

MAREK BARAŃSKI, TOMASZ SZCZEPAŃSKI*

ZASTOSOWANIE METOD SEJSMIKI POWIERZCHNIOWEJ DO OCENY MODUŁU G GRUNTU

SURFACE SEISMIC METHODS APPLICATION FOR SOIL G MODULUS ASSESSMENT

Streszczenie

W niniejszym artykule zaprezentowano metodykę wykonywania geologiczno-inżynierskich badań sejsmicznych CSWS i SASW za pomocą nowoczesnej aparatury. Są to nieinwazyjne metody wykorzystujące fale Rayleigha, których rozwój w ostatnich dwóch dekadach postępuje bardzo dynamicznie. Celem artykułu jest scharakteryzowanie stosunkowo mało znanej w Polsce metody, analiza jej zalet, wad oraz perspektyw rozwoju i zastosowania. Konieczność używania prawidłowo określonych modułów sztywności gruntu G (dla odpowiedniego zakresu odkształceń) do modelowania MES wymusza stosowanie adekwatnych metod, m.in. takich, jak opisywana w artykule.

Słowa kluczowe: sejsmika powierzchniowa, SASW, CSWS, maksymalny moduł ścinania

Abstract

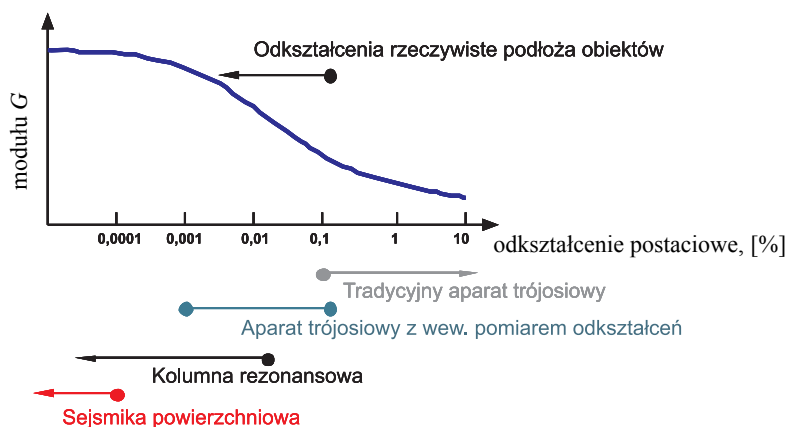
Article presents methodology of engineering-geology seismic geophysical tests called CSWS and SASW. Those field methods are non invasive and non destructive, as they use surface Rayleigh waves. Dynamic development of those methods is observed during last two decades. Article object is to characterise those relatively unknown in Poland methods, to analyse advantages, disadvantages, and future use possibilities. It's well recognized that use of correctly determined G modulus (for an adequate strain level) for FEM analysis forces use of proper methods of achieving this soil property.

Keywords: surface seismic, SASW, CSWS, max shear modulus

* Dr Marek Barański, dr Tomasz Szczepański, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski.

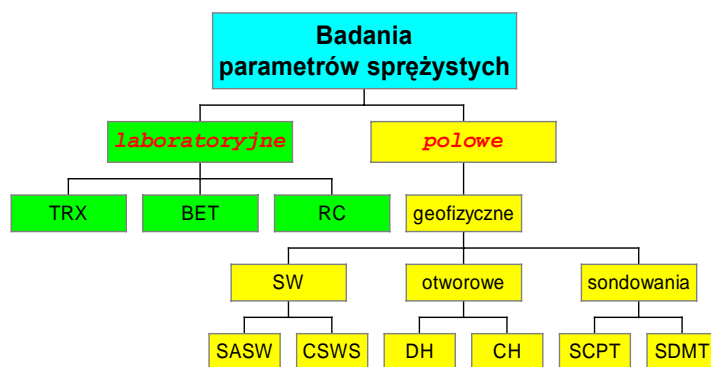
1. Wstęp

Grunty charakteryzują się silną nieliniowością sztywności w zależności od odkształcenia. Fakt ten powinien implikować precyzyjny dobór metod badania podłoża, tak aby występowała jak największa korelacja między zakresem odkształceń gruntu w trakcie badania a zakresem odkształceń w trakcie powstawania i pracy różnorodnych obiektów budowlanych (ryc. 1).



