Stosowalności wybranych metod określania modułu sztywności G₀ gruntów w praktyce geotechnicznej

Dr inż. Tomasz Godlewski¹, dr Tomasz Szczepański², mgr inż. Witold Bogusz¹ ¹Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Geotechniki i Fundamentowania ²Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

Współczesne dokumentowanie geotechniczne podłoża w świetle wymagań nowych norm europejskich stawia przed badaczami nowe wyzwania. W projektowaniu geotechnicznym moduły stosowane do obliczeń powinny być podawane w zakresie naprężenia i odkształcenia, w którym mieści się współpraca danej konstrukcji z podłożem z uwzględnieniem ewentualnych obciążeń dynamicznych [3, 4, 8, 10, 12, 16]. W analizach współpracy podłoża z konstrukcją z wykorzystaniem metod numerycznych ważną rolę odgrywają parametry gruntowe (moduły) wyznaczone w strefie małych i bardzo małych odkształceń $(10^{-6} \div 10^{-3})$. W tym celu wykorzystuje się nowoczesne metody badawcze, ze wskazaniem na badania in situ, takie jak: geofizyka powierzchniowa - CSWS/SASW, sonda statyczna ze stożkiem sejsmicznym - SCPTU czy dylatometr sejsmiczny - SDMT. Wynikami badań są tutaj profile sprężystości gruntu, tj. rozkład zmienności modułu ścinania G_0 lub modułu Younga E_0 z głębokością. Przydatność oznaczeń tych parametrów potwierdzają analizy wsteczne na zrealizowanych obiektach (np. głębokie wykopy, tunele) [4, 12, 16]. W takich przypadkach przyjęte do

obliczeń numerycznych parametry (moduły) z metod geofizycznych są wielokrotnie $(3 \div 4 \text{ razy})$ wyższe niż wartości podawane, np. w normie PN-B/81-03020 [11], czy oznaczane za pomocą metod standardowych (np. w edometrze). Jednak uzyskiwane na ich podstawie prognozy przemieszczeń z obliczeń numerycznych są zbieżne z wynikami z monitoringu [1, 4, 8, 12].

WYNIKI PRAC BADAWCZYCH

Obecnie stosowane metody określania modułu sztywności można podzielić na dwie grupy: metody polowe: inwazyjne otworowe (DownHole, CrossHole, UpHole), inwazyjne penetracyjne (dylatometr sejsmiczny – SDMT, statyczna sonda sejsmiczna – SCPTU), nieinwazyjne (metody geofizyki powierzchniowej: SASW, CSWS i MASW) oraz metody laboratoryjne: badanie z czujnikami "bender element" – BET, kolumna rezonasowa – RCT, badanie w aparacie "Hollow Cylinder" – HCT. Specyfika oraz ograniczenia poszczególnych metod wykorzystywanych



Rys. 1. Przykładowe wyniki bezpośrednich pomiarów sejsmicznych prędkości fali poprzecznej w funkcji głębokości uzyskane różnymi metodami na poligonach badawczych [6]

do oznaczania sztywności gruntów (np. inwazyjne/nieinwazyjne) [5] zachęcają do ich łączenia i wykonywania kompleksowo w celu porównań. Przykładem takiego działania były badania porównawcze wykonane na wybranych poligonach badawczych walidujące niektóre z opisanych metod. Do porównań wybrano metodę geofizyki powierzchniowej wykorzystującą falę Rayleigha w konfiguracji CSWS i SAWS oraz dylatometr sejsmiczny SDMT służący do pomiaru propagacji fali poprzecznej V_s metodą *downhole*. Szczegóły dotyczące sprzętu, metodologii oraz wykorzystanych technik pomiarowych można znaleźć w publikacjach: [2, 3] do geofizyki powierzchniowej oraz [1, 5, 10] do SDMT.

Wytypowano grunty o zróżnicowanych właściwościach, litologii i genezie, kierując się opisywaną przez Robertsona [14] zasadą klasyfikacyjną SBT (*Soil Behavior Type*). Badania na poligonach wykonano między innymi dla mio-plioceńskich iłów formacji poznańskiej (OC), plejstoceńskich iłów warwowych (OC), plejstoceńskich glin zwałowych zlewiska Warty i Odry (OC), wczesno holoceńskich i późno plejstoceńskich piasków rzecznych (NC), eemskich gytii (OC) oraz współczesnych (holoceńskich) osadów rzecznych – mad (NC) oraz różnego rodzaju gruntów nasypowych (popioły, grunty zwałowane).

