

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (3), 307–316  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (3)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (3), 307–316  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (3)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.3.30

**Marcin WITOWSKI, Tomasz GODLEWSKI**

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

## **Wykorzystanie piezoelementów typu bender w pomiarach propagacji fali podłużnej w gruntach**

### **The use of bender piezoelements in the measurement of compressive wave propagation in soils**

**Słowa kluczowe:** fale poprzeczne  $S$ , fale podłużne  $P$ , moduł sztywności początkowej gruntu ( $G_0$ ), współczynnik Poissona, piezoelement  
**Key words:** shear waves  $S$ , compression waves  $P$ , small-strain shear modulus ( $G_0$ ), Poisson ratio, piezoelement

## **Wprowadzenie**

Współczesne potrzeby określania współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym wymagają podania odpowiednio dobranych do danego zagadnienia geotechnicznych parametrów „współpracy” wymaganych w danej metodzie obliczeniowej (Truty, 2008; Godlewski i Szczepański, 2011; Młynarek 2013; Bogusz, Godlewski i Szczepański, 2015). W tym kontekście niezbędne staje się modelowanie zachowania się ośrodka gruntowego w złożonych warunkach naprężeń, co wymaga między innymi wyznaczenia pełnej charakterystyki sztywności grun-

tu odniesionej do wartości modułów opisujących zachowanie ośrodka gruntowego w przebiegu charakterystyki ścinania (Lipiński, 2013; Godlewski i Szczepański, 2015; Foti, Lai, Rix i Strobbia, 2015). W analizach zachowania gruntu wykorzystuje się termin „sztywność gruntu”, rozpatrując jego zachowania w zakresie odkształceń sprężystych (pseudosprężystych), wynikających z naprężeń stycznych, a miarą tego zachowania jest moduł odkształcenia postaciowego ( $G_0$ ). Metody badań, które pozwalają na wyznaczenie wartości tych modułów w zakresie małych i bardzo małych odkształceń ( $10^{-3}$ – $10^{-6}$ ), należą do grupy metod wykorzystujących pomiar prędkości fali poprzecznej i fali podłużnej.

Do laboratoryjnych badań właściwości sprężystych w zakresie małych odkształceń poprzez pomiary prędkości fali poprzecznej i fali podłużnej służy

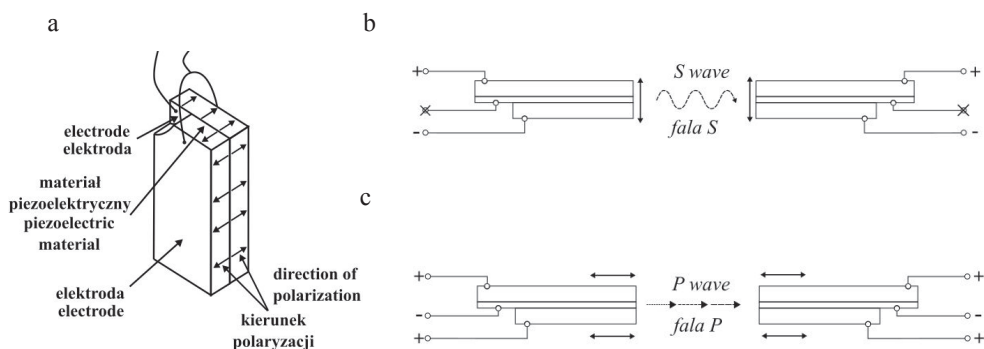
metoda BET (ang. *bender element test*) – badanie jest wykonywane najczęściej w komorze aparatu trójosiowego ściskania z wykorzystaniem tzw. piezoelementów. Wykorzystywane w tym celu są piezoelektryczne elementy typu bender (element „zginający”), umożliwiające wyznaczenie początkowego modułu ścisnienia ( $G_0$ ). Drugim typem elementów, które nie są jeszcze powszechnie stosowane, są elementy piezoelektryczne typu extender (element „rozciągający”). Wysyłane i odbierane przez oba typy przetworników fale poprzeczne  $S$  i podłużne  $P$  pozwalają na wyznaczenie współczynnika Poissona oraz określenie początkowego modułu odkształcenia ( $E_0$ ) badanego gruntu.