Ryc. 1. Rozkład zmienności sztywności gruntu w zależności od odkształceń (wg [1] zmienione)

Fig. 1. Distribution of soil stiffness depending on strain level ([1], modified)

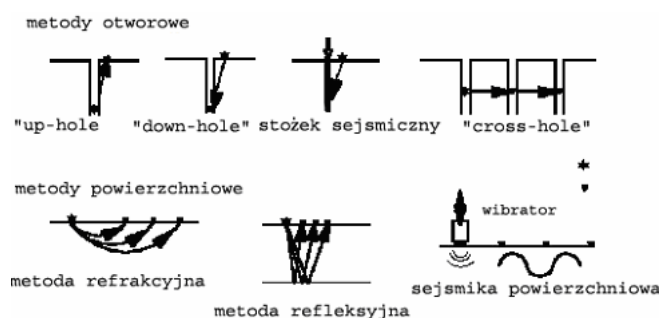


Ryc. 2. Główne metody badań parametrów sprężystych gruntów

Fig. 2. Methods for soil stiffness determination

Rozwiązaniem idealnym byłoby określanie krzywej opisującej wspomnianą zależność w pełnym zakresie odkształceń (za pomocą wielu różnych metod) i korzystanie przy projektowaniu z parametrów sztywności właściwych odkształceniom w danej strefie podłoża

gruntowego budowl. Rozwiązanie takie jest kosztowne. Dotychczasowe doświadczenia wskazują jednak, że parametry określające sztywność, otrzymywane tradycyjnymi metodami (edometr, tradycyjny aparat trójosiowy), są bardzo zaniżone w stosunku do parametrów otrzymywanych z analizy wstecz. Stąd dynamiczny rozwój metod służących do wyznaczenia parametrów gruntu w zakresie tzw. małych odkształceń (ryc. 2 i 3).



Ryc. 3. Polowe metody sejsmiczne badania parametrów sprężystych

Fig. 3. Field seismic methods for stiffness parameters determination

Grupa geofizycznych metod polowych umożliwiających określenie parametrów sprężystych obejmuje: sondowania (stożek sejsmiczny SCPT, sejsmiczny dylatometr Marchetiego SDMT), metody otworowe (*Down Hole*, *Up Hole* i *Cross Hole*) oraz sejsmikę powierzchniową. Wśród tej ostatniej grupy występują różne modyfikacje i zestawienia sprzętowe określane innymi nazwami. Pierwszym historycznie i koncepcyjnie był system SASW, czyli *Spectral Analysis of Surface Waves* [3].

2. Metodyka badań

Metody sejsmiki powierzchniowej są nieinwazyjne – wykorzystują fale powierzchniowe Rayleigha. Fale te rozchodzą się promieniście od miejsca zaburzenia ośrodka blisko jego powierzchni (do głębokości równej około jednej długości fali), z prędkością zależną od częstotliwości (zjawisko dyspersji), właściwości sprężystych i gęstości gruntu.

W systemie SASW fale wzbudza się przez uderzenie młotkiem bądź innym przedmiotem (w zależności odżądanego zakresu częstotliwości). Generowane jest szerokie spektrum częstotliwości. Fala dociera do geofonów rozstawionych w linii prostej od źródła, w znanych odległościach. Oprogramowanie komputerowe, używając FFT (*Fast Fourier Transform*), analizuje sygnały elektryczne wzbudzone na geofonach, aby znaleźć przesunięcie fazowe fali na każdym z nich.

Znając przesunięcie fazowe fali ϕ na poszczególnych geofonach, których rozstaw d również jest znany, możemy obliczyć długość fali λ .

$$\lambda = 360 d/\phi \quad (1)$$

Z długości fali λ oraz z jej częstotliwości f obliczana jest prędkość rozchodzenia się fali powierzchniowej Rayleigha V_R

$$V_R = \lambda f \quad (2)$$

Rozkład prędkości fali Rayleigha V_R w zależności od jej częstotliwości f określany jest jako krzywa dyspersji (ryc. 4).

