczną rekomendację użytego oprogramowania BEAT do automatycznej interpretacji wyników. Z jednej strony obserwowano bardzo dobre efekty interpretacji w trakcie badań na piasku, z drugiej strony w zasadzie bezużyteczne przy badaniu ilów. Prawdopodobnie nie jest to wprost związane z litologią, a raczej ze złożonością historii obciążeń, jednorodnością i strukturą analizowanych geomateriałów.

## Wnioski

Przedstawione przykłady wskazują na złożoną specyfikę wykonywania oznaczeń sztywności gruntu metodą BET. Widać wyraźnie, że pomimo powszechności tego typu aparatury, należy zwracać szczególną uwagę na metodykę prac i prawidłowy dobór parametrów badania. Jak wykazano, bardzo ważny jest zarówno aspekt doboru częstotliwości badania, jak i odpowiednia do danego geomateriału metoda interpretacji wyników. Użytkownicy metody BET powinni być świadomi wszystkich czynników, które mogą wpływać na uzyskiwane wyniki. Dotyczy to zarówno czynników sprzętowych związanych z dużym zróżnicowaniem samej aparatury pomiarowej, ale również czynników obejmujących aspekty metodyczne i interpre-



tacyjne (szerzej w pracach: Camacho i in., 2012; Foti i in., 2015; Godlewski i Szczepański, 2015b).

Należy podkreślić, że ze względu na możliwość skrócenia czasu potrzebnego do przeprowadzenia interpretacji wyników różnymi metodami oraz dążność do obiektywizacji i upowszechnienia metody interpretacji (do czego przyczynić się może prostota interpretacji niewymagająca wysokich kompetencji) automatyzacja jest kierunkiem, do którego będziemy dążyć. Wydaje się, że dotychczasowe narzędzia (oprogramowanie pomocne w interpretacji wyników związanych z rejestrowaną propagacją fal) wykorzystują wciąż niedoskonałe algorytmy (zbyt uniwersalne), na których nie można bezkrytycznie polegać w każdym przypadku.

## Literatura

- Camacho-Tauta, J.F., Alvarez, J.D.J. i Reyes-Ortiz, O.J. (2012). A procedure to calibrate and perform the bender element test. *Dyna*, 79, 10-18.
- Dyvik, R. i Madhus, C. (1985). Lab measurements of Gmax using bender elements. In V. Koshla (Ed.). *Advance in the art of testing soils under cyclic conditions*. New York, ASCE, 186-196.
- Foti, S., Lai, C.G., Rix, G.J. i Strobbia, C. (2015). *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. CRC Press Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, 46-48.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2015a). Measurement of soil shear wave velocity using in situ and laboratory seismic methods – some methodological aspects. *Geological Quarterly*, 59(2), 358-366.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2015b). *Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych*. Warszawa: Poradnik ITB.
- Lee, J.S. i Santamarina, J.C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, 1063-1070.
- Rees, S., Le Compte, A. i Snelling K. (2013). A new tool for the automated travel time analyses of bender element tests. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2843-2846.
- Szyszko, T. (2015). *Studium zmienności prędkości fali poprzecznej w zależności od stanu skonsolidowania wybranych gruntów* (praca magisterska). Warszawa: Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii.
- Viggiani, G. i Atkinson, J.H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 1(45), 149-154.
- Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T. i Shibuya, S. (2009). Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements. *Soils and Foundations*, 49, 631-665.

## Streszczenie

**Wybrane aspekty prawidłowego doboru parametrów badania i weryfikacji wyników oznaczeń dla określania modułu sztywności ( $G_0$ ) w metodzie BET.** Artykuł stanowi kontynuację badań mających na celu coraz wiarygodniejsze wykorzystywanie metod do oceny sztywności geomateriałów. Przedstawia analizę i syntezę wyników dotyczących określania prędkości fali poprzecznej przy użyciu piezoelementów typu bender. Na przykładzie dwóch typów gruntów w artykule poruszono aspekty związane z doбором częstotliwości użytych w badaniu fal w zależności od wielkości próbki i prędkości fali oraz wyboru metody interpretacji spośród ogólnie wykorzystywanych z zastosowaniem narzędzi automatyzujących ten proces.

## Summary

**Some aspects of proper selection and verification of the test conditions for BET methods of soil stiffness modulus ( $G_0$ )**

**determination.** One of the main group of methods used recently for establishing soil stiffness characteristics are so called seismic methods (using measurement of elastic waves velocity). Authors experiences show reasonably good correlation of the results obtained with use of different methods, both field and laboratory. One of the aspects, on which authors are working on, is analysis of methodological factors influencing the results, with the aim of more repeatability, reliability, and standardization of some methods, BET being a good example. Aspects of proper choice of waves frequency used during test, sample length influence, using automatic interpretation tools are raised.

**Authors' addresses:**

Tomasz Szczepański  
Uniwersytet Warszawski  
Wydział Geologii  
Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej  
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa  
Poland  
e-mail: tom@uw.edu.pl

Tomasz Godlewski  
Instytut Techniki Budowlanej  
Zakład Konstrukcji Budowlanych i Geotechniki  
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa  
Poland  
e-mail: t.godlewski@itb.pl