## Budowa i działanie elementów piezoelektrycznych

Elementy piezoelektryczne typu bender wykorzystywane są w technice laboratoryjnej już od ponad 30 lat i były już wielokrotnie opisywane przez auto-

rów publikacji zajmujących się problematyką badań sztywności gruntu (Dyvik i Madhus, 1985). Element tego typu składa się z dwóch płytek z materiału wykazującego właściwości piezoelektryczne (PZT) oraz trzech elektrod doprowadzających napięcie do układu (rys. 1a).

Podstawowa konfiguracja przewidyuje podłączenie dwóch przewodów do zewnętrznych okładzin napięcia przemiennego (połączenie szeregowo). Napięcie to zazwyczaj jest w postaci sinusoidy o określonej amplitudzie i częstotliwości generuje drgania poprzeczne elementu piezoelektrycznego (rys. 1b). W przypadku gdy element lub jego część jest zamontowana w próbce gruntu, generowane drgania powodują wytworzenie w gruncie fali poprzecznej. Jeśli wygenerowana w ten sposób fala zostanie odebrana przez drugi element umieszczony po przeciwległej stronie próbki, to w identycznie podłączonym elemencie piezoelektrycznym zostanie wygenerowany impuls elektryczny o mniejszej amplitudzie. Mierząc czas przejścia fali przez próbkę, możemy określić prędkość tej fali



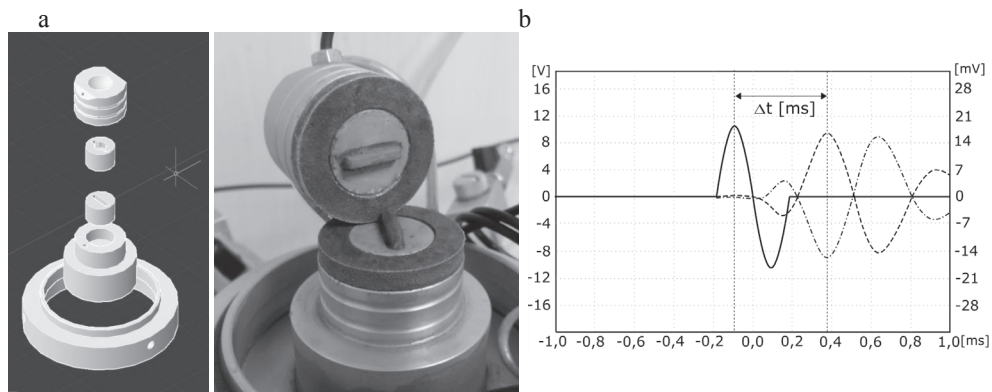
RYСУNEK 1. Ogólna budowa elementu typu bender (za Dyvik i Madshus, 1985) (a); typowy schemat podłączenia przewodów sygnałowych (b); zmodyfikowany schemat podłączenia przewodów sygnałowych (c)

FIGURE 1. General construction of bender element (after Dyvik & Madshus, 1985) (a); typical connection scheme signal wires (b); modified connection scheme signal wires (c)

w badanym ośrodku. Jeśli ten sam element piezoelektryczny zostanie połączony za pomocą trzech przewodów (połączenie równoległe) oraz zostanie wzbudzony przez identyczny jak poprzednio impuls, to zachowa się odmiennie (Lings i Greening, 2001). Element ten znacznie drgać podłużnie, powodując powstanie w próbce gruntu fali podłużnej  $P$  (rys. 1c). Niestety drgania wygenerowane w ten sposób mają amplitudę wynikającą z małej powierzchni przetwornika, ponieważ tylko część czołowa bierze udział w generowaniu fali. Powoduje to pewne problemy przy interpretacji rejestrowanego sygnału przejścia fali przez próbkę i wymaga użycia oscyloskopu o dużej rozdzielczości z funkcją dolnoprzepustowej filtracji sygnałów.

