



Marek BAJDA*, Katarzyna MARKOWSKA-LECH*, Mariusz LECH*, Zdzisław SKUTNIK*

Terenowe badania sejsmiczne w praktyce geotechnicznej

Streszczenie: W praktyce inżynierskiej rozpoznanie budowy podłoża obiektów budowlanych przeprowadzane jest głównie na podstawie sondowań geotechnicznych uzupełnionych wierceniami oraz badaniami laboratoryjnymi. Główną zaletą badań terenowych jest fakt, że są one wykonywane w rzeczywistych warunkach gruntowych (układ warstw, stan naprężenia), które nie zawsze mogą być w pełni odtworzone w laboratorium. Ponadto rozwój nowoczesnych technik i urządzeń pomiarowych coraz bardziej poszerza możliwość ich stosowania. Nowe zadania stawiane geoinżynierii wymagają nowych technik do oceny warunków gruntowych *in situ* oraz do monitorowania procesów zachodzących w podłożu. Znaczącą rolę w zaspokojeniu tych potrzeb odgrywają metody geofizyczne zaadoptowane do celów geotechnicznych. Badania geofizyczne stosowane na szeroką skalę w geologii poszukiwawczej oparte są na pomiarach fizycznych właściwości skał i gruntów. Największy postęp zanotowano w dziedzinie badań sejsmicznych, które w zastosowaniach geotechnicznych sprowadzają się do określania prędkości fal akustycznych a następnie skorelowania ich z parametrami mechanicznymi gruntu.

Pomiary prędkości fali sejsmicznej w podłożu gruntowym pozwalają na sporządzenie przekrojów i map rozmieszczenia utworów o jednakowych parametrach (właściwościach). Badania te pozwalają również na wstępne rozpoznanie podłoża do celów budowlanych i wskazanie obszarów do szczegółowego rozpoznania np. sondowaniami geotechnicznymi. 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 najodpowiedniejszymi metodami dokładnego określenia parametrów gruntu dla całego zakresu odkształceń.

W artykule przedstawione zostaną metody pomiaru prędkości fal sejsmicznych w ośrodku gruntowym oraz przykładowe wyniki uzyskane na podstawie pomiarów sondą statyczną SCPT, dylatometrem SDMT i metodą wielokanałowej analizy fal sejsmicznych MASW.

Słowa kluczowe: sondowania geotechniczne, SCPTU, SDMT, badania geofizyczne, fala poprzeczna, moduł ścinania

Seismic field investigations in geotechnical practice

Abstract: In geotechnical engineering practice an investigation of the subsoil conditions is carried out mainly on the basis of geotechnical tests supplemented by boreholes and laboratory tests. The main advantage of in situ tests is that they are carried out in natural soil conditions, which cannot always be fully reconstructed in the labo-

* Dr inż., Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa; e-mail: marek_bajda@sggw.pl, katarzyna_markowska@sggw.pl, mariusz_lech@sggw.pl, zdzislaw_skutnik@sggw.pl

ratory. Furthermore, the development of modern techniques and measuring devices increasingly widens their applicability. New challenges in geotechnical engineering require new techniques to assess the in situ ground conditions and to monitor the processes occurring in the subsoil. Geophysical methods adapted to geotechnical purposes play a significant role in meeting these requirements. Commonly used geophysical tests in geological surveys are based mainly on measurements of rocks and soils physical properties. The greatest progress has been made in the field of seismic surveys, which in geotechnical applications boil down to the determination of the seismic wave velocity and then to the correlation with the mechanical soil parameters. The seismic waves velocity measurements in the subsoil allows the cross-sections and distribution maps of deposits of the same parameters (properties) to be prepared. Such tests also help to initially investigate the subsoil for the construction purposes and to determine the zones for further detailed analyses (geotechnical tests). Another advantage of the geophysical seismic tests based on waves propagation is they allows for the dynamic parameters of the subsoil to be determined. That makes them most suitable methods for determination of the soil parameters over a range of deformations.

The article presents the methods of measuring the seismic waves velocity in the subsoil and some of the test results obtained from the SCPT static test, SDMT dilatometer tests and the multi-channel analysis method of the MASW surface waves.

Keywords: in situ tests, SDMT, SCPT, geophysical investigation, shear wave, shear modulus

Wprowadzenie

Znajomość stanu naprężenia i odkształcenia powstającego w ośrodku gruntowym po przyłożeniu określonego obciążenia ma istotne znaczenie dla właściwego projektowania obiektów posadowionych na gruncie. W celu przeprowadzenia obliczeń inżynierskich w geotechnice zakłada się sprężystość gruntu i stosuje się modele gruntowe wykorzystujące wzory teorii sprężystości, co z kolei wymusza rozwój technik badań i urządzeń umożliwiających otrzymywanie „prawdziwych” parametrów gruntowych, czyli uzyskanych przy możliwie najmniejszych odkształceniach i spełniających przyjęte założenia. Zainteresowanie technikami pomiaru o dużej rozdzielczości wynika również z nieliniowości zależności naprężenie-odkształcenie w gruntach, zwłaszcza w zakresie małych odkształceń. Główną zaletą badań sejsmicznych jest możliwość określenia parametrów charakteryzujących sprężyste właściwości ośrodka gruntowego, które odnoszą się do zakresu odkształceń 10^{-6} – 10^{-5} i związane są z obciążeniami nieniszczącymi – użytkowymi, zarówno dynamicznymi jak i statycznymi. W opisie odkształcenia gruntu używane są wskaźniki ścisłości oraz moduły sprężystości. Dla zakresu bardzo małych odkształceń stosowany jest moduł odkształcenia postaciowego G_0 (G_{max}), który zgodnie z teorią sprężystości można określić ze wzoru wykorzystującego prędkość fali poprzecznej V_s :

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (1.1)$$

gdzie:

- ρ – gęstość objętościowa gruntu,
- V_s – prędkość fali poprzecznej.