Uzyskane w różnych warunkach gruntowych wyniki (rys. 1) wykazują dużą zbieżność ze sobą w obrębie profili, pomimo odmiennego charakteru badań (inwazyjne – SDMT i nieinwazyjne CSWS/SASW). W trakcie realizacji niektórych poligonów wykonywano również szereg badań eksperymentalnych mających na celu ustalenie wpływu różnego rodzaju czynników (technicznych i metodycznych). Przeanalizowano między innymi wpływ dopasowywania poziomu energii generowanej przez źródło drgań, wpływ rozstawu geofonów czy wpływ zakłóceń z otoczenia na rejestrowane i interpretowane wyniki. Wykonywano też pomiary eksperymentalne z użyciem, jako źródła drgań, różnych obiektów generujących szerszy zakres częstotliwości fal. Więcej na temat tych zagadnień można znaleźć w publikacjach [5, 6].

W miarę możliwości z poligonów pobierano też próbki 1 i 2 klasy jakości w celu oznaczeń krzywych sztywności metodami laboratoryjnymi. Należy zauważyć, że w przypadku metod laboratoryjnych na wyniki oznaczeń sztywności gruntu mają wpływ nie tylko warunki badania czy jakość próbek, ale również obrana metodyka, np. związana z doborem częstotliwości do wysokości próbki [6]. Nie bez znaczenia jest także niejed-



Rys. 2. Zróżnicowanie sztywności na przykładzie iłów plioceńskich uzyskane z dwóch sąsiadujących z sobą wierceń na terenie Warszawy

norodność samego ośrodka gruntowego i specyfika niektórych gruntów wynikająca często z historii geologicznej. Doskonałym przykładem są iły mio-plioceńskie z Warszawy (rys. 2), gdzie widoczne jest wyraźne zróżnicowanie i zmienność sztywności.

Widoczne na wykresie (rys. 2) oznaczenie krzywych sztywności wyrażone zmianą przebiegu modułu *E* dotyczy tego samego gruntu (w sensie formacji). Badania wykonano na próbkach pobranych w niewielkiej lateralnie i horyzontalnie odległości, jednak zróżnicowanych ze względu na obecną sytuacją geomorfologiczną (zmiana naprężenia w strefie przyskarpowej). Różnica w wartościach modułów E_0 jest bardzo wyraźna (ponad 300%), przy założeniu jednakowego stopnia ewentualnego naruszenia próbek (ta sama technika poboru).

Zebrane doświadczenia na poligonach badawczych w zróżnicowanych warunkach gruntowych pozwoliły na zwalidowanie stosowanych metod i zachęcają do szerszego ich stosowania w praktyce. Poniżej opisano ciekawe przykłady, gdzie z powodzeniem wykorzystano wyniki oznaczeń modułu ścinania G_0 w projektowaniu geotechnicznym.

WYNIKI BADAŃ – PRZYKŁADY

Przykład 1

Przykład 1 dotyczy problemu posadowienia elektrowni wiatrowych. Poprawne zaprojektowanie posadowienia turbozespołu wymaga ustalenia "dynamicznej odpowiedzi podłoża" ze względu na specyficzny układ sił przekazywany na fundament - kombinacje oddziaływań dynamicznych i momentów od sił poziomych [4]. Jednym z elementów wymaganych na etapie projektowania jest analiza i sprawdzenie warunku minimalnej sztywności dynamicznej fundamentu. Błędne zaprojektowanie fundamentu ze względu na analizę sztywności skutkuje możliwością wystąpienia rezonansu, co może doprowadzić do uszkodzeń i zniszczenia konstrukcji. Ustalenie minimalnej sztywności dynamicznej fundamentu turbozespołu wymaga dynamicznej charakterystyki podłoża gruntowego opisanej modułem dynamicznym – E_{ed} [MN/m²] i współczynnikiem sztywności skrętnej - k_o [MNm/rad]. Jedną z metod jest tu wykorzystanie modułu ścinania G_{max} wyznaczonego w badaniach polowych. Przykład takich pomiarów przedstawiono na rys. 3.