Przeprowadzenie tego typu modyfikacji nie było możliwe na przetwornikach będących na wyposażeniu Laboratorium Badań Podłoża Budowlanego ITB, dlatego też zmodyfikowano standardowy aparat do badań trójosiowych. Do budowy przetworników wykorzy-

stano powszechnie dostępne elementy piezoelektryczne EKULIT UPF-76Q-220 charakteryzujące się maksymalnym napięciem operacyjnym wynoszącym 250 V oraz pojemnością elektryczną wynoszącą 9 nF. Elementy te przycięto do wymiaru  $12 \times 10$  mm (wymiały zbliżone do rozwiązań komercyjnych). Do przygotowanych elementów dołączono ekranowane przewody sygnałowe zatopione w żywicy epoksydowej, aby zapewnić ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi i przepięciami. Zamontowanie tak przygotowanych elementów w komorze trójosiowej wymagało zmodyfikowania jej poprzez wykonanie nowej podstawy, górnej kopułki, kamieni porowych oraz pierścienia umożliwiającego wyprowadzenie przewodów sygnałowych na zewnątrz komory (rys. 2a). Do generowania sygnału wykorzystano arbitralny generator sygnałowy GW-Instek AFG 2012 umożliwiający wygenerowanie dowolnego przebiegu o zadanej częstotliwości, natomiast do odbioru sy-



RYSUNEK 2. Projekt oraz wykonana modyfikacja sprzętowa na bazie standardowej komory trójosiowej (a); przykład rejestracji przejścia fali  $S$  (linia przerywana – polaryzacja normalna, linia przerywana z kropką – polaryzacja odwrócona) (b)

FIGURE 2. Design modification of hardware based on standard triaxial cell (a); example of registration of the transit  $S$  wave (dotted line – normal polarity, the dotted line with a dot – polarity reversed) (b)

gnałów został użyty cyfrowy 12-bitowy oscyloskop PicoScope 3203D.

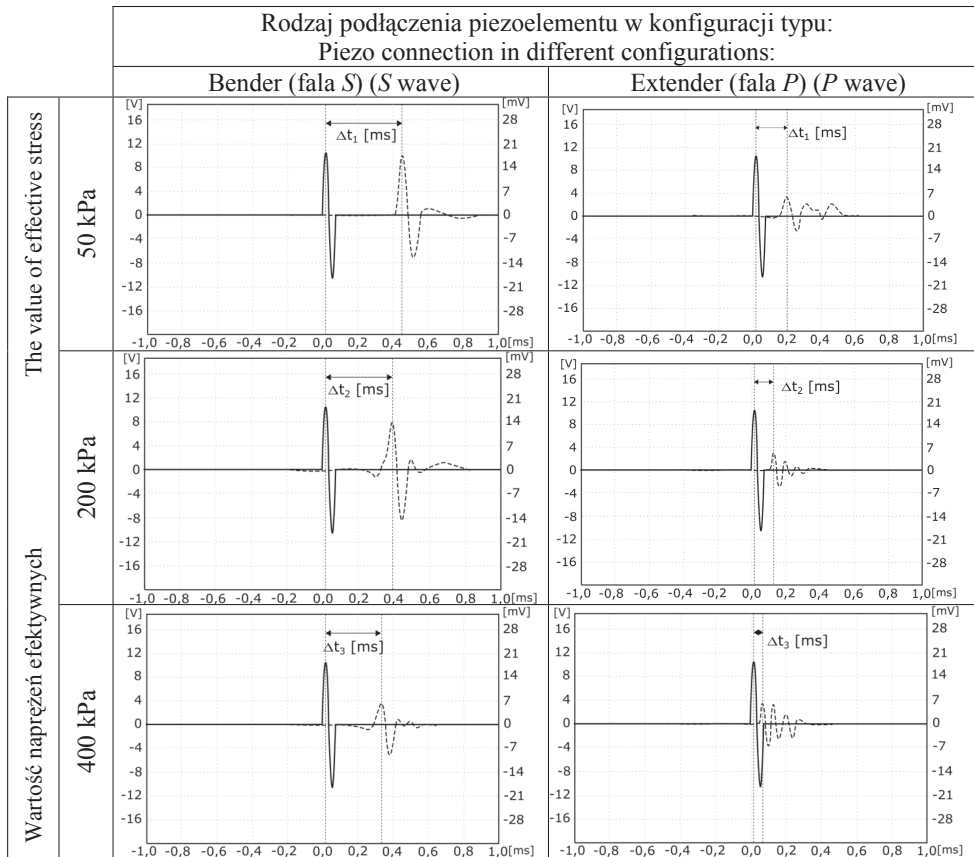
Po złożeniu całego układu przeprowadzono wstępny test systemu polegający na ustawieniu przetworników w taki sposób, żeby kontakt między nimi zachodził tylko poprzez powierzchnie czołowe. Kwestią wymagającą wyjaśnienia było rozróżnienie rodzaju fali aktualnie generowanej przez przetwornik. W rozwiązaniu tego problemu pomógł fakt, że w przypadku generowania fali  $S$  obrócenie przetwornika o  $180^\circ$  powodowało odwrócenie polaryzacji odbieranej fali. W przypadku fali  $P$  odwrócenie przetwornika nie powodowało zmiany polaryzacji. Ta prosta czynność pozwoliła na szybkie rozróżnienie generowanych fal. Po przeprowadzeniu wstępnych testów w powietrzu przeprowadzono test na nieskonsolidowanej próbce gruntu, podczas którego w przetwornikach były generowane fale  $S$  i  $P$ . W czasie tych testów okazało się, że uzyskane sygnały charakteryzowały się dobrą jakością (wyrazistość i powtarzalność sygnału) oraz akceptowalną wartością amplitudy (w oczekiwanym przedziale wartości) – jest to szczególnie widoczne w przypadku fali poprzecznej (rys. 2b).