Spośród metod terenowych pozwalających na uzyskanie początkowych wartości modułu odkształcenia postaciowego wyróżnia się metody otworowe (*crosshole* i *downhole*), metody bezotworowe (sondowania SCPTU i SDMT) oraz metody powierzchniowe (CSWS, SASW, MASW). Wszystkie opierają się na pomiarze prędkości fal akustycznych rozchodzących się w badanym gruncie od nadajnika do odbiornika.

1. Metodyka i wyniki badań

W ostatnich latach w wyniku tendencji do unifikacji i automatyzacji pomiarów konfiguracja wykonywania badań sejsmicznych do celów geotechnicznych uległa zmianie. W odniesieniu do badań typu *crosshole* (prześwietlanie międzyotworowe) i *downhole* (pionowe profilowanie otworu) modyfikacje polegają na bezotworowym wykonywaniu tych badań. Jest to możliwe przez wmontowanie w końcówkę sondy statycznej CPTU geofonów nadawczych i odbiorczych (stożek jedno- lub dwugeofonowy SCPTU) oraz rozbudowanie klasycznego dylatometru o geofony odbiorcze (SDMT). Powstałe hybrydowe urządzenia do badań in situ: SCPTU oraz SDMT poprzez zastosowanie dwóch technik podczas pojedynczego sondowania dostarczają zoptymalizowanych danych jednocześnie dla małych jak i dużych odkształceń. Umożliwiają osiągnięcie większej dokładności w prowadzonych analizach, zminimalizowanie ilości badań różnego typu dla jednej lokacji, poprawiając ekonomikę i funkcjonalność.

1.1. Sondowania sejsmiczne SCPTU

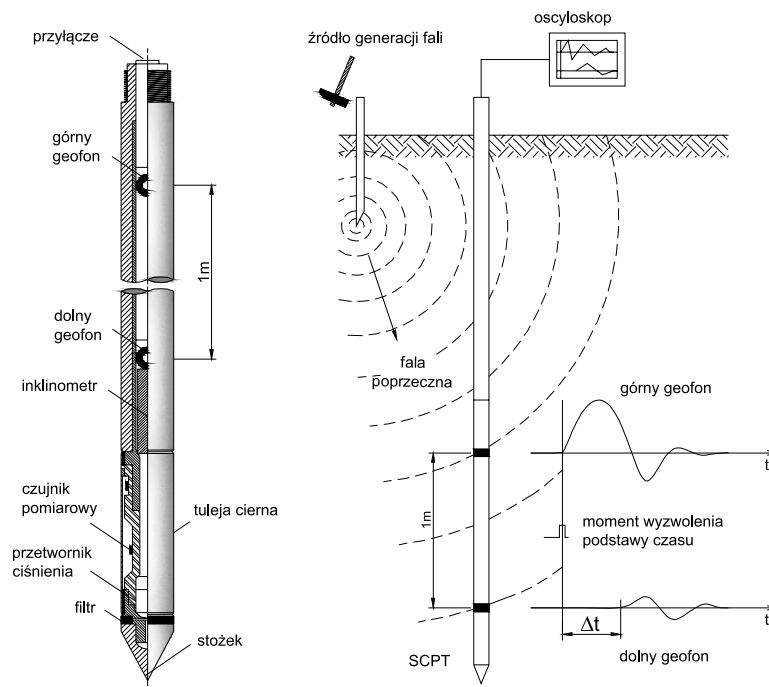
W technice sondowań statycznych wykorzystuje się stożek o powierzchni podstawy 10 cm² i kącie wierzchołkowym 60°, do pograżania którego stosuje się siłowniki hydrauliczne, dające nacisk od 10 do 20 ton (100 do 200 kN). Z sondowania statycznego otrzymuje się bezpośrednio, w zależności od typu zastosowanej do badań końcówki, następujące parametry sondowań: wykres jednostkowych oporów stożka q_c , wykres jednostkowych oporów tarcia gruntu na tulei ciernej f_s , wykres ciśnienia wody w porach gruntu w trakcie sondowania u_c .

Metodyka sondowań statycznych, budowa końcówek pomiarowych oraz interpretacja wyników badań była wielokrotnie prezentowana w literaturze krajowej i zagranicznej (Lunne i in. 1997; Sikora 2006; Markowska-Lech i in. 2007; Młynarek 2010; Bajda i Skutnik 2010).

W badaniach wykorzystany został stożek SCPT wyposażony w dwa geofony pozwalające na pomiar prędkości fali sejsmicznej. Składa się on z dwóch zasadniczych części (rys. 1). Pierwsza z nich odpowiada za pomiar parametrów uzyskiwanych w standardowym badaniu CPTU, czyli pomiar oporu stożka q_c , tarcia na poboczniczy f_s , ciśnienia wody w porach u_c oraz odchylenia stożka od pionu.