Wynik badań pochodzą z rozpoznania warunków podłoża pod projektowaną farmę wiatrową na zwale zewnętrznym kopalni Bełchatów tzw. "Góra Kamieńsk". Podłoże stanowi antropogen zwałowiska zewnętrznego kopalni. Zwał powstał w wyniku niszczenia pierwotnej struktury osadów czwartorzędowych i trzeciorzędowych, ich przemieszczenia, powtórnego zdeponowania bez istotnej zmiany wyjściowego składu mineralnego, ale ze zmianami uziarnienia. Przestrzenne rozmieszczenie różnych litologicznie osadów nie wykazuje charakteru warstwowego, raczej bezładność. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem metod sejsmicznych oprócz parametrów sztywności dostarczyły również informacji dotyczacej deponowania osadów. Ponieważ propagacja fal jest ściśle powiązana z składową pionową naprężenia i sztywnością gruntu, to analiza wyników z badań sejsmiką powierzchniową oraz sondowań SDMT w badanych profilach wykazała dwudzielność badanego ośrodka (zróżnicowanie warstw nasypowych na dwa pakiety). Do głębokości około 10 m



Rys. 3. Zestawienie zbiorcze wyników badań (moduł G₀) zwałowiska zewnętrznego na potrzeby posadowienia farmy wiatrowej (9 lokalizacji), na tle typowego przekroju przez zwał

p.p.t. są rejestrowane niższe wartości modułu sztywności (przedział 40 ÷ 80 MPa), natomiast głębiej prędkości fali i moduły rosną dwukrotnie (średni przedział G_0 to około 80 ÷ 160 MPa), a poniżej 20 m nawet powyżej 160 MPa. W przypadku oznaczeń SDMT poprawia się również jakość rejestrowanych przebiegów (sejsmogramów), co świadczy o lepszej ciągłości i sztywności ośrodka wynikającej z różnego okresu deponowania osadów. Profile rozkładu modułu sztywności G_0 w gruntach usypanych na zwale nie poddanych procesom przekonsolidowania wykazują też bardzo wyraźną tendencję stałego przyrostu parametrów z głębokością wynikającą tylko z naprężenia geostatycznego. Utwory głębsze poddano dłuższej konsolidacji pod większym obciążeniem nadkładu, stąd wzrost parametrów.

Przykład 2

Przykład 2 dotyczy analizy numerycznej zachowania istniejących tuneli metra w kolizji z budową kolektora kanalizacyjnego o wymiarach przekroju poprzecznego $1,6 \times 2,4$ m, prowadzonego poprzecznie tuż nad tunelami. Analizę wykonano również w celu stwierdzenia czy będą zachowane warunki użytkowania metra bez konieczności wstrzymywania ruchu na okres prowadzenia prac. Głębokość projektowanego wykopu to około 7,3 m od powierzchni terenu. W podłożu projektowanego kolektora występują przede wszystkim utwory trzeciorzędu (pliocenu). Jest to teren wyraźnego wypiętrzenia glacitektonicznego tych utworów w budowie geologicznej (rys. 4). Struktura ta składa się z warstw ilastych, gliniastych, pylasto-gliniastych i pylasto-piaszczystych. Miąższość poszczególnych cykli sedymentacyjnych waha się od 1 do kilku metrów. Warstwy charakteryzują się ułożeniem antyklinalnym z układem w kierunku zachodnim i wschodnim oraz rozciągłością północpołudnie. Grunty ilaste charakteryzują się właściwościami ekspansywnymi w warunkach wzrostu wilgotności, przesychania



Rys. 4. Fragment przekroju geotechnicznego w miejscu kolizji kolektora z tunelami metra z widocznym profilem sztywności z badania SDMT [materiały własne ITB]

podłoża i odprężenia. Analizę numeryczną wykonano przy zastosowaniu metody elementów skończonych (MES) za pomocą programu Plaxis 3D Tunel v2.4. Analiza w wariancie przestrzennym (3D) miała pomóc w rzeczywistym odzwierciedleniu wytrzymałości strukturalnej konstrukcji tuneli zbudowanych z tubingów w kontekście poprzecznie działającego wymuszenia – lokalne odprężenie od wykopu kolektora. W celu uzyskania wiarygodnych wartości przemieszczeń konstrukcji tuneli wykonano i wykorzystano do obliczeń oznaczenia modułu ścinania G_0 z SDMT. Na tak zbudowanym modelu (rys. 5a) wykonano modelowanie przejścia kolektora z wykorzystaniem modelu z warunkiem C-M.