### **Badania laboratoryjne – metodyka**

W celu potwierdzenia słuszności opisanej koncepcji w warunkach przyjętego reżimu badawczego przeprowadzono badanie na próbce iltu pobranej w rejonie Warszawy z osadów neogeńskich (trzeciorzędowych), która dla zobrazowania zmian w prędkościach fal  $S$  i  $P$  została nasycona, a następnie skonsolidowana do wartości naprężeń efek-

tywnych równych 50, 200 oraz 400 kPa. Po zakończeniu konsolidacji przystąpiono do wyznaczania prędkości fali poprzecznej oraz fali podłużnej (wyniki na rys. 3). Ze względu na wysokość próbek spodziewany zakres prędkości fali oraz potrzebę zminimalizowania występowania efektu typu near field postanowiono zgodnie z metodyką zaproponowaną w pracach Camacho-Tauta, Alvareza i Reyesa-Ortiza (2012) oraz Godlewskiego i Szczepańskiego (2015). Generowana częstotliwość drgań powinna wynosić nie mniej niż 4 kHz, dzięki temu stosunek wysokości próbki do długości fali ( $L / \lambda$ ) przyjmował wartości większe od 3 (Godlewski i Szczepański, 2015). Umożliwiło to wyeliminowanie czynników niekorzystnie oddziałujących na przebieg badania. W analizie sygnału zastosowano metodę wizualnej interpretacji przebiegu, w której skupiono się na pomiarze przejścia głównego „piku” nadanego sygnału – metoda major first peak według Lee i Santamarina (2005). Pomocne było tu również zastosowanie filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości 10 kHz, który pozwolił na usunięcie zakłóceń.

W większości artykułów naukowych, których tematem jest prędkość fali poprzecznej określonej w laboratorium, wykorzystuje się rekonstruowane grunty spoiste (drobnoziarniste) lub piaski, niewiele zaś wiadomo na temat prekonsolidowanych naturalnych gruntów spoistych (Lipiński, 2013). W pracy zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych na naturalnych gruntach spoistych – glinach zwałowych pochodzących z północnej części Polski wykształconych w postaci glin piaszczystych, glin pylastych związanych do iltów (tab. 1 i 2). W celu wyka-



RYSunEK 3. Różnica w czasie przejścia fal *S* oraz *P* w zależności od naprężeń efektywnych ( $\Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_3$ )

FIGURE 3. The time difference of the transit *S* and *P* wave as a function of effective stress ( $\Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_3$ )

zania poprawnego działania wykonanej modyfikacji przeprowadzono badanie porównawcze na gruncie pobranym z tej samej lokalizacji (próbki 31–45 wg tab. 1 i 2). Badanie to zrealizowano w komercyjnie dostępnym aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w elementy typu bender. W skład tego zestawu wchodzi generator sygnałowy TTi TGA1241, cyfrowy oscyloskop PicoScope 3203 oraz elementy piezoelektryczne typu 28-WF4077. Badanie zostało przepro-

wadzone na próbkach o średnicy 70 mm i wysokości 140 mm.

