

Marek BAJDA

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Źródło generacji fali sejsmicznej w sondowaniach SCPT **Seismic source in SCPT tests**

Słowa kluczowe: fala sejsmiczna, źródło generacji, SCPT, grunty spójne

Key words: seismic wave, seismic source, SCPT, cohesive soils

Wprowadzenie

Zasadniczą zaletą badań sejsmicznych, decydującą o ich wzrastającej popularności, jest możliwość określenia parametrów charakteryzujących właściwości sprężyste ośrodka gruntowego. Wynika to z faktu, że opis propagacji powstałych drgań opiera się na teorii ruchu falowego dla ośrodka liniowo-sprężystego.

Fale generowane są w ośrodku posiadającym cechy sprężyste w wyniku zaburzenia mechanicznego fragmentu tego ośrodka, co powoduje drgania obszaru wokół początkowego położenia równowagi. Dzięki sprężystym właściwościom ośrodka fala przechodzi przez cały ośrodek. Problemy geotechniczne związane z obciążeniami użytkowymi obiektów inżynierskich wymagają określenia odkształceń sprężystych również

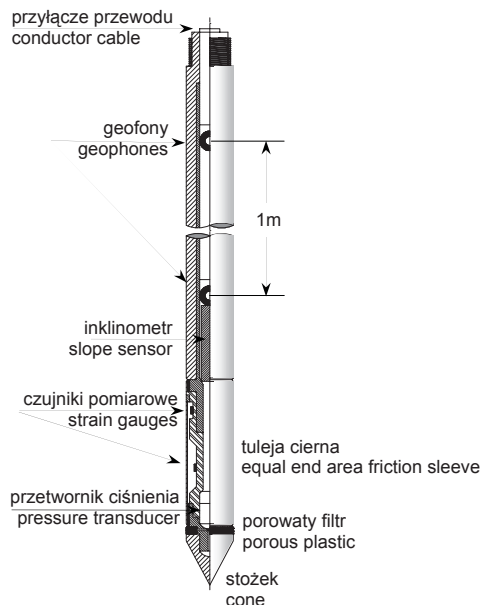
w zakresie małych odkształceń (Lipiński 2000).

W badaniach dynamicznych gruntów pracujących w zakresie sprężystym metody sejsmiczne oparte na propagacji fal pozwalają z dużą wiarygodnością określić parametry dynamiczne podłoża budowlanego in situ, przez co są najbardziej odpowiednimi metodami dla tego rodzaju badań.

Istotnym elementem sondowań sejsmicznych jest źródło generacji fali sejsmicznej umożliwiającej otrzymanie czystego i łatwego do interpretacji sygnału. Od jakości sygnału zależy dokładność, z jaką określimy prędkość fali poprzecznej i podłużnej, wykorzystywanej do określenia parametrów charakteryzujących właściwości sprężyste ośrodka, które w gruncie odnoszą się do zakresu odkształceń w przedziale 10^{-6} – 10^{-5} .

Sondowania sejsmiczne SCPT

W badaniach wykorzystano stożek włoskiej firmy ISMES. Składa się on z dwóch zasadniczych części (rys. 1). Pierwsza z nich odpowiada za pomiar



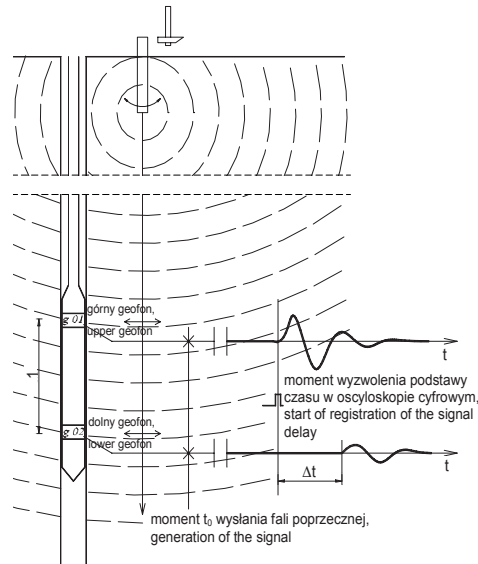
RYSUNEK 1. Schemat stożka sejsmicznego
FIGURE 1. The seismic cone

parametrów uzyskiwanych w standardowym badaniu CPT, czyli pomiar oporu stożku (q_c), tarcia na poboczniczy (f_s) oraz odchylenia stożka od pionu.