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

Oprócz piezostożka z geofonami sprzęt do pomiaru fal poprzecznych składał się z dwukanałowego oscyloskopu i komputera, na którym zainstalowane było oprogramowanie do obsługi oscyloskopu. Na każdej głębokości pomiarowej podczas przerywania penetracji na powierzchni generowana była fala poprzeczna. Impuls fali docierający najpierw do górnego geofonu, zostaje zapisany w pamięci oscyloskopu i następuje automatyczne wyzwolenie podstawy czasu. Następnie drugi kanał oscyloskopu rejestruje sygnał, który dociera do geofonu umieszczonego niżej (rys. 1).



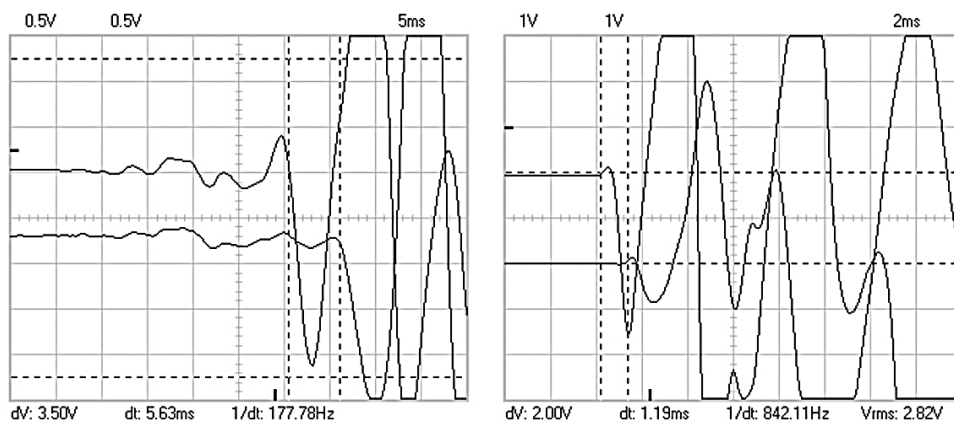
Rys. 1. Schemat stożka sejsmicznego oraz pomiaru prędkości fali

Fig. 1. The seismic cone and measurement of shear wave velocity

Zaletą sondy sejsmicznej z dwoma geofonami w konfiguracji z dwukanałowym oscyloskopem jest wyeliminowanie części dodatkowego osprzętu w postaci wyzwalacza, który w stożkach zawierających jeden geofon sprzężony jest ze źródłem impulsu wysyłanego z powierzchni ziemi. Przy badaniu sondą dwugeofonową impuls dociera do pierwszego, górnego geofonu i dopiero wtedy automatycznie wyzwolana jest podstawa czasu do pomiaru prędkości fali. Pozwala to na uniknięcie błędów w rejestracji czasu przebiegu fali od źródła do geofonu znajdującego się w badanym gruncie. Ponadto przy pomiarach sondą z dwoma geofonami zawsze badana jest warstwa gruntu o miąższości 1 m, ponieważ otrzymuje się dokładnie różnicę pomiędzy czasami dotarcia impulsu do górnego i dolnego geofonu.

Identyfikacja momentu wzbudzenia fali poprzecznej, a tym samym określenie różnicy czasu rejestracji fali poprzecznej przez odbiornik górny i dolny ($t_2 - t_1$) oparta jest na wzrokowej interpretacji obrazu fali zaliczanej do metod bezpośrednich (Lutz 2005). Polega ona na wytypowaniu charakterystycznych punktów obu zarejestrowanych sygnałów i określeniu przesunięcia w czasie tych punktów. W zależności od jakości sygnału a co za tym idzie jakości otrzymanego obrazu fali wykorzystywana jest jedna z trzech metod: metoda *peak to peak* (czas dotarcia fali poprzecznej określa się na podstawie punktu szczytowego obrazu fali docierającej do odbiornika), metoda *first arrival* (czas dotarcia fali poprzecznej określa się jako odpowiadający pierwszemu nagłemu wzrostowi sygnału i odchyleniu obrazu fali od osi czasu) oraz metoda *cross over* (interpretacja lustrzanego odbicia dwóch zarejestrowanych fal).

Badania SCPT wykonano za pomocą dwugeofonowego stożka włoskiej firmy ISMES w konfiguracji z dwukanałowym oscyloskopem oraz komputerem umożliwiającym obsługę



Rys. 2. Przykładowe odczyty z oscyloskopu

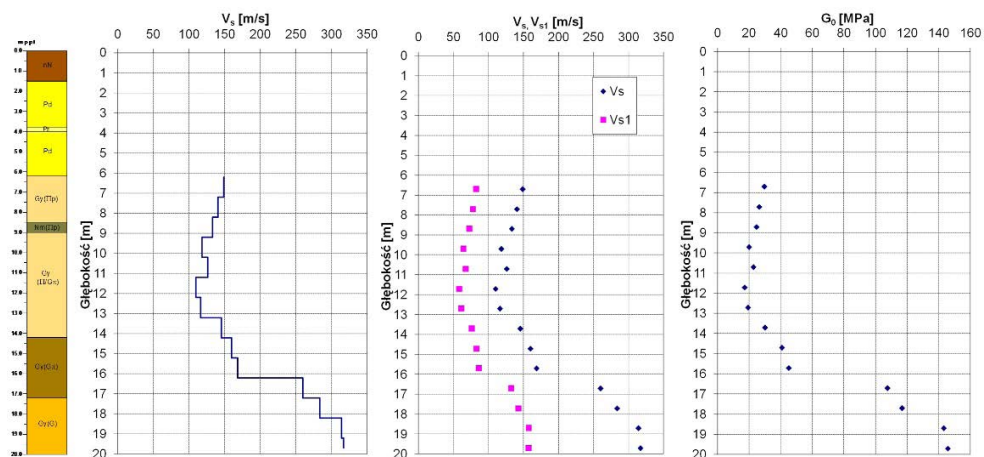
Fig. 2. Example of oscilloscope readings

modułu sejsmicznego. Układ ten pozwolił na pomiar czasu, w jakim generowana na powierzchni terenu fala poprzeczna docierała od górnego do dolnego geofonu.