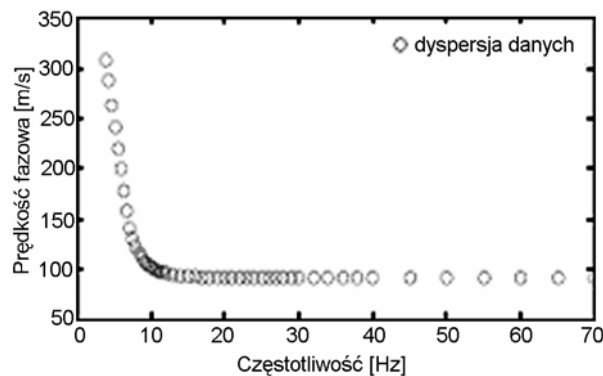
Pomiędzy prędkością fali Rayleigha V_R a prędkością fali poprzecznej V_s istnieje zależność

$$V_s = P V_R \quad (3)$$

gdzie parametr P zależny jest od współczynnika Poissona (dla $\nu = 0,25$ $P = 1,09$, a dla $\nu = 0,50$ $P = 1,05$), średnio przyjmuje się najczęściej $P = 1,07$. Z prędkości fali poprzecznej V_s i gęstości objętościowej ρ gruntu obliczana jest maksymalna wartość modułu ścinania

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (4)$$

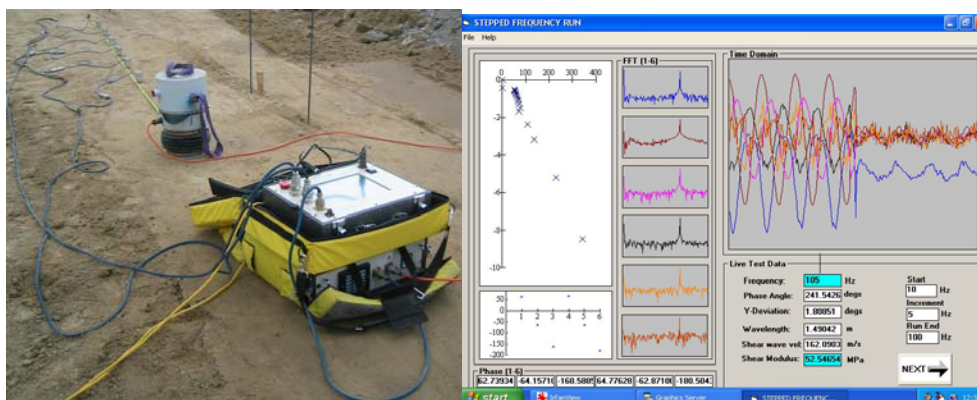
Rozwinięciem powyższej metodyki jest wzbogacenie urządzenia o sterowany komputerem wibrator. Rozwiązanie to nosi nazwę CSWS (*Continuous Surface Wave System*). W takiej konfiguracji znamy i dowolnie programujemy częstotliwość pracy źródła drgań (w aparaturze produkcji GDS Instruments) – jest to od 6 do 600 Hz z rozdzielczością 0,1 Hz, masa inercyjna wibratora wynosi 63 kg. Rozwiązanie to umożliwia kontrolowanie warunków badania. Im niższa częstotliwość fali powierzchniowej f , tym większa jest strefa odkształceń sprężystych podłoża gruntowego. Zmieniając zatem zakres częstotliwości generowanych fal powierzchniowych, uzyskujemy różną głębokość badania.



Ryc. 4. Przykładowa doświadczalna krzywa dyspersji

Fig. 4. Example of experimental dispersion curve

Wynikiem badań są profile sztywności gruntu, tj. rozkład zmienności maksymalnego modułu ścinania G_{\max} (lub modułu Younga E_{\max}) wraz z głębokością. Głębokość penetracji zależy od warunków gruntowych. Przeciętnie w warunkach polskich jest to do ok. 10–15 m [2].



Ryc. 5. Aparatura sejsmiczna w konfiguracji CSWS (z lewej) oraz obraz parametrów uzyskiwany w trakcie badania (z prawej)

Fig. 5. CSWS equipment (left), and during test parameters overview (right)

3. Interpretacja wyników badań

Wspomniany profil sztywności otrzymuje się z eksperymentalnej krzywej dyspersji w trakcie procesu zwanego inwersją. Istnieją trzy zasadnicze podejścia do zagadnienia inwersji [8]:

- 1) metoda czynnika podziału fali (*factored wavelength method*),
- 2) metoda oparta na MES,
- 3) modele liniowe.