Druą część odpowiada za rejestrację drgań mechanicznych gruntu. W jej skład wchodzi dwa geofony umieszczone w odległości 1 m od siebie (rys. 2), które mają za zadanie odbiór ruchu cząstek gruntowych i przetworzenie go na impuls elektryczny. Impuls ten następnie jest wysyłany do odbiornika.

Źródła generacji fali sejsmicznej

Bardzo ważną sprawą jest otrzymanie czystego i łatwego do interpretacji sygnału. W literaturze często poruszany jest problem źródła generacji fali. W międzynarodowych zaleceniach wykonywania badań sejsmicznych (IRTP

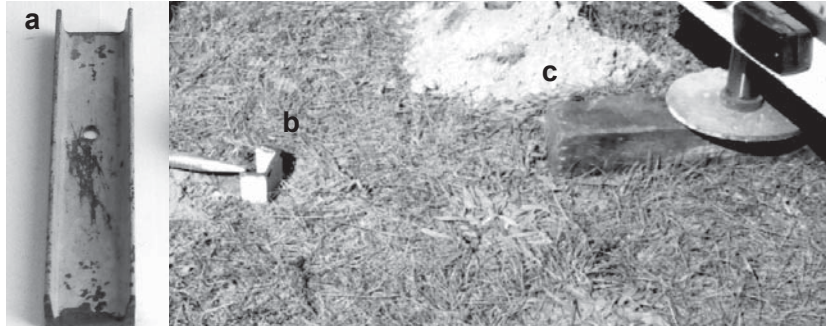


RYSUNEK 2. Schemat pomiaru prędkości fali (V_s)
FIGURE 2. Measurement of shear wave velocity

1999) oraz w literaturze jako źródło poprzecznej fali sejsmicznej przedstawiana jest konstrukcja oparta na metalowej bądź drewnianej, okutej z dwóch stron belce o wymiarach co najmniej $2,40 \times 0,15$ m, zakończonej od dołu blachą kotwiącą w gruncie (Marchetti i in. 2008, McGilivray i Mayne 2008). Podczas badań przetestowano różne źródła generacji fali sejsmicznej. Pomysły tych źródeł zostały zaczerpnięte z literatury oraz z informacji ośrodków naukowych zajmujących się podobnymi badaniami.

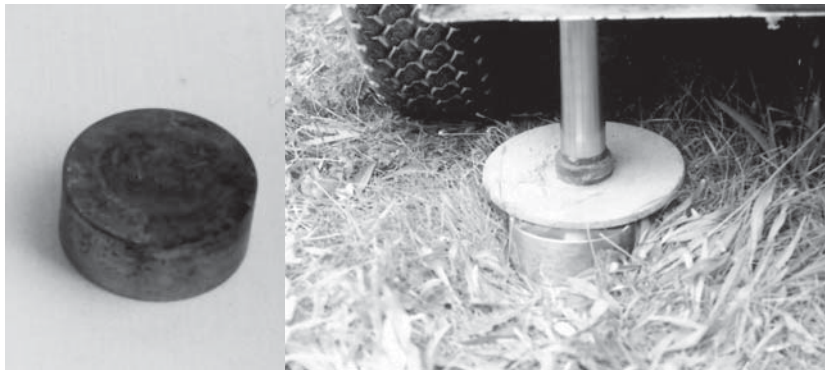
Podczas badań wykorzystano następujące źródła fali:

- metalowy ceownik wbity w grunt, impuls generowany był poprzez uderzenie z góry oraz poprzez uderzenie w bok (rys. 3a, b),
- drewnianą belkę, dociśniętą do powierzchni terenu ciężarem sondy, impuls generowany był tak samo jak w przypadku ceownika (rys. 3c).