Prędkość fali sejsmicznej V_s zależy od stanu naprężenia i porowatości gruntu, dlatego prędkość fali poprzecznej V_s normalizowana jest względem naprężenia pionowego σ'_{v0} , obliczając prędkość V_{s1} według poniższego wzoru (Robertson 1992):

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,25} \quad (1)$$

Wyniki badań SCPT w postaci wykresów rozkładu prędkości fali V_s oraz V_{s1} jak również obliczonego modułu ścinania G_0 przedstawiono na rysunku 3.

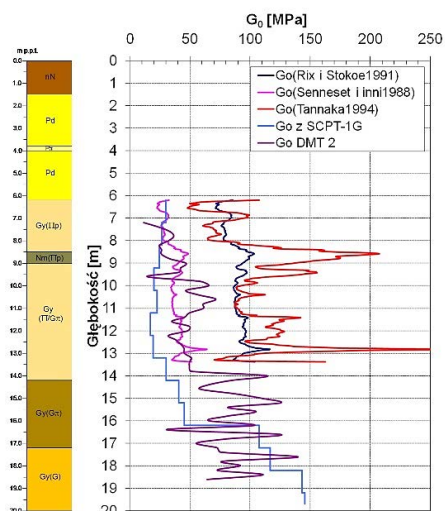


Rys. 3. Wyniki badań SCPT

Fig. 3. The results of the SCPT test

Badaniami objęte zostały grunty organiczne występujące w tzw. rynnie żoliborskiej. Wartości prędkości fali poprzecznej uzyskane z badań sejsmicznych porównano z wartościami uzyskanymi ze wzorów empirycznych bazujących na wielkościach uzyskanych ze standardowych sondowań CPT i DMT (Marchetti 1980; Senneset i in. 1988; Rix i Stokoe 1991; Tanaka 1994). Szczegółowy opis terenu objętego badaniami oraz przeprowadzonych badań przedstawiono w pracy Bajdy i Skutnika (2010).

Określone na podstawie wzorów empirycznych i określone na podstawie sondowań SCPT i badań DMT wartości modułu G_0 w funkcji głębokości przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Porównanie wartości modułu ścinania otrzymanych z badań in situ

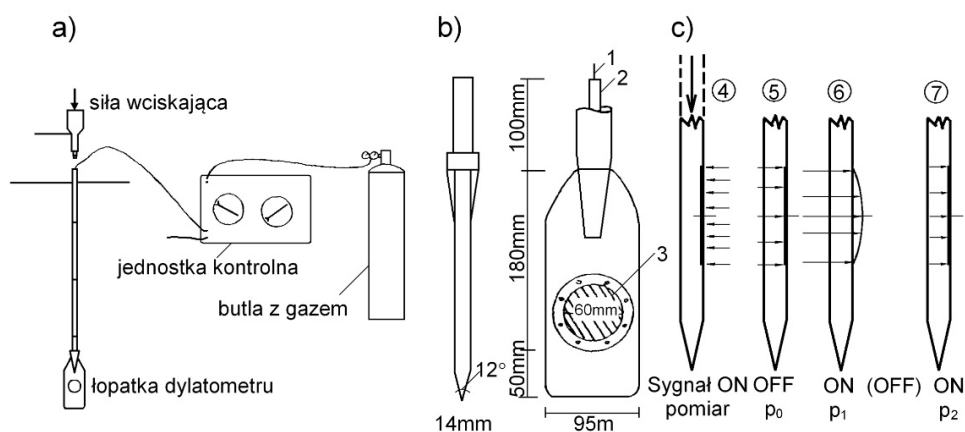
Fig. 4. Comparison of shear modulus values obtained from in situ tests

Zestawienie na wspólnym wykresie wartości modułu G_0 otrzymanych z różnego rodzaju badań *in situ* (rys. 4) pozwala zauważyć znaczne rozbieżności pomiędzy wartościami tego modułu uzyskanymi na podstawie bezpośredniego pomiaru prędkości fali sejsmicznej – badania SCPT i obliczonymi za pomocą wzorów empirycznych na podstawie wyników sondowań CPT i DMT. Analiza wyników badań wykonanych sondą CPT wskazuje, że w zależności od zastosowanego wzoru uzyskuje się różne wartości modułu ścinania G_0 . Pozwala to na wyciągnięcie wniosku, że prezentowane w literaturze charakterystyki interpretacyjne mają charakter regionalny i nie mogą być stosowane bezkrytycznie. Istnieje zatem potrzeba wykonywania geotechnicznych pomiarów sejsmicznych w celu uzyskiwania wiarygodnych wartości początkowych parametrów odkształceniowych.

1.2. Sondowania dylatometryczne SDMT

Standardowe badania DMT przeprowadzone są poprzez pograżanie łopatkę wyposażonej w stalową membranę pomiarową i zatrzymanie jej co 0,2 m w celu wykonania pomiarów

na wyznaczonej głębokości. W chwili zatrzymania łopatki dokonuje się pomiaru ciśnienia p_0 wynikającego z kontaktu membrany z gruntem i ciśnienia p_1 – wartości ciśnienia odpowiadającego odkształceniu membrany w kierunku prostopadłym do gruntu oraz ciśnienia p_2 – wartość ciśnienia po powrocie membrany do jej początkowej pozycji (rys. 5).