Próbki o nienaruszonej strukturze z uwagi na ograniczenia sprzętowe zmodyfikowanej komory były docinane do średnicy wynoszącej 38 mm oraz wysokości 76 mm. Po zamontowaniu w komorze trójosiowej próbki gruntu zostały nasycone za pomocą metody ciśnienia wyrównawczego. Próbki były nasycone za pomocą automatycznego algorytmu sterującego kontrolerami ciśnienia do

TABELA 1. Zestawienie podstawowych parametrów badanych gruntów  
TABLE 1. Summary of the basic parameters of the soil

Lp. Order	Rodzaj gruntu Type of soil	Wilgotność Moisture w [%]	Wskaźnik porowatości Void ratio e [-]	Wskaźnik plastyczności Plasticity index $I_p$ [%]	Lp. Order	Rodzaj gruntu Type of soil	Wilgotność Moisture w [%]	Wskaźnik porowatości Void ratio e [-]	Wskaźnik plastyczności Plasticity index $I_p$ [%]
1	Gлина piaszczysta zwięzła	10,33	0,28	13,65	25	Gлина piaszczysta	11,02	0,30	14,17
2	Gлина piaszczysta zwięzła	9,89	0,27		26	Gлина piaszczysta	12,56	0,30	
3	Gлина piaszczysta zwięzła	10,14	0,29		27	Gлина piaszczysta	11,05	0,26	
4	Gлина piaszczysta zwięzła	16,34	0,44	15,07	28	Gлина piaszczysta	11,67	0,32	15,57
5	Gлина piaszczysta zwięzła	16,10	0,45		29	Gлина piaszczysta	9,86	0,32	
6	Gлина piaszczysta zwięzła	16,19	0,45		30	Gлина piaszczysta	10,47	0,40	
7	Gлина pylasta zwięzła	17,44	0,46	14,45	31	Gлина piaszczysta	13,19	0,34	12,03
8	Gлина pylasta zwięzła	18,16	0,50		32	Gлина piaszczysta	13,62	0,36	
9	Gлина pylasta zwięzła	17,45	0,51		33	Gлина piaszczysta	12,52	0,34	
10	Gлина piaszczysta	12,56	0,36	13,12	34	Gлина piaszczysta	13,28	0,36	8,54
11	Gлина piaszczysta	13,35	0,38		35	Gлина piaszczysta	14,56	0,36	
12	Gлина piaszczysta	13,66	0,34		36	Gлина piaszczysta	14,9	0,38	
13	Gлина piaszczysta	14,75	0,39	14,49	37	Gлина piaszczysta	13,14	0,33	11,52
14	Gлина piaszczysta	14,92	0,40		38	Gлина piaszczysta	13,45	0,38	
15	Gлина piaszczysta	14,45	0,43		39	Gлина piaszczysta	13,49	0,36	
16	Gлина piaszczysta	13,63	0,42	10,93	40	Gлина piaszczysta	13,26	0,33	12,06
17	Gлина piaszczysta	13,35	0,35		41	Gлина piaszczysta	13,21	0,34	
18	Gлина piaszczysta	12,82	0,35		42	Gлина piaszczysta	14,01	0,35	
19	Gлина piaszczysta	11,69	0,34	14,53	43	Gлина pylasta zwięzła	18,35	0,47	14,98
20	Gлина piaszczysta	12,18	0,33		44	Gлина pylasta zwięzła	13,59	0,40	
21	Gлина piaszczysta	12,30	0,34		45	Gлина pylasta zwięzła	15,26	0,44	
22	Gлина piaszczysta	14,30	0,38	8,06	46	И	29,13	0,79	25,09
23	Gлина piaszczysta	12,93	0,35		47	И	29,07	0,78	
24	Gлина piaszczysta	14,63	0,42		48	И	27,54	0,74	

momentu osiągnięcia przez parametr  $B$  wartości większej lub równej 0,95. Nasytanie uznawano również za zakończone w przypadku, gdy zwiększanie ciśnienia wyrównawczego nie przynosiło wzrostu stopnia nasycenia. Po zakończeniu etapu nasycania przeprowadzano etap konsolidacji izotropowej.

Próbki były konsolidowane do wartości wynoszącej  $0,5 \times \sigma'_3$ ,  $\sigma'_3$  oraz  $1,5 \times \sigma'_3$  naprężeń występujących *in situ*. Po tym etapie przeprowadzano rejestrację przejścia fal  $S$  oraz  $P$  w aparaturze zmodyfikowanej, a w przypadku aparatury porównawczej przeprowadzano tylko oznaczenie fali  $S$ , ze względu na brak możliwości pomiaru przejścia fali  $P$  za pomocą tego aparatu. Przyjęte warunki badania oraz wyznaczone prędkości przejścia fal, na podstawie których zostały obliczone parametry charakte-

ryzujące sztywność gruntów, zostały przedstawione w tabeli 2.