RYSUNEK 3. Źródła generacji fali wykorzystywane podczas badań: a, b – ceownik, c – drewniana belka

FIGURE 3. Seismic sources used during in situ tests: a, b – channel bar, c – wooden beam



RYSUNEK 4. Metalowa płyta wykorzystywana w trakcie badań

FIGURE 4. Steel plate used during SCPT tests

- metalową płytę, dociśniętą do powierzchni terenu ciężarem sondy, impuls generowany był identycznie jak w dwóch poprzednich przypadkach (rys. 4),
- metalową konstrukcję wykonaną w ramach badań (rys. 5), składającą się ze stalowej szyny w kształcie dwuteownika długości 1 m i wysokości 0,12 m z dospawaną od spodu, na całej długości szyny, blachą o grubości 6 mm i wysokości 0,2 m (Bajda 2002); podczas badania blacha znajdowała się w gruncie, a cała belka przyciśnięta była ciężarem sondy, do górnej części przymocowany był ruchomy ciężarek, który pozwalał na uderzenie w belkę z góry oraz wzdłuż osi; gdy na skutek tłumienia fali w gruncie wraz ze wzrostem głębokości sondowania generowany sygnał był zbyt słaby, istniała możliwość zmiany wielkości, a tym samym również masy ciężarka i wytwarzania mocniejszego impulsu; podobne urządzenie (młot wahadłowy) zalecane jest przez Marchettiego do badań łopatką SDMT (Marchetti i in. 2008),
- metalowy zaostroszony pręt wbity w grunt, impuls generowany był poprzez uderzenie z góry,



RYSUNEK 5. Źródło fali sejsmicznej w postaci stalowej belki, wykonane w ramach badań
 FIGURE 5. Steel beam seismic source performed for SCPT tests

- metalowy „lizak” z tarczą o średnicy 0,2 m, wykonaną z blachy stalowej o grubości 3 mm, przyspawanej do metalowego pręta (rys. 6); używając młota, tarczę przed badaniem zagłębiano w gruncie równoległe do miejsca wprowadzania stożka, w odle-

głości około 1,5 m; sygnał wzbudzano poprzez uderzenie stalowej rury w bok z różnych stron oraz z góry.

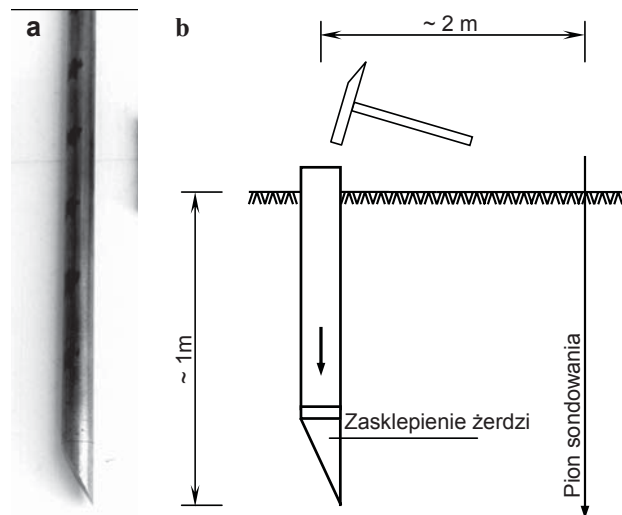
Żadne z przetestowanych źródeł nie dawało zadowalającego sygnału. Zapis fali na oscyloskopie nie pozwalał na jednoznaczne wskazanie wstępującego zbocza fali poprzecznej (a więc miejsca istotnego dla poprawnego i dokładnego odczytu). W związku z zaistniałą sytuacją powstała potrzeba skonstruowania źródła, które pozwoliłoby na uzyskanie czystego obrazu fali sejsmicznej. Zaprojektowano i wykonano źródło fali, którego konstrukcję ilustruje rysunek 7.



RYSUNEK 6. Źródło fali sejsmicznej w postaci metalowego „lizaka”
 FIGURE 6. Steel „lollypop” seismic source

Konstrukcja ta została wykonana z żerdzi stosowanej do sondowania zestawem BAT, długości 1 m. Dolny koniec żerdzi zaślepiony został końcówką ściętą pod kątem 30°, co umożliwiło generację czystej fali sejsmicznej. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość przedłużania i pogłębiania skonstruowanego źródła przez dokręcanie następnych żerdzi. Pozwala to na zwiększenie energii uderzenia i generację fali o zwiększonej amplitudzie, co ma znaczenie przy zwiększaniu głębokości badania.