Rys. 5. Schemat dylatometru Marchettiego (a), budowa łopatki pomiarowej (b) i etapy badania (c):

1 – przewód elektryczny, 2 – przewód pneumatyczny, 3 – stalowa membrana, 4 – pograżenie łopatki, 5 – pomiar p_0 , 6 – pomiar p_1 , 7 – pomiar p_2

Fig. 5. View of Marchetti dilatometer (a), blade construction (b) and dilatometer test chase (c):

1 – electric cable, 2 – pneumatic cable, 3 – membrane, 4 – insertion the blade, 5 – measurement p_0 , 6 – measurement p_1 , 7 – measurement p_2

Jednostka kontrolno-pomiarowa, której głównym zadaniem jest rejestracja ciśnień p_0 , p_1 i p_2 wyposażona jest w dwa manometry, zawory do kontroli przepływu gazu i kalibracji membrany oraz zawór do połączenia z przewodem pneumatyczno-elektrycznym.

Dylatometr sejsmiczny SDMT jest połączeniem standardowego dylatometru zaprezentowanego przez Marchettiego (1980) oraz modułu sejsmicznego (Marchetti i in. 2008a; Amoroso i in. 2012). Moduł ten składa się z dwóch geofonów w rozstawie 0,5 m zainstalowanych w żerdzi umieszczonej za łopatką dylatometru (rys. 6). Pomiar prędkości fali sejsmicznej (poprzecznej lub podłużnej) wykonywany jest podobnie jak w trakcie badania sondą SCPT.

Dylatometr sejsmiczny w swojej obecnej wersji zyskał już spore grono zwolenników i istnieje obszerna literatura omawiająca zastosowanie badań SDMT do interpretacji wyników sondowań dylatometrycznych, określania rodzaju gruntu i oceny parametrów geotechnicznych oraz projektowania konstrukcji geotechnicznych (Cavallaro i in. 2006; Bihs i in. 2010; Carroll i in. 2012; Drevininkas i in. 2012; Młynarek i in. 2012a; Młynarek in. 2012b; Vargas i Coto 2012; Galas 2013; Cavallaro i in. 2015).

Rejestracja, zapis i interpretacja uzyskanych z pomiarów sejsmicznych prędkości fali odbywa się automatycznie z wykorzystaniem oprogramowania dostarczonego wraz z dylatometrem. Do identyfikacji momentu wzbudzenia fali poprzecznej wykorzystywana jest jedna z metod pośrednich (Lutz 2005) – metoda korelacji krzyżowej (*cross correlation method*). Metoda ta szacuje miarę podobieństwa pomiędzy dwoma zarejestrowanymi sygnałami i po-

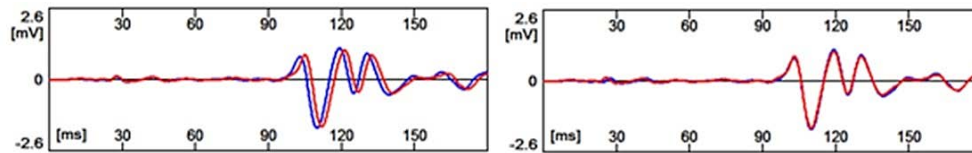


Rys. 6. Wyposażenie dylatometru sejsmicznego (Marchetti i in. 2008b)

Fig. 6. Seismic dilatometer equipment (Marchetti at al. 2008b)

lega na przesuwaniu na osi czasu jednego sygnału względem drugiego aż do maksymalizacji wartości korelacji krzyżowej.

Przykładowe obrazy zarejestrowanej przez odbiornik fali oraz przesunięte względem siebie o wartość czasu Δt (dla którego uzyskano maksymalną wartość korelacji krzyżowej) sygnały z górnego i dolnego geofonu przedstawiono na rysunku 7.

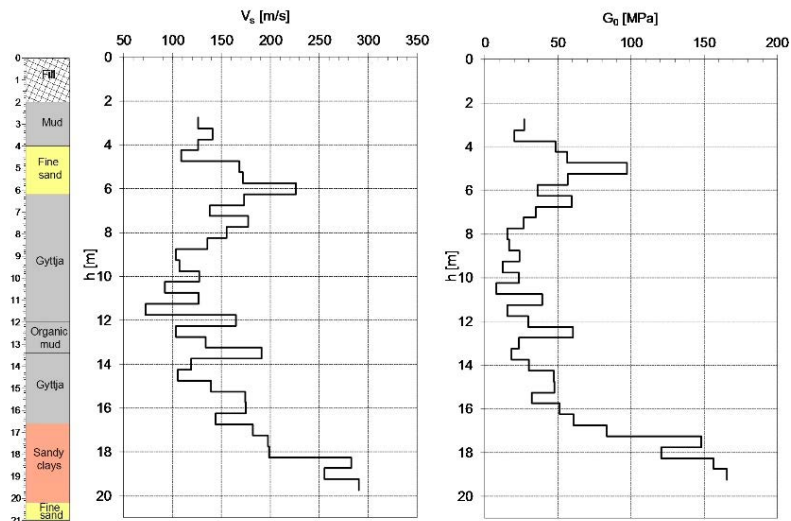


Rys. 7. Przykładowy obraz fali poprzecznej

Fig. 7. Example of a shear wave from the SDMT test

Na podstawie sondowania przeprowadzonego w gruntach organicznych wypełniających rynnę żoliborską oprócz standardowych charakterystyk uzyskiwanych na podstawie badań DMT dodatkowo określono rozkład prędkości fali poprzecznej V_s w profilu gruntowym. Znajomość prędkości fali umożliwiła określenie wartości początkowego modułu ścinania G_0 dla analizowanych gruntów. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 8.