## Wyniki badań testowych

Analiza przejścia poprzecznej oraz podłużnej fali w testowej próbce iltu (próbki 46, 47, 48 wg tab. 1 i 2) wyraźnie uwidacznia tendencję do zwiększania się prędkości (krótsze odcinki na osi czasu) fal  $S$  i  $P$  w miarę zwiększania się naprężeń efektywnych – rysunek 3.

Drugą widoczną tendencją jest w przypadku fali  $S$  zmniejszanie się wartości amplitudy oraz pogarszanie się jakości sygnału w kolejnych etapach konsolidacji. W przypadku elementu typu extender występuje trend odwrotny, czyli stopniowe polepszanie się jakości odbieranego sygnału wraz z przyrostem



TABELA 2. Charakterystyka badanych gruntów, przyjęte warunki badania oraz wyniki pomiarów  
 TABLE 2. Characteristics of soil, test conditions and measurement results

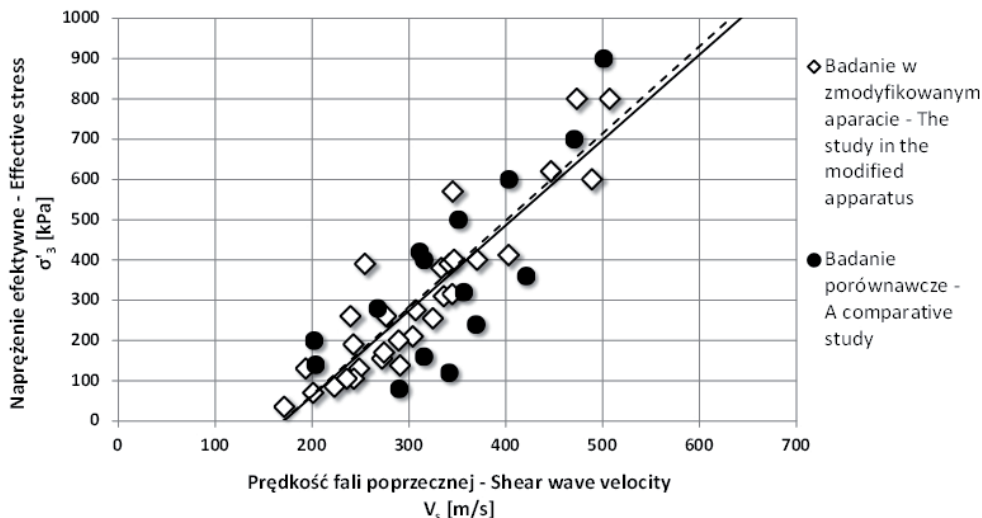
L.p. Order	Rodzaj gruntu Type of soil	Gęstość objętościowa Bulk density $\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Napężenie efektywne Effective stress $\sigma'_3$ [MPa]	Skempton B [-]	Prędkość fali poprzecznej Shear wave velocity $V_s$ [m/s]	Prędkość fali podłużnej Compression wave velocity $V_p$ [m/s]	Moduł ścianania Shear modulus $G_0$ [kPa]
1	Gлина piaszczysta zwięzła	2,31	400	0,92	370	792	316
2	Gлина piaszczysta zwięzła	2,32	600	0,97	490	952	557
3	Gлина piaszczysta zwięzła	2,30	800	0,94	508	1032	593
4	Gлина piaszczysta zwięzła	2,17	190	0,93	244	582	128
5	Gлина piaszczysta zwięzła	2,15	380	0,92	334	940	239
6	Gлина piaszczysta zwięzła	2,15	570	0,94	345	1382	257
7	Gлина pylasta zwięzła	2,21	130	0,79	193	426	82
8	Gлина pylasta zwięzła	2,20	260	0,83	239	780	125
9	Gлина pylasta zwięzła	2,15	390	0,89	255	766	140
10	Gлина piaszczysta	2,23	155	0,95	272	718	164
11	Gлина piaszczysta	2,20	310	0,95	336	751	249
12	Gлина piaszczysta	2,29	620	0,94	446	975	455
13	Gлина piaszczysta	2,20	130	0,95	248	959	136
14	Gлина piaszczysta	2,21	260	0,94	275	1193	168
15	Gлина piaszczysta	2,12	390	0,94	341	1106	246
16	Gлина piaszczysta	2,18	85	0,96	224	709	108
17	Gлина piaszczysta	2,21	170	0,95	275	795	167
18	Gлина piaszczysta	2,24	255	0,95	324	832	235
19	Gлина piaszczysta	2,28	105	0,95	243	595	135
20	Gлина piaszczysta	2,28	210	0,95	304	946	211
21	Gлина piaszczysta	2,25	315	0,95	346	1211	269
22	Gлина piaszczysta	2,26	200	0,96	289	688	188
23	Gлина piaszczysta	2,27	400	0,97	347	778	273
24	Gлина piaszczysta	2,23	800	0,95	474	835	501
25	Gлина piaszczysta	2,31	138	0,95	290	560	194
26	Gлина piaszczysta	2,32	275	0,95	308	562	220
27	Gлина piaszczysta	2,38	412	0,94	403	724	386
28	Gлина piaszczysta	2,25	35	0,86	171	545	65
29	Gлина piaszczysta	2,20	70	0,87	201	643	89
30	Gлина piaszczysta	2,26	105	0,90	235	1076	124
31	Gлина piaszczysta	2,24	80	0,95	289	-	187
32	Gлина piaszczysta	2,28	160	0,95	316	-	228
33	Gлина piaszczysta	2,25	320	0,92	356	-	286
34	Gлина piaszczysta	2,27	120	0,94	342	-	266
35	Gлина piaszczysta	2,26	240	0,94	370	-	309
36	Gлина piaszczysta	2,24	360	0,96	420	-	394
37	Gлина piaszczysta	2,29	200	0,94	201	-	93
38	Gлина piaszczysta	2,22	400	0,89	316	-	222
39	Gлина piaszczysta	2,25	600	0,93	404	-	367
40	Gлина piaszczysta	2,28	500	0,96	351	-	281
41	Gлина piaszczysta	2,25	700	0,95	470	-	497
42	Gлина piaszczysta	2,24	900	0,95	501	-	562
43	Gлина pylasta zwięzła	2,19	140	0,93	202	-	89
44	Gлина pylasta zwięzła	2,14	280	0,94	267	-	153
45	Gлина pylasta zwięzła	2,12	420	0,92	310	-	203
46	łł	2,00	50	0,88	155	423	48
47	łł	2,00	200	0,86	168	572	56
48	łł	2,00	400	0,85	195	820	76