Przed przystąpieniem do badania, w odległości około 1,5 m od planowanego



RYSUNEK 7. Urządzenie do wzbudzenia fali poprzecznej: a – widok ogólny, b – schemat budowy
 FIGURE 7. New seismic source: a – general view, b – construction diagram

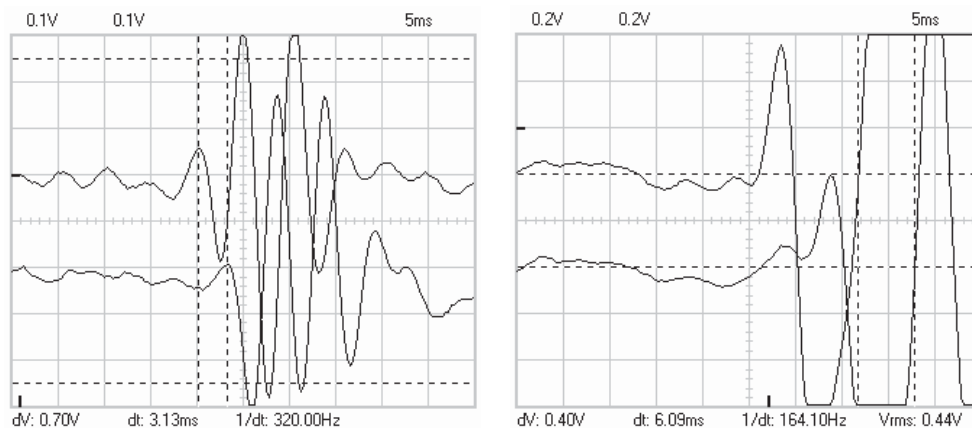
pionu sondowania sejsmicznego, źródło impulsu w postaci żerdzi zostało wciśnięte pionowo w grunt przy użyciu sondy Hyson 200 kN. Taki sposób postępowania zapewniał pionowość zagłębienia żerdzi. Odległość między pionem sondowania a źródłem fali wynikała z rozmiarów sondy i możliwości swobodnego generowania impulsu. Konstrukcja ta dawała lepsze wyniki niż opisywane powyżej źródła impulsu. Pozwoliła uzyskać sygnał, w którym można było jednoznacznie wskazać punkt wejścia fali poprzecznej (rys. 8). Jednocześnie jest to źródło dające powtarzalne wyniki. Podczas trzech kolejnych sondowań z wykorzystaniem nowego źródła fali nie zaobserwowano rażąco dużych różnic między poszczególnymi profilami pomiarowymi. Badania były wykonywane w tych samych warunkach gruntowych, a odległość poszczególnych profili pomiarowych od siebie wynosiła około 2 m.

Wyniki badań terenowych

Badania przeprowadzono na obiekcie Stegny, znajdującym się w Warszawie. Lokalizacja uwarunkowana była stosunkowo płytkim zaleganiem iłów trzeciorzędowych, które stanowią podłoże budowlane większości obiektów posadowionych na tym terenie.

W rejonie objętym badaniami od powierzchni terenu do głębokości około 4 m występują niespoiste utwory czwartorzędowe w postaci piasków drobnych i średnich. Pod utworami czwartorzędowymi leżą osady trzeciorzędowe – płoceńskie, które reprezentowane są przez kompleks iłów pstrych z soczewami i przewarstwieniami piasków.

W celu przetestowania wyżej wymienionych źródeł generacji fali sejsmicznej na omawianym terenie przeprowadzono 8 sondowań SCPT. Sondowania te pozwoliły na ocenę przydatności wyżej



RYSUNEK 8. Przykładowe odczyty z oscyloskopu
 FIGURE 8. Example of oscilloscope readings

wymienionych źródeł. Tylko w przypadku źródła w postaci żerdzi zakończonej odpowiednio ściętą końcówką uzyskano powtarzalność wyników badań oraz sygnał, w którym można było jednoznacznie wskazać punkt wejścia fali poprzecznej. Uzyskane wyniki sondowań SCPT, potwierdzające przydatność tego źródła do generacji fali sejsmicznej, przedstawiono na przykładzie dwóch sondowań: SCPT-7 i SCPT-8 (rys. 9 i 10). Znajdując Δt z analizy dwóch kształtów fal po-

przecznych oraz odległości (L) między dwoma geofonami, określono prędkość fali poprzecznej za pomocą równania:

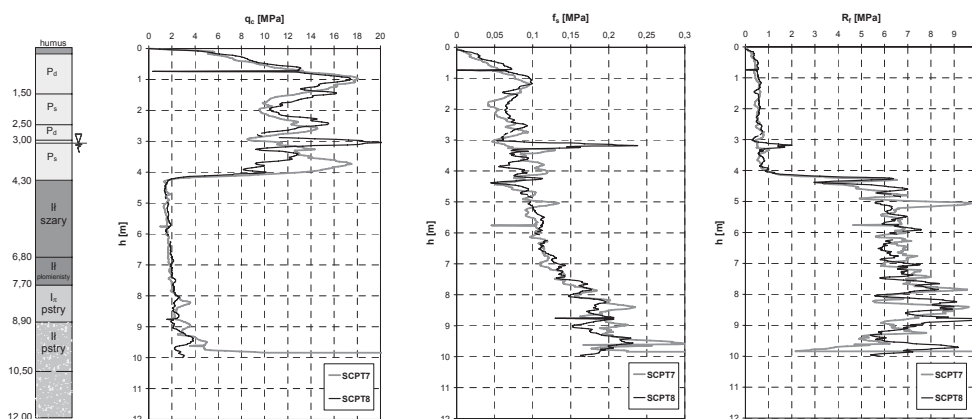
$$V_s = L/\Delta t \quad (1)$$

Moduł ścinania (G_o) określono z następującej zależności:

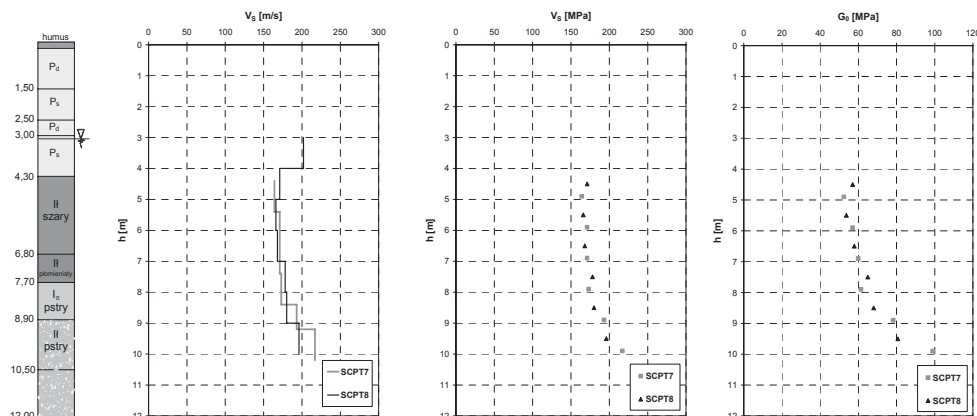
$$G_o = \rho V_s^2 \quad (2)$$

gdzie:

ρ – gęstość objętościowa gruntu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],
 V_s – prędkość fali poprzecznej [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].



RYSUNEK 9. Wyniki sondowań SCPT (Bajda 2002)
 FIGURE 9. SCPT tests results



RYSUNEK 10. Rozkład prędkości fali poprzecznej oraz wartości początkowego modułu ścinania z sondowań SCPT (Bajda 2002)

FIGURE 10. Profiles of shear wave velocity and shear modulus obtained from SCPT tests (Bajda 2002)

Ocena niepewności wyników pomiarów terenowych

Na terenie objętym badaniami wykonano 8 sondowań SCPT do głębokości od 10 do 16 m. Dla każdego sondowania na każdej głębokości pomiarowej wykonano od 3 do 5 powtórzeń pomiaru prędkości fali. Uzyskane wartości prędkości fali dla powtórzeń na poszczególnych głębokościach nie różniły się od siebie znacząco.

Dla dwóch wybranych profili SCPT przeprowadzona została analiza niepewności wyników pomiarów prędkości fali poprzecznej celem sprawdzenia przydatności oraz możliwości wykorzystania ich przy obliczeniach parametrów odkształceniowych (Bajda 2002).

Przy założeniu, że rozkład błędów pomiarów jest normalny, granice przedziałów niepewności dla wyników pomiaru V_s mogą być opisane za pomocą formuły:

$$V_s \pm e_p \quad (3)$$

gdzie e_p – niepewność rozszerzona.