W obliczeniach wykorzystano współczynniki redukcyjne parametrów sztywności ustalanych z badań z wykorzystaniem sejsmiki do gruntów warszawskich, podanych w pracy Popielskiego [12], które dla zwartych iłów wynoszą $0,7 \cdot G_{max}$. Jest to niezbędne ze względu na znany problem przeskalowania maksymalnej sztywności otrzymywanej z badań sejsmicznych do sztywności operacyjnej, czyli właściwej poziomowi odkształceń, jakim podlega ośrodek gruntowy w przypadku współpracy z obiektem inżynierskim czy jego konkretną strefą.

Uzyskane w ten sposób maksymalne prognozowane przemieszczenie dna tunelu, odpowiadające przemieszczeniu główki szyny, wyniosły około 1,0 mm dla tunelu wschodniego oraz 0,5 mm dla zachodniego. Przemieszczenie góry tunelu na skutek odkształcenia się obudowy wyniosło 1,8 mm w przypadku tunelu wschodniego oraz 1,9 mm w przypadku zachodniego.

W trakcie realizacji kolektora na założonej sieci monitoringu geodezyjnego (pomiary na szynach i pryzmaty na tubingach) wykonano pomiary, gdzie pomierzone wartości przemieszczeń



Rys. 5. Model obliczeniowy z fazą realizacji wykopu kolektora (a) oraz mapa odkształceń obudowy tunelu zachodniego(3D) (b) – widoczna strefa odprężenia na skutek wykonania wykopu [materiały własne ITB]



Rys. 6. Wyniki profilowania sejsmicznego metodą CSWS podłoża chłodni (a)

oraz model obliczeniowy w fazie końcowej realizacji jako mapa odkształceń konstrukcji (b) [materiały własne ITB]

na torowisku w najbardziej wytężonym przekroju wyniosły poniżej 1 mm, natomiast odkształcenia tubingu w części stropowej związane ze zjawiskiem odprężenia wyniosły maksymalnie 1,7 mm w przypadku tunelu wschodniego i 2,3 mm – tunelu zachodniego. Uzyskane pomiary przy dokładności geodezyjnej na poziomie $\pm 0,4$ mm, potwierdzają poprawność wykonanej prognozy na modelu oraz świadczą o dobrze dobranych parametrach do analizowanego problemu. Dzięki zastosowaniu modelu 3D było możliwe również określenie zakładanego zasięgu oddziaływania wykopu i w ten sposób optymalne zaprojektowanie sieci monitoringu (rys. 5b).

Przykład 3

Problem rozwiązania sposobu posadowienia dotyczył chłodni kominowej elektrowni konwencjonalnej: wysokość 185 m, średnica około 114 m, średni odpór podłoża dochodzący do 250 kPa. Chłodnie kominowe jako przykład konstrukcji powłokowej są bardzo wrażliwe na zmiany w sztywności podłoża ze względu na powstające dodatkowe wytężenia w powłoce. W analizowanym przypadku problem ten był szczególnie istotny ze wzgledu na występowanie w podłożu projektowanej chłodni kopalnych krawędzi erozyjno-tektonicznych (pogrzebane "*wybrzeże klifowe"*) na głębokościach 5 \div 15 m p.p.t. i współwystępowania gruntów o bardzo zróżnicowanych właściwościach fizyko-mechanicznych (różne sztywności: od gruntów skalistych – margle i silnie zdiagenezowanych gruntów spoistych poprzez piaski do ściśliwych iłów).

W celu wskazania optymalnego sposobu posadowienia chłodni kominowej przeprowadzono obliczenia z zastosowaniem metody elementów skończonych. W tym celu wykorzystano program ZSoil 2D&3D 2012 umożliwiający kompleksową analizę współpracy konstrukcji z podłożem. Ze względu na

skomplikowany kształt i wymiary analizowanych obiektów oraz układ warstw podłoża obliczenia przeprowadzono do modelu przestrzennego (3D). Ze względu na istotny wpływ sztywności przestrzennej samej konstrukcji, poza pierścieniem fundamentowym, w analizie uwzględniono także żelbetowa powłokę chłodni o geometrii i grubości zmiennej w kierunku pionowym. W celu uwzględnienia istotnych aspektów współpracy konstrukcji z podłożem do wybranych warstw zastosowano nieliniowy model Hardening Soil z uwzględnieniem sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń (HSs). Główną zaletą tego modelu jest uzależnienie sztywności gruntu od panującego stanu naprężenia oraz zakresu odkształcenia. Parametry materiałowe przyjęto na podstawie wyników badań (bezpośrednie przebiegi oznaczeń parametrów mechanicznych z badań laboratoryjnych i wyniki z badań polowych poszczególnych warstw podłoża), w których korzystano również z metod sejsmicznych w celu wyznaczenia pełnej charakterystyki sztywności analizowanych gruntów i określenia modułu ścinania G_0 (rys. 6a). Przeprowadzone analizy wskazały, że jest możliwe posadowienie bezpośrednie chłodni kominowej.