naprężeń efektywnych (Lings i Greening, 2001).

Dla testowych próbek iłu otrzymane prędkości fali poprzecznej są na porównywalnym poziomie do wartości uzyskanych przez innych naukowców badających tego rodzaju grunt pobrany w tej lokalizacji (Tymiński i Markowska-Lech, 2005). W przypadku glin otrzymane wyniki pomiarów prędkości fali poprzecznej na zmodyfikowanej aparaturze (przerwana linia trendu – rys. 4) korelują się z wynikami pomiarów wykonanych na aparaturze, w której były wykonywane pomiary porównawcze (ciągła linia trendu – rys. 4). Te wstępne wyniki pomiarów pozwalają na stwierdzenie, że zmodyfikowana aparatura umożliwia uzyskanie parametrów charakteryzujących sztywność gruntu, które nie odbiegają od wartości parametrów uzyskanych na komercyjnej aparaturze.

## Wnioski i kierunki dalszych badań

W kontekście uzyskanych wyników przeprowadzoną modyfikację standardowej komory trójosiowej można uznać za udaną. Możliwość dokonania pomiaru przejścia fali *S* oraz fali *P* za pomocą tylko jednej pary przetworników jest bardzo dużym udogodnieniem, ponieważ usuwa konieczność posiadania dwóch zestawów przetworników piezoelektrycznych. Co ważniejsze pomiary przejścia fali są dokonywane na tej samej drodze, co dodatkowo podnosi jakość uzyskanych wyników i pomniejsza tym samym liczbę czynników wpływu związanych z prezentowaną metodyką. W celu określenia wpływu typu zastosowanych przetworników oraz ich wielkości w stosunku do wymiarów próbki na właściwości mechaniczne gruntu (kąta tarcia wewnętrznego oraz spójność) w laboratorium ITB prowadzone są



RYSUNEK 4. Stosunek naprężenie efektywne – prędkość fali poprzecznej dla zbadanych próbek na tle próbek testowych

FIGURE 4. The ratio of effective stress – shear wave velocity to the samples tested against the test samples



badania na rekonstruowanych gruntach spoistych.