Do oceny niepewności na poziomie ufności 95%, po uprzednio przeprowadzonej analizie zmienności wyników pomiaru w warunkach odtwarzalności, stosowany jest wzór:

$$e_p = 1,96s \quad (4)$$

gdzie s – odchylenie standardowe wyników otrzymanych w badaniach przeprowadzanych w warunkach odtwarzalności.

Sposób przeprowadzania sondowania statycznego wykluczał możliwość zapewnienia warunków powtarzalności, a tym bardziej odtwarzalności, ponieważ w pionach pomiar przeprowadzany był jednokrotnie. Zatem do celów analizy zmienności użyte zostały grupy danych budowanych z par wyników otrzymanych w miejscach sąsiadujących. Ponadto założono, że rozkład mierzonej cechy w blisko położonych miejscach jest podobny.

Ze względu na niezachowanie warunków odtwarzalności ocena niepewno-

ści wymaga posłużenia się szacowaniem przedziałowym:

$$e'_p \leq e_p \leq e''_p \quad (5)$$

opartym na skrajnych ocenach, wynikających z analizy zmienności:

- odchylenie standardowe powtarzalności, obliczone na podstawie średniej wariancji w grupie danych

$$e'_p = 1,96s_o \quad (6)$$

- odchylenie standardowe zmienności w całym zbiorze otrzymanych wyników:

$$e''_p = 1,96s_{tot} \quad (7)$$

Jednym z istotnych czynników, powodujących zróżnicowanie wyników pomiaru, jest głębokość, na której wykonywane jest badanie (prędkość fali sejsmicznej oraz moduł G_o wykazują trend ze zmianami σ_{v0}) – Młynarek i inni (2006). Wyznaczone zostało równanie regresji drugiego stopnia dla zależności badana cecha – głębokość i od każdego wyniku pomiaru odjęto odpowiednią wartość naprężenia, wynikającą z tego równania (uwzględniającą głębokość). Dla otrzymanych wyników obliczono odchylenie standardowe zmienności całkowitej i na tej podstawie oszacowano niepewność rozszerzoną (e_p''').

Dla wielkości V_s uzyskano następujące wyniki: $e_p' = 7,0137$, $e_p''' = 8,6606$, $e_p'' = 21,584$.

Ocenę niepewności uzupełnia obliczenie granicznej wartości powtarzalności (maksymalnej różnicy między pojedynczymi wynikami pomiaru uzyskiwanymi w warunkach powtarzalności z prawdopodobieństwem 95%). Powta-

rzalność wyników pomiarów obliczono z następującej zależności:

$$r = 2,8s_o \quad (8)$$

Dla badanego parametru uzyskano $r = 9,8192$.

Po analizie wyników obliczeń niepewności pomiarów można stwierdzić, że badania wykonane zostały prawidłowo, a powtarzalność pomiarów jest zadowalająca. W przypadku prędkości poprzecznej fali sejsmicznej błąd wynosi $V_s = 176,14 \pm 8,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ponieważ niepewność limituje precyzję obliczeń, więc wartość niepewności nie powinna być zbyt duża. W pracy przyjęto warunek akceptacji niepewności:

$$e_p \leq 0,1\bar{p} \quad (9)$$

gdzie \bar{p} jest wartością średnią uzyskaną w zbiorze danych, na podstawie których obliczana była niepewność.

Po obliczeniu wartości e_p podstawiono ją do nierówności (5). Uzyskano następujący wynik:

$$7,0137 \leq 17,6141 \leq 21,5840 \quad (10)$$

a więc tym samym został spełniony warunek dotyczący oceny niepewności pomiarów prędkości fali sejsmicznej (współczynnik zmienności nie przekracza 10%).

Wnioski

Pomiar sondą sejsmiczną SCPTU związany jest z wytwarzaniem impulsu powodującego drganie cząstek gruntowych, którego jakość zależy od źródła. Źródło impulsu musi być tak dobrane, aby emitowało czysty sygnał, dający

możliwość dokładnej interpretacji fali zarejestrowanej na oscyloskopie. Warunkiem jest dobry kontakt źródła z gruntem.