Wyniki uzyskane na podstawie sondowań sejsmicznych SDMT potwierdzają budowę geologiczną podłoża oraz przedstawiają wiarygodny profil rozkładu sztywności podłoża objętego badaniami. Uzupełnienie badań dylatometrycznych (dedykowanych parametrom odkształceniowym) o pomiar prędkości fali poprzecznej zwiększyło możliwości interpretacyjne wyników badań o zakresu małych odkształceń rzędu 10^{-6} – 10^{-5} % istotnych dla takich zagadnień jak reakcja sejsmiczna gruntów, dynamiczne oddziaływanie pomiędzy gruntem i fundamentem czy projektowanie fundamentów specjalnych, dla których dopuszcza się bardzo małe przemieszczenia.



Rys. 8. Wyniki badań SDMT

Fig. 8. Profiles of data from the SDMT test

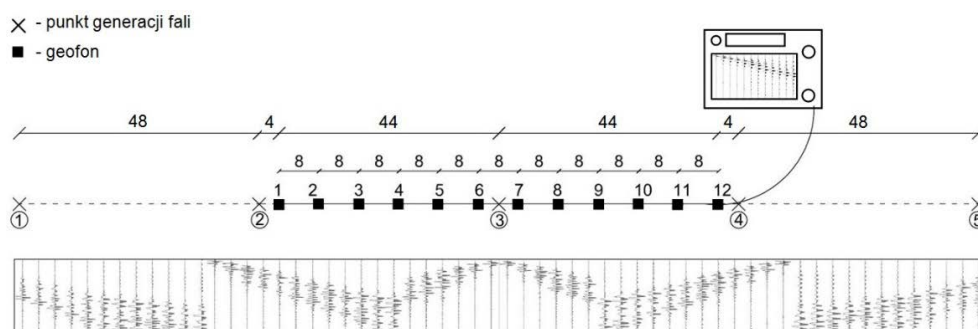
1.3. Technika wielokanałowej analizy fal sejsmicznych (system sejsmiki powierzchniowej) MASW

Technika wielokanałowej analizy fal powierzchniowych z ang. *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) jest sejsmiczną metodą badawczą bazującą na wyodrębnieniu fal poprzecznych spośród wygenerowanych powierzchniowych fal typu Rayleigha, a następnie na ich analizie, przy wykorzystaniu zależności: prędkości i tłumienia fal poprzecznych od właściwości sprężystych oraz gęstości objętościowej ośrodka gruntowego (Heisey i in. 1982). Metoda MASW pozwala w sposób ciągły i bezinwazyjny określić rozkład tej prędkości fali wraz ze zmianą głębokości i wzdłuż profilu badawczego. Ze względu na swoje zalety badania te zyskują coraz większe grono zwolenników przy przeprowadzaniu ocen stanu technicznego budowli hydrotechnicznych, odkształceń podłoża i korpusu wału czy też do geologiczno-inżynierskiego rozpoznania warunków gruntowych podłoża (Krzywiec i Bestyński 2001; Ślusarczyk 2001; Gołębiewski i in. 2012).

Powierzchniowe badania geofizyczne wykonano techniką wielokanałowej analizy fal sejsmicznych (MASW) na fragmencie prawobrzeżnego wału przeciwpowodziowego Wisły. Analizowany fragment wału wytypowany został do badań na podstawie wizji lokalnej oraz analizy materiałów archiwalnych. W miejscu tym wielokrotnie, podczas powodzi, dochodziło do licznych przesiąków przez korpus i podłoże wału.

W badaniach wykorzystano urządzeniem włoskiej firmy PASI. Urządzenie to składa się z jednostki centralnej z zainstalowanym oprogramowaniem, dwudziestu czterech geofonów o częstotliwości 10Hz, geofonu startowego (wyzwalacza), aluminiowej płyty służącej do wzbudzenia fal sejsmicznych oraz zestawu przewodów umożliwiających połączenie całego układu pomiarowego.

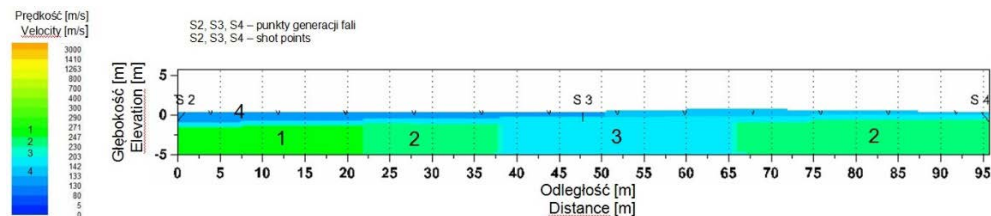
Badanie sejsmiczne (MASW) przeprowadzono metodą sejsmiki refrakcyjnej z wykorzystaniem 12 geofonów przy maksymalnym rozstawie 8 m. Falę wygenerowano poprzez uderzenie młotem w aluminiową płytę. W badaniu zastosowana została standardowa metoda pomiaru i w sumie wykonano 5 uderzeń: 2 uderzenia offsetowe i 3 pomiarowe (na końcach i w środku rozstawy geofonów rys. 9; Redpath 1973). Bezpośrednio po badaniu otrzymano wyniki w formie sejsmogramów (rys. 9). Po skończeniu pobierania danych zostały one przefiltrowane i zinterpretowane za pomocą programu Winsism. Końcowym efektem było uzyskanie rozkładu prędkości fali w profilu pomiarowym (rys. 10).