Pierwsza metoda jest często stosowana, mimo najmniejszej dokładności. Pozwala ona jednak na bardzo szybką analizę wyników jeszcze w trakcie badania. Opiera się na założeniu, że reprezentatywna głębokość dla danej częstotliwości jest stała, a często stosowany czynnik podziału wynosi 3. Tak więc głębokości, do których przyporządkowuje się wartości sztywności, otrzymuje się przez podzielenie $\lambda/3$.

Pozostałe metody inwersji są bardzo czasochłonne, pracochłonne i wymagają specjalistycznego oprogramowania. Wydają się być jednak niezastąpione w przypadku silnie uwarstwionego ośrodka gruntowego o dużym zróżnicowaniu sztywności w poszczególnych warstwach.

Problem przeskalowania sztywności maksymalnej otrzymanej z badań geofizycznych na tzw. sztywność operacyjną jest stopniowo rozwiązywany. Weryfikuje się moduły sztywności otrzymane z badań sejsmicznych z wartościami wynikającymi z analizy wstecz dla rzeczywistych odkształceń podłoża gruntowego pod obiektami budowlanymi. Na ryc. 6 porównano profile sztywności otrzymane z badań laboratoryjnych (edometrycznych i trójosiowych), a także – z sejsmicznych badań polowych (*cross-hole*), na tle rzeczywistych wartości uzyskanych z analizy wstecz, opartej na pomiarach rzeczywistych obiektów w rejonie Londynu. Zwraca uwagę fakt, że różnica między rzeczywistymi sztywnościami a otrzymanymi z tradycyjnych badań laboratoryjnych wynosić może rząd wielkości.

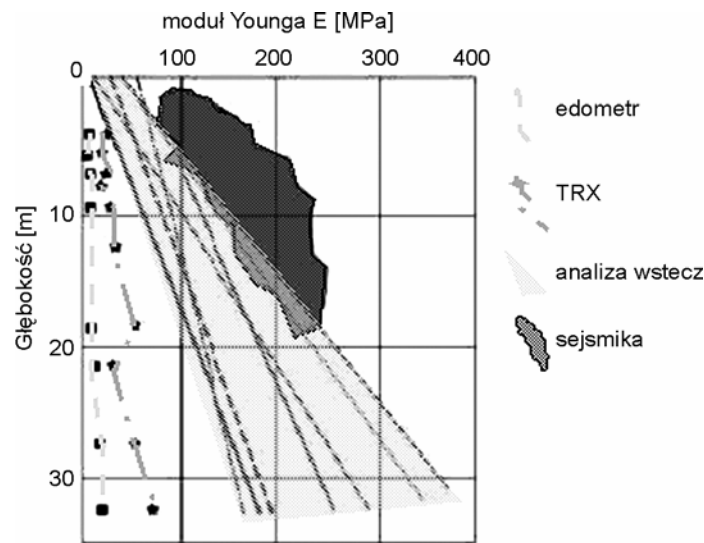
Dokonując tego typu analiz, wielu autorów sugeruje, że zakładając nawet konserwatywny współczynnik zmniejszający, określanie sztywności z badań geofizycznych może

być znacznie bardziej wiarygodne niż tradycyjne badania laboratoryjne. Propozycja Matthews i in. [7] zmniejszania modułu Younga maksymalnego do wartości operacyjnych wygląda następująco:

$E_{OP} = 0,50 E_{MAX}$ dla ilów plastycznych,

$E_{OP} = 0,85 E_{MAX}$ dla ilów zwartych i słabych gruntów skalistych.

Dla zagęszczonych gruntów sypkich oraz dla gruntów spoistych w stanie co najmniej półzwardym odkształcenia postaciowe są niewielkie i wartości modułów sprężystych mogą osiągać 80% wartości modułu maksymalnego, wyznaczonego z badań geofizycznych.



Ryc. 6. Porównanie profili sztywności otrzymanych z badań laboratoryjnych, polowych badań sejsmicznych i analizy wstecz [7]

Fig. 6. Comparison of stiffness profiles obtained from laboratory, field geophysics, and back-analysis [7]

Innego rodzaju zestawienie podaje Heymann [4]. Analizuje on, jak zmienia się stosunek E_{OP}/E_{MAX} w przypadku trzech różnych materiałów i różnych zakresów odkształceń (tabl. 1). Badane materiały to niespękana kreda, twaroplastyczne półzwardte iły londyńskie oraz plastyczne iły Bothkennar. Wartość E_{MAX} otrzymano z badań sejsmicznych, natomiast wartości $E_{0,01}$, $E_{0,1}$, $E_{1,0}$ z badań TRX z wewnętrznym pomiarem odkształceń.