Na podstawie analizy uzyskanych przemieszczeń metodą analityczną oraz za pomocą metody elementów skończonych (rys. 6b) obliczono wartości współczynników podatności podłoża według teorii Winklera, odpowiadające panującym warunkom gruntowym oraz charakterowi konstrukcji i obciążeń. Były to parametry wymagane przez Projektanta w celu bezpiecznego zwymiarowania konstrukcji (wytrzymałość i sztywność powłoki poprzez dobór zbrojenia). W efekcie końcowym wskazano dwa najbardziej niekorzystne warianty doboru współczynników podatności przy wymiarowaniu fundamentu i powłoki. Sztywniejsze podparcie części fundamentu, odpowiadające występowaniu niespękanego masywu skalnego, stanowiło wariant bardziej niekorzystny przy wymiarowaniu zbrojenia powłoki chłodni kominowej.

Metoda Wybrane czynniki	BE (lab)	SDMT	SASW/CSWS
Głębokość badania	Dowolna, zależna tylko od dostęp- ności próbek	Do kilkudziesięciu metrów, ograniczo- na warunkami podłoża i rodzajem pe- netrometru (urządzenia wciskającego). Im sztywniejsze podłoże, tym mniej - sza głębokość penetracji.	Do około 30 m, zależna ściśle od sztywności podłoża i częstotliwości wzbudzonej fali, ewentualnych zakłóceń. Im sztywniejsze podłoże, tym większa głębokość.
Rozdzielczość (gęstość punktów pomiarowych)	Dowolna, w zależności od potrzeb i liczby próbek. <i>Możliwość wielu</i> oznaczeń dla jednej próbki przy różnych naprężeniach.	Dowolna , częściowo zdeterminowana odległością geofonów w żerdzi (0,5m), wybierana przez użytkownika. <i>Uzyskana wartość odnosi się do 0,5m</i> <i>warstwy</i> .	Zależna od głębokości, rzędu cm w górnej części profilu, do metrów na większych głębokościach, gdzie zaczyna być częściowo losowa. Zróżnicowana - zależnie od metody inter- pretacji i liczby informacji wejściowej.
Charakter badania	Inwazyjny - efekty związane z po- braniem i ekstrakcją próbki – ko- nieczność odtworzenia warunków .	Inwazyjny – warunki <i>in situ</i> , penetra- cja może powodować efekt wzmoc- nienia.	Nieinwazyjny – warunki in situ.
Aplikacja	Możliwość modelowania zacho- wania, dowolny stan naprężenia, anizotropia.	Wszędzie gdzie jest możliwa penetra- cja statyczna (w przypadkach wyjąt- kowych można stosować podwiert).	Wszędzie, również tam gdzie penetracja statyczna jest utrudniona lub wręcz nie- możliwa. Stosowalna do oceny trudnych dla metod penetracyjnych podłoży (gliny lodow- cowe z głazami, bruki morenowe, zwietrzałe grunty skaliste, nasypy, hałdy etc
Czas badania	Minuty – godziny	10 m profil – 1,5 ÷ 3 godzin	10 m profil – 15 min ÷ 1 godziny

Tabl. 1. Praktyczne wnioski dotyczące stosowalności wybranych metod określania modulu sztywności w badaniach podłoża

WNIOSKI PRAKTYCZNE

Obecnie podstawowe metody do wyznaczania rozkładu sztywności gruntu to grupa metod wykorzystujących sejsmikę (rozumianych jako opartych na pomiarach prędkości fal sprężystych wygenerowanych w podłożu gruntowym). Wykonane dotychczas własne prace badawcze wykazują dobre skorelowanie wyników uzyskiwanych z różnych metod. Zdobyte doświadczenia, związane między innymi z analizą czynników wpływających na uzyskiwane wyniki pomiarów, dały Autorom dobrą podstawę do szerokiego zastosowania opisanych i badanych metod w praktyce. W celu podsumowania i usystematyzowania informacji o zastosowaniu i możliwościach poszczególnych metod i zachęcenia jednocześnie do szerszego ich stosowania w tabl. 1 zestawiono najistotniejsze zdaniem Autorów praktyczne informacje, które mogą ułatwić wybór rodzaju metody przy rozwiązywaniu różnorakich zagadnień i problemów w geoinżynierii. Szerzej na temat zagadnień związanych z stosowaniem dostępnych polowych i laboratoryjnych metod określania modułu ścinania gruntów w warunkach polskich, w tym ich krótka charakterystyka, omówienie techniki badania, wyników pomiarów własnych i sposobu interpretacji oraz prezentacji wyników wraz z praktycznymi uwagami można znaleźć w pracach [7, 9, 13, 15].