Zaprojektowane źródło generacji fali umożliwia uzyskanie dobrej jakości sygnału, daje powtarzalne wyniki, które mogą być wykorzystywane przy obliczeniach początkowych wartości parametrów odkształceniowych, co potwierdziła analiza niepewności wyników badań terenowych prędkości fali.

Sondowania sejsmiczne w danym profilu pomiarowym należy prowadzić z wykorzystaniem tylko jednego źródła do generacji fali.

Siła sygnału docierającego do sondy zależy głównie od powierzchni i jakości kontaktu źródła fali z gruntem oraz rodzaju gruntów w podłożu. Jakość sygnału docierającego do geofonu zależy głównie od rodzaju źródła i sposobu generowania fali. Należy zatem prowadzić dalsze badania w kierunku poszukiwania nowych, zautomatyzowanych źródeł fal sejsmicznych oraz przeanalizować wpływ sposobu generowania sygnału na wyniki pomiarów prędkości poprzecznej fali sejsmicznej, ze szczególnym uwzględnieniem generowanej częstotliwości sygnału przez źródło.

Źródło fali sejsmicznej w postaci młota wahadłowego zostało wykorzystane w trakcie badań przedstawionych w pracy Gogolik (2006). Testy replikacyjne wykazały dużą powtarzalność wyników. W badaniach obejmujących wykonanie kilkunastu powtórzeń pomiaru prędkości na jednym poziomie (w zakresie głębokości od 3 do 18 m) uzyskano średni współczynnik zmienności na poziomie 0,6%. W związku z tym należałoby sprawdzić, czy jakość sygnału

nie zależy od rodzaju urządzenia pomiarowego, które umożliwi rejestrację fali podczas sondowania materiału, z którego urządzenie zostało wykonane, oraz masy urządzenia wzbudzającego impuls.

Literatura

- BAJDA M. 2002: Wykorzystanie sondowań statyczno-sejsmicznych do oceny parametrów mechanicznych gruntu. Praca doktorska. SGGW, Warszawa.
- GOGOLIK S. 2006: Wytrzymałość na ścinanie osadów poflotacyjnych określona metodą statycznego sondowania typu CPTU ze stożkiem sejsmicznym. Praca doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań.
- IRTP 1999. ISSMGE Technical Committee TC16 Ground Property Characterisation from In-situ testing: International Reference Test Procedure (IRTP) for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration Test with pore pressure (CPTU). Proc. 12th ECSMGE Amsterdam, Balkelma.
- LIPIŃSKI M.J. 2000: Pomiar prędkości fal akustycznych in situ dla określenia parametrów geotechnicznych. Jubileuszowa Sesja Naukowa „Geotechnika w Budownictwie i Inżynierii Środowiska” poświęcona 47-leciu pracy naukowej i 70-leciu urodzin Profesora Eugeniusza Dembickiego, Gdańsk.
- LUNNE T., ROBERTSON P.K., POWELL J.J.M. 1997: Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic and Professional, London.
- MARCHETTI D., MARCHETTI S., MONACO P., TOTANI G. 2008: Experience with seismic dilatometer (SDMT) in various soil types. In: Geotechnical and Geophysical Site Characterization – Huang & Mayne (eds.). Taylor & Francis Group, London.
- McGILLIVRAY A.V., MAYNE P.W. 2008: An automated seismic source for continuous-push shear wave velocity profiling with SCPT and frequent-interval SDMT. In: Geotechnical and Geophysical Site Characterization – Huang & Mayne (eds.). Taylor & Francis Group, London.

MŁYNAREK Z., GOGOLIK S., MARCHETTI D. 2006: Suitability of the SDMT method to assess geotechnical parameters of post-flotation sediments. Proc. of the 2nd International Flat Dilatometer Conference, Washington.

Summary

Seismic source in SCPT tests. The paper presents examples of seismic sources which has been developed to the generation of shear wave impulses during SCPT soundings. In situ measurements of seismic wave velocity performed at Stegny site were described. Geological description of test

site, test procedure and analysis of obtained results were shown in this paper. An analysis of seismic cone penetration tests results indicates that new seismic source, made for SCPT tests, provides accurate and reproducible signal for measurements of the shear wave velocity V_s – a basic input parameter for seismic analyses.

Author's address:

Marek Bajda
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: marek_bajda@sggw.pl