Rys. 9. Schemat lokalizacji punktów generacji fali oraz przykładowe sejsmogramy

Fig. 9. Geophone spacing, shot distance to receiver and recorded seismograms

W przekroju uzyskanym z badań MASW wyróżniono 3 strefy rozkładu prędkości fali w nasypie (rys. 10). W strefie nr 3, znajdującej się w środku profilu, zaobserwowano najniższe prędkości rzędu 230 m/s. Taki rozkład prędkości wyraźnie wskazuje na znajdującą się w tym obszarze rozluźnienia materiału tworzącego wał. Mniejsza prędkość fali oznacza jej utrudnioną propagację, co może być spowodowane niedostatecznym zagęszczeniem materiału w tym obszarze. Pozwala to przypuszczać, że to właśnie w obrębie strefy nr 3 występowały największe przesiąki przez korpus wału. Na podstawie przeprowadzonych powierzchniowych badań sejsmicznych w miejscu wskazującym na największe rozluźnienie w korpusie wału (strefa nr 3) wykonano kontrolne badanie korpusu wału sondą dynamiczną. Do badań wykorzystano sondę lekką DPL o masie młota 10 kg. Sprzęt oraz metodyka badania były zgodne z wytycznymi zawartymi w PN-B-04452:2002.



Rys. 10. Wynik pomiarów metodą refrakcyjną (MASW)

Fig. 10. MASW test results

Wykonane sondowanie potwierdziło wyniki powierzchniowych badań sejsmicznych. W profilu pomiarowym do głębokości około 3 m występuje piasek w stanie luźnym. Świadczy to o wyraźnym osłabieniu konstrukcji wału w analizowanym miejscu i potwierdza istnienie warunków sprzyjających przesiąkom na analizowanym odcinku wału. Poniżej głębokości 3 m w gruntach niespoistych budujące obwałowanie zarejestrowano większe wartości stopnia zagęszczenia (stan średnio zagęszczony), jednakże również nie są to wartości zagęszczenia spełniające normy przewidziane dla tego typu budowli.

Podsumowanie

Rozwój technik badawczych w zakresie metod geofizycznych, w tym badań sejsmicznych, pozwala na wykorzystanie tych metod w zagadnieniach geotechnicznych. Wyniki badań geofizycznych, mimo uśrednień pomiarów wynikających z ich nieinwazyjnego charakteru, korelują ze stanem gruntów określonym na podstawie standardowych badań geotechnicznych.

Poprawne oszacowanie wartości prędkości fali poprzecznej umożliwia uzyskanie mierzalnych wartości parametrów odkształceniowych gruntów w zakresie małych odkształceń, np. początkowego modułu odkształcenia postaciowego G_0 . Parametr ten jest istotny w praktycznych rozwiązaniach geotechnicznych, zwłaszcza przewidywania zachowania się gruntu w danym zakresie odkształceń.

Wartości uzyskanych w ten sposób modułów można uznać za referencyjne dla potrzeb poszukiwania empirycznych zależności o charakterze regionalnym umożliwiających oszacowanie wartości początkowych parametrów odkształceniowych bez konieczności wykorzystywania sprzętu do badań sejsmicznych.

Niewątpliwą zaletą techniki MASW jest jej nieinwazyjność, dzięki której można uzyskać informacje na temat stanu technicznego wału bez konieczności dogęszczania siatki otworów znacząco naruszających strukturę korpusu obwałowania. Badania te dzięki ciągłości profili pomiarowych umożliwiają zlokalizowanie stref nieciągłości (rozluźnień), które mogą być pominięte podczas standardowej kontroli stanu wałów przeciwpowodziowych na podstawie punktowych, rzadko zlokalizowanych wierceń i sondowań.

Badania sejsmiczne pozwalają również na wstępne rozpoznanie budowy podłoża i wskazanie obszarów do szczegółowego rozpoznania np. sondowaniami geotechnicznymi, do których można zaliczyć np. sondowania DPL, CPTU i DMT.

Literatura

- Amoroso i in. 2012 – Amoroso, S., Monaco, P. i Marchetti, S. 2012. Use of the Seismic Dilatometer (SDMT) to estimate in situ G- γ decay curves in various soil types. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2012 IARG 2012 Padova*.
- Bajda, M. i Skutnik, Z. 2010. Ocena modułu ścinania gytii na podstawie geotechnicznych badań terenowych, *Inżynieria Morska i Geotechnika* r. 31, nr 4, s. 507–511.
- Bihs i in. 2010 – Bihs, A., Long, M., Marchetti, D. i Ward, D. 2010. Interpretation of CPTU and SDMT in organic Irish soil. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. Huntington Beach, California, USA, 9–10 May 2010, vol. 2, s. 257–264.