Tablica 1

Przykład zmniejszania sztywności skał przy rosnącym odkształceniu [4]

Materiał	$E_{0,01}/E_{MAX}$	$E_{0,1}/E_{MAX}$	$E_{1,0}/E_{MAX}$
Niespękana kreda	0,87–0,93	0,42	zniszczenie
Iły londyńskie	0,83–0,97	0,35–0,58	0,11–0,20
Iły Bothkennar	0,75–0,81	0,36–0,55	0,11–0,20

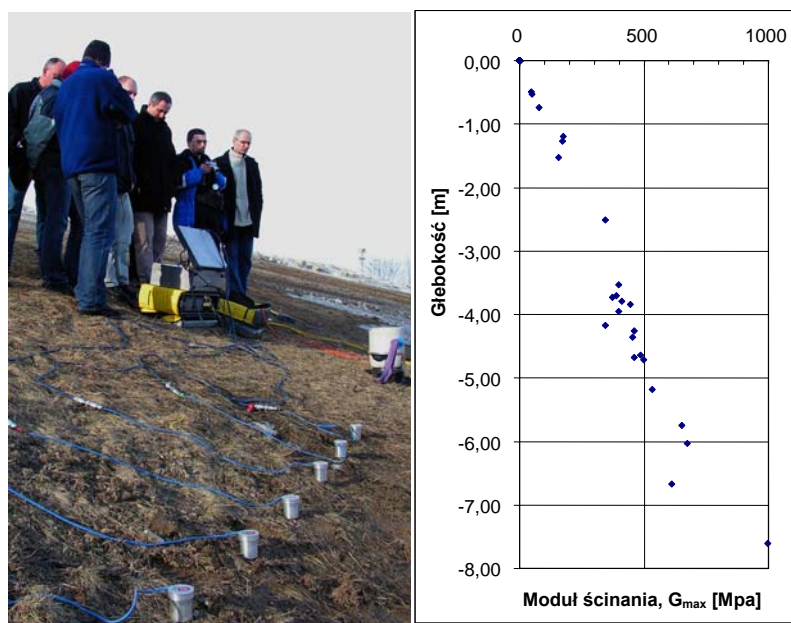
4. Zastosowanie, zalety i ograniczenia badań geofizycznych SASW i CSWS

Metody SASW/CSWS są stosowane do:

- oceny sztywności w profilu pionowym przy obliczeniu odkształceń gruntu,
- szybkiej kontroli jakości zagęszczenia,
- oceny wpływu stabilizacji, konsolidacji gruntu czy wykonawstwa kolumn żwirowych (badanie przed i po),
- monitoringu zmian parametrów sprężystych w trakcie wykonywania obiektów budowlanych,
- weryfikacji zmienności ośrodka między punktami badawczymi (sondowaniami, wierceniami) lub sezonowej zmienności (np. ze względu na zmiany wilgotności).

Argumenty przemawiające za stosowaniem metody:

- badanie *in-situ*, nieinwazyjne, nieniszczące, określające właściwość fizyczną gruntu, w przeciwieństwie do parametrów otrzymywanych na drodze korelacji empirycznej (jak np. parametry z sondowań CPT, DMT itp.),
- nie wymaga wierceń, relatywnie tania (z wyjątkiem kosztów zakupu aparatury),
- badanie może być wykonane w wielu etapach budowy (przed wykonaniem wykopu, w trakcie, przed i po stabilizacji, konsolidacji, odwodnieniu itp.),
- może być stosowana do oceny trudnych dla metod bezpośrednich podłoży (gliny lodowcowe z głazami, bruki morenowe, zwietrzałe grunty skaliste, nasypy, hałdy itp.),
- krótki czas pomiaru (od kilkunastu minut do około godziny na profil),
- wstępne wyniki widoczne już w trakcie badania (przy stosowaniu inwersji metodą czynnika podziału fali).