Podane przykłady potwierdzają aplikacyjność stosowanych metod badawczych, a uzyskiwane prognozy z analiz numerycznych potwierdzają konieczność wyznaczania wartości G_0 dla obiektów, gdzie do współpracy są włączone duże obszary gruntów, a w nich odkształcenia są małe, np. ściany szczelinowe, obudowy tuneli itp. Zastosowanie w modelowaniu numerycznym parametrów sztywności G_0 i uzyskiwane na tej podstawie prognozy przemieszczeń są zbieżne z rzeczywistymi pomiarami. Stąd wynika potrzeba rozwoju i szerszego stosowania przedstawionych metod.

LITERATURA

1. Amoroso S., Monaco P. Marchetti D.: Use of the Seismic Dilatometer (SDMT) to estimate in situ G-y decay curves in various soil types Proc. of the ISC'4, Porto de Galinhas, Brasil; editors: R.Q. Coutinho, P. W. Mayne, CRS Press Taylor&Francis Group, v. 1, 2012, 489-497.

2. Barański M., Godlewski T., Szczepański T.: Determination of soil stiffness parameters on chosen test sites, using *in situ* seismic methotds. Soil parameters from in situ and laboratory tests, Poznań, Wyd. Uniwersyt. Przyrod. w Poznaniu, 2010, 149-157. 3. Foti S., Lai C. G., Rix G. J., Strobbia C.: Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization. CRC Press, 2014.

4. Godlewski T., Szczepański T.: Nieliniowa charakterystyka sztywności gruntu (G_0) – metody oznaczania i przykłady zastosowań. XXXIV ZSMGiG, Kudowa Zdrój, 14-18 marca 2011, Kwartalnik AGH, 2011, rok 35, zeszyt 2, Kraków 2011.

Godlewski T., Szczepański T.: Determination of soil stiffness parameters using in-situ seismic methods-insight in repeatability and methodological aspects. Proc. of the ISC'4, Porto de Galinhas, Brasil; editors: R.Q. Coutinho, P. W. Mayne, CRS Press Taylor&Francis Group, v. 1, 2012, 441-446.

6. Godlewski T., Szczepański T.: Measurement of soil shear wave velocity using in situ and laboratory seismic methods – some methodological aspects. Geological Quarterly Vol 59, No 2, w ramach 5. Ogólnopolskiego Sympozjum Współczesne Problemy Geologii Inżynierskiej w Polsce, Lublin 14-17.10.2014 r., 2015.

 Godlewski T., Szczepański T.: Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych. Poradnik ITB, Warszawa 2015.

8. Massarsch K. R.: Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote lecture, International Conference on Site Characterization, ISC'2, 19-22 Sept. 2004, Porto, 2004, 133-146.

 Młynarek, Z., Wierzbicki, J., Stefaniak, K.: Deformation characteristics of overconsolidated subsoil from CPTU and SDMT tests. Proceedings of ISC'4, 17-21 September 2012, Porto de Galinhas-Pernambuco, Brazil, 2: 2012, 1189-1193.

10. Monaco P., Marchetti S., Totani G.: Interrelationship between Small Strain Modulus Go and Operative Modulus. IS-Tokyo 2009. International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, 2009.

 PN-B/81-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie. PKN, Warszawa 1981.

 Popielski P.: Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. Prace Naukowe – Inżynieria Środowiska PW, z.61, 2012.

13. Rabarijoely S.: Określenie modułu ścinania (G) namułów organicznych z badań dylatometrycznych (DMT). Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2009, 332-335.

14. Robertson P. K.: Interpretation of cone penetration tests – unified approach. Canadian Geotechnical Journal 46, 2009, 1337-1355.

15. Sas W., Szymański A., Gabryś K.: The behaviour of natural cohesive soils under dynamic excitations. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013, Vol. 1, 1587-1590.

16. Truty A.: Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń, aspekty modelowania numerycznego, Czasopismo techniczne PK, z. 3-Ś/2008, 107-126.