Obecnie w ITB trwają kolejne prace w kierunku usprawnienia pomiarów i opracowania kompleksowej metodyki oznaczania krzywej degradacji sztywności. Przejście z fazy testowej zaproponowanej metodyki do normalnej praktyki laboratoryjnej pozwoli na oznaczanie parametrów sprężystych gruntu podczas standardowego badania trójosiowego. Niebagatelne znaczenie ma również to, że znając wartości maksymalnego modułu odkształcenia postaciowego ( $G_0$ ) oraz wartość współczynnika Poissona z pomiarów bezpośrednich, można z dużą dokładnością określić wartość modułu odkształcenia ( $E_0$ ). Tym samym mając dokładną informację na temat początkowej wartości modułu odkształcenia w połączeniu z danymi pochodzącymi z czujników napróbkowych, można bardzo dokładnie określić charakterystykę naprężenie–odkształcenie badanego gruntu w zakresie małych i bardzo małych odkształceń. Podnosi to jakość parametrów geotechnicznych wyznaczanych podczas badania oraz pozwoli na uzupełnianie bazy wyników o kolejne typy gruntów, w tym również grunty niespoiste (gruboziarniste).

## 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.
- Bogusz, W., Godlewski, T. i Szczepański, T. (2015). Stosowalności wybranych metod określania modułu sztywności ( $G_0$ ) gruntów w praktyce geotechnicznej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 36(3), 371-376.
- Dyvik, R. i Madhus, C. (1985). Lab measurements of  $G_{max}$  using bender elements. W: *Advance in the art of testing soils under cyclic conditions*. Red. V. Koshla. 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*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press Taylor & Francis Group, 46-48.
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2011). Nieliniowa charakterystyka sztywności gruntu ( $G_0$ ) – metody oznaczania i przykłady zastosowań. XXXIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii, Kudowa Zdrój, 14-18 marca 2011. *Kwartalnik AGH*, 35(2).
- Godlewski, T. i Szczepański, T. (2015). *Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych*. Poradnik ITB. Warszawa.
- Lee, J.S. i Santamarina, J.C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131, 1063-1070.
- Lings, M.L. i Greening, P.D. (2001). A novel bender/extender element for soil testing. *Geotechnique*, 51(8), 713-717.
- Lipiński, M.L. (2013). *Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych*. (rozprawa habilitacyjna), 174-217. Warszawa: POLIMAX s.c.
- Młynarek, Z. (2013). *Metody i ograniczenia w wyznaczaniu parametrów geotechnicznych gruntów w badaniach in situ*. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, t. 1, 399-440.
- Truty, A. (2008). Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń, aspekty modelowania numerycznego. *Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej*, 3-Ś, 107-126.
- Tymiński, W. i Markowska-Lech, K. (2005). *Kryteria pomiaru prędkości fali sejsmicznej w gruntach spoistych*. 51 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu PZITB. *Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa*, 65-72.

## Streszczenie

**Wykorzystanie piezoelementów typu bender w pomiarach propagacji fali podłużnej w gruntach.** Artykuł opisuje autorską modyfikację standardowej komory trójosiowej umożliwiającą wykonywanie pomiarów przejścia fal  $S$  i  $P$  przy wykorzystaniu tylko jednej pary przetworników piezoelektrycznych, przy których udało się uwzględnić lub zminimalizować wybrane zjawiska niekorzystne w stosowanej powszechnie procedurze badań BET. Podano również wyniki oznaczeń testowych dla różnych typów gruntów.

## Summary

**The use of bender piezoelements in the measurement of compressive wave propagation in soils.** The article describes

the proprietary modification of the standard triaxial cell which allows for the measurement of the transit  $S$  and  $P$  wave using only one pair of piezoelectric transducers, while it was possible to take into account or minimize some of the negative phenomena in the commonly used test procedures BET. The results of the tests for different types of soils were also presented.

### Authors' address:

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