Ryc. 7. Wyniki pokazowego badania sejsmicznego w trakcie XIX KN – MKwPiAKH Kraków–Korbielów 05–08.03.2007 r.

Fig. 7. Stiffness profile obtained during XIX KN – MKwPiAKH Kraków–Korbielów 05–08.03.2007

Ograniczenia i problemy związane ze stosowaniem metody:

- problemy z wytworzeniem fali o odpowiedniej energii i niskiej częstotliwości, tak aby propagowała się odpowiednio głęboko. Z dotychczasowych doświadczeń autorów wynika, że głębokość uzyskana za pomocą przenośnych źródeł jest ograniczona do ok. 15 m w gruntach spoistych i niespoistych, a do 30 m w gruntach skalistych. Gdy badania odbywają się w otoczeniu budowy, rozwiązaniem jest zastosowanie źródeł zewnętrznych (np. blok betonowy zrzucany z koparki),
- wspomniane wcześniej zagadnienie inwersji. Aby prawidłowo i w pełni szczegółowo interpretować profil sztywności, konieczne jest stosowanie zaawansowanych metod inwersji. Brakuje jednak jednolitych procedur i narzędzi, ponieważ metody te nadal są rozwijane. Stąd szerokie stosowanie prostej i szybkiej inwersji metodą czynnika podziału fali,
- z badania otrzymujemy maksymalne wartości sztywności gruntu właściwe dla bardzo małych odkształceń na poziomie $<10^{-6}\%$. Powstaje pytanie o relację tej maksymalnej sztywności do sztywności operacyjnej, czyli właściwej poziomowi odkształceń, jakim podlega ośrodek gruntowy w przypadku współpracy z obiektem inżynierskim czy jego konkretną strefą.

Podsumowując, należy podkreślić, że metody sejsmiki powierzchniowej są coraz szerzej stosowane na świecie, przyczyniając się do zwiększenia liczby i jakości danych dostępnych w fazie projektowania oraz obniżenia kosztów badań [9, 10, 12].

Intensywny rozwój techniki badawczej w zakresie sejsmiki powierzchniowej przyczynia się do rozszerzenia jej aplikacji do badań geotechnicznych i geologiczno-inżynierskich również w Polsce.

Literatura

- [1] Atkinson J.H., *Non-linear soil stiffness in routine design*, Geotechnique, 50, No. 5, 2000, 487-508.
- [2] Barański M., Szczepański T., *Wykorzystanie metod sejsmiki powierzchniowej (CSWS, SASW) do wyznaczenia parametrów sprężystych gruntu*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo z. 28, 2006, 9-18.
- [3] Heisey J.S., Stokoe K.H. II, Meyer A.H., *Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves*, Transp. Res. Rec., Vol. 852, 1982, 22-31.
- [4] Heymann G., *The stiffness of soils and weak soils at very small strains*, PhD Thesis, University of Surrey, Guildford 1998.
- [5] Lai C.G., Wilmański K. (ed.), *Surface waves in geomechanics: Direct and Inverse modelling for soils and rocks*, CISM Courses and lectures No. 481, Springer, Wiedeń, Nowy Jork 2005.
- [6] Mathews M.C., Hope V.S., Clayton R.I., *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Engng., Vol. 119, 1996, 84-95.
- [7] Matthews M.C., Clayton C.R.I., Own Y., *The use of geophysical techniques to determine geotechnical stiffness parameters*, Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Engng., Vol. 143, 2000, 31-42.

- [8] Menzies B., *Near-surface site characterisation by ground stiffness profiling using surface wave geophysics*, In H. C. Verma Commemorative Volume, Indian Geotechnical Society, New Delhi 2000.
- [9] Powell J., Butcher A., *Assessment of ground stiffness from field and laboratory tests*, Proc. Int. Conf. SM, Florencja 1991, 153-156.
- [10] Simons N., Menzies B., *A short course in foundation engineering*, Thomas Telford, Londyn 2000.
- [11] Stokoe K.H. II, Rix G.J., Nazarian S., *In Situ Seismic Testing with Surface Waves*, Proceedings, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 13–18 August 1989, 331-334.
- [12] Svensson M., Möller B., *Geophysics in soil mechanics – in situ shear moduli by SASW-technique and more traditional geotechnical methods*, Swedish Geotechnical Institute, Varia 508, 2001.