- Carroll i in. 2012 – Carroll, R., Long, M. i Ward, D. 2012. Use of CPTU and SDMT to characterize silty soil. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, vol. I, Porto de Galinhas, Brazil, s. 214–249.
- Cavallaro i in. 2015 – Cavallaro, A., Capilleri, P. i Maugeri, M. 2015. Soil Characterization of Catania Harbour by the Seismic Dilatometer Marchetti Test (SDMT). *3rd International Conference on the Flat Dilatometer*. 14–16 June 2015, Rome, Paper No. 93.
- Cavallaro i in. 2006 – Cavallaro, A., Grasso, S. i Maugeri, M. 2006: Clay soil characterization by the New Seismic Dilatometer Marchetti Test (SDMT). *2nd International Conference on the Flat Dilatometer*. Washington, 2–5 April 2006, s. 261–268.
- Drevininkas i in. 2012 – Drevininkas, A., Creer, G. i Nkemitag, M. 2012. Comparison of estimated settlements from CPTU and SDMT in organic soils. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, vol. II, Porto de Galinhas, Brazil, s. 1839–1846.
- Galas, P. 2013. *Wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie gruntów spoistych na podstawie badań dylatometrycznych SDMT*. Praca doktorska. SGGW, Warszawa (praca doktorska).
- Gołębiewski i in. 2012 – Gołębiewski, T., Tomecka-Suchoń, S. i Farbisz, J. 2012. Zastosowanie kompleksowych metod geofizycznych do nieinwazyjnego badania technicznego stanu wałów przeciwpowodziowych. *Symposium europejskie – współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej*. Paryż-Orlean 28–30 marca 2012, s. 1–8.
- Heisey i in. 1982 – Heisey, J.S., Stokoe, K.H. II, Meyer, A.H. 1982. Moduli of pavement system from spectral analysis of surface waves, *Transp. Res. Rec.*, vol. 852, s. 22–31.
- Krzywiec, P. i Bestyński, Z. 2001. Sejsmika refleksyjna w płytkich badaniach geologicznych – przykłady zastosowań. *Konferencja Geofizyka w Inżynierii i Ochronie Środowiska dla Potrzeb Samorządności Lokalnej*. Dębe, 15–16 marca 2001. PiG, Kraków, s. 73–84.
- Lunne i in. 1997 – Lunne, T., Robertson, P.K. i Powell, J.J.M. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic and Professional, London, s. 312.
- Lutz, K. 2005. *Dynamics oil properties out of SCPT and Bender element tests with emphasis on material damping*. PhD thesis, Ghent University.
- Marchetti, S. 1980. In Situ Tests by Flat Dilatometer. *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, 106, GT3: 299–321.
- Marchetti i in. 2008a – Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. i Marchetti, D. 2008a. *In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT)*. ASCE Geot. Special Publication GSP 170 honoring Dr. J.H. Schmertmann. New Orleans.
- Marchetti i in. 2008b – Marchetti, D., Marchetti, S., Monaco, P. i Totani, G. 2008b. Experience with seismic dilatometer (SDMT) in various soil types. *Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization*. Taipei, Taiwan, 1–4 April 2008, s. 1339–1345.
- Markowska-Lech i in. 2007 – Markowska-Lech, K., Lech, M. i Szymanski, A. 2007. Estimation of shear modulus from seismic tests on Pliocene clays. *Numerical Models in Geomechanics NUMOG X*. Taylor and Francis, Balkema, s. 153–158.
- Młynarek, Z. 2010. Regional Report for East European Countries. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, Huntington Beach, California, USA, 9–10 May 2010. Vol. 1: Regional Reports, Paper No. RR3
- Młynarek i in. 2012a – Młynarek, Z., Gogolik, S., Gryczmański, M. i Ulniarz, R. 2012a. Settlement analysis of a cylindrical tank based on CPTU and SDMT results. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, vol. II, Porto de Galinhas, Brazil, s. 1585–1590.
- Młynarek i in. 2012b – Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Stefaniak, K. 2012b. Deformation characteristics of overconsolidated subsoil from CPTU and SDMT tests. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, vol. II, Porto de Galinhas, Brazil, s. 1189–1593.
- PN-B-04452-2002 Geotechnika. Badania polowe.
- Redpath, B.B. 1973. Technical report E-73-4 *Seismic refraction exploration for engineering site investigations*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California.
- Rix, G.J. i Stokoe, K.H. 1991. Correlation of initial tangent modulus and cone resistance. *Proceedings of International Symposium on Calibration Chamber Testing*, Elsevier, New York, s. 351–362.
- Robertson i in. 1992 – Robertson, P.K., Woeller, D.J. i Finn, W.D.L. 1992. Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading, *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 685–695.
- Senneset i in. 1988 – Senneset, K., Sandvern, R., Lunne, T., By, T. i Amundsen, T. 1988. Piezocone tests in silty soils. *Proc. of the Int. Sym. on Penetration Testing*, Orlando, 2, s. 955–966.
- Sikora, Z. 2006. *Sondowania statyczne-metody i zastosowanie w geoinżynierii*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 348.

- Ślusarczyk, R. 2001. Możliwości zastosowania geofizyki inżynierskiej w problematyce budownictwa lądowego i wodnego. *Konferencja Geofizyka w Inżynierii i Ochronie Środowiska dla Potrzeb Samorządności Lokalnej*. Dębe, 15–16 marca 2001. PIG. Kraków, s. 109–124.
- Tanaka, H. 1994. Vane shear strength of Japanese marine clays and applicability of Bjerrum's correction factor. *Soils and Foundations*, vol.34, s. 39–48.
- Vargas, L.A. i Coto, M. 2012: Experiences in the use of DMT – SDMT in Costa Rica, Central America. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Vol. I, Porto de Galinhas, Brazil, s. 375–382.

