

Metody wyznaczania wartości parametrów sprężystych iłów płoceńskich dla II linii metra w Warszawie

Rafał Kuszyk, Małgorzata Superczyńska, Anna Lejzerowicz

W artykule zostały przedstawione metody badań laboratoryjnych i polowych wykorzystywanych w celu oznaczenia wartości modułów sprężystych iłów płoceńskich, dla potrzeb projektowania robót tunelowych II linii metra w Warszawie. Badania laboratoryjne wykonano z zastosowaniem tzw. Bender Element System, a dla porównania wyników wykonano badania polowe z zastosowaniem geofizyki otworowej metodą cross-hole. Autorzy przedstawili wyniki badań parametrów sprężystych – modułu sprężystości G oraz modułu odkształcenia E – w zakresie małych odkształceń. W badaniach laboratoryjnych uzyskano mniejsze o około 20-30% wartości prędkości fal w stosunku do badań terenowych, a więc także mniejsze wartości modułów. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono zróżnicowanie wartości parametrów odkształceniowych w różnych sytuacjach geologicznych występowania iłów trzeciorzędowych (zaburzonych glaciekticznie). Otrzymane wyniki potwierdzają celowość stosowania metod geofizyki otworowej (rzadko wykorzystywanej w praktyce krajowej) do wyznaczania parametrów odkształceniowych gruntów dla konstrukcji inżynierskich.

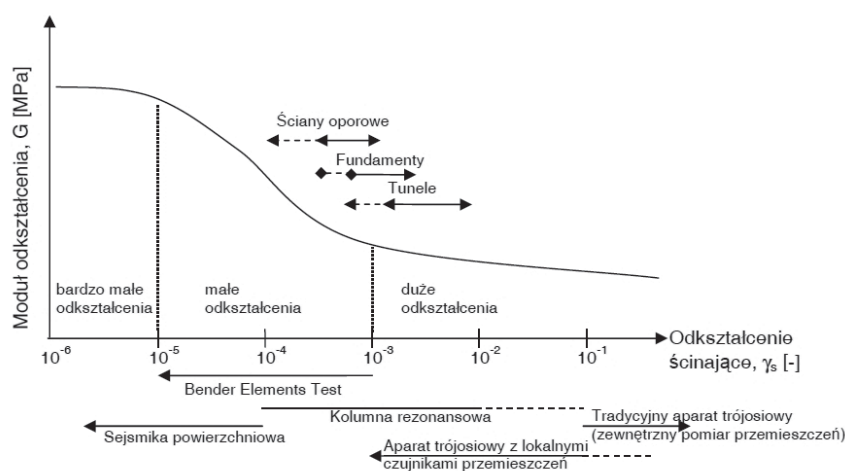
Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 26.03.2012

data akceptacji do druku: 15.06.2012



mgr Rafał Kuszyk,
asystent
Zakład Geotechniki
i Budowli Podziemnych,
Instytut Dróg i Mostów,
Wydział Inżynierii
Lądowej, Politechnika
Warszawska
r.kuszyk@il.pw.edu.pl



1. Diagram Atkinsona nieliniowości modułu G , źródło: [1]



mgr
Małgorzata Superczyńska,
asystent
Zakład Geotechniki
i Budowli Podziemnych,
Instytut Dróg i Mostów,
Wydział Inżynierii
Lądowej, Politechnika
Warszawska
m.superczyńska@il.pw.edu.pl



mgr Anna Lejzerowicz,
asystent
Zakład Geotechniki
i Budowli Podziemnych,
Instytut Dróg i Mostów,
Wydział Inżynierii
Lądowej, Politechnika
Warszawska; doktorant,
Uniwersytet Warszawski
a.lejzerowicz@il.pw.edu.pl

W celu prawidłowego opisu zachowania się ośrodka gruntowego w danym zakresie naprężenia, konieczny jest dobór odpowiedniej metodyki badań. W przypadku projektowania głębokich posadowień, obudów wykopów, ścian podziemi, czy też obudów tuneli, należy rozpoznać i przeanalizować wartości parametrów sprężystych gruntów w zakresie małych naprężeń i odkształceń ($<10^{-3}$ %).

Na rysunku 1 przedstawiono zmienność modułu sprężystości gruntu G [MPa] w zależności od zakresu naprężenia, na którym widoczna jest silna nieliniowość tego parametru w zakresie odkształceń 10^{-6} - 10^{-3} mm (zmienność parametru powyżej 50%). W artykule przedstawiono wyniki pomiarów modułu sprężystości G i modułu odkształcenia E z badań polowych, wykonanych metodą testu cross-hole oraz laborato-

ryjnych, wykonanych na próbkach o nienaruszonej strukturze w aparacie trójosiowym z zastosowaniem czujników typu bender elements. Badania wykonano na ilach płoceńskich dla potrzeb projektowania robót tunelowych na II linii metra w Warszawie.

Metody badawcze - badania polowe

W celu identyfikacji parametrów opisujących deformację ośrodka gruntowego w zakresie małych odkształceń można wykonać zarówno badania laboratoryjne, jak i polowe. W badaniach „in situ” zastosowanie mają metody geofizyczne takie jak: sejsmika powierzchniowa (SASW - Spectral Analysis of Surface Waves, CSWS - Continuous Surface Wave System), sondowania statyczne (SCPT - seismic cone penetration test lub SDMT - seismic Marchetti dilatometer test)

lub geofizyka otworowa (D-H – metoda down - hole lub C-H – metoda cross-hole).

Sejsmika powierzchniowa jest metodą nieinwazyjną, nie deformującą ośrodka gruntowego. Wykorzystywane są tu powierzchniowe fale Rayleigha, poruszające cząstki gruntu, które zakreślają elipsy w pionowej płaszczyźnie. Fale rozchodzą się promieniście od miejsca wzbudzenia (w metodzie SASW jest to uderzenie np. młotkiem) do głębokości równej około jednej długości fali. Prędkość zależy od częstotliwości oraz właściwości sprężystych i gęstości ośrodka. Wynikami badań są profile sztywności gruntu w postaci rozkładu zmienności modułu $G_{\max}$ (maksymalnego modułu ścinania) w zakresie głębokości do ok. 10-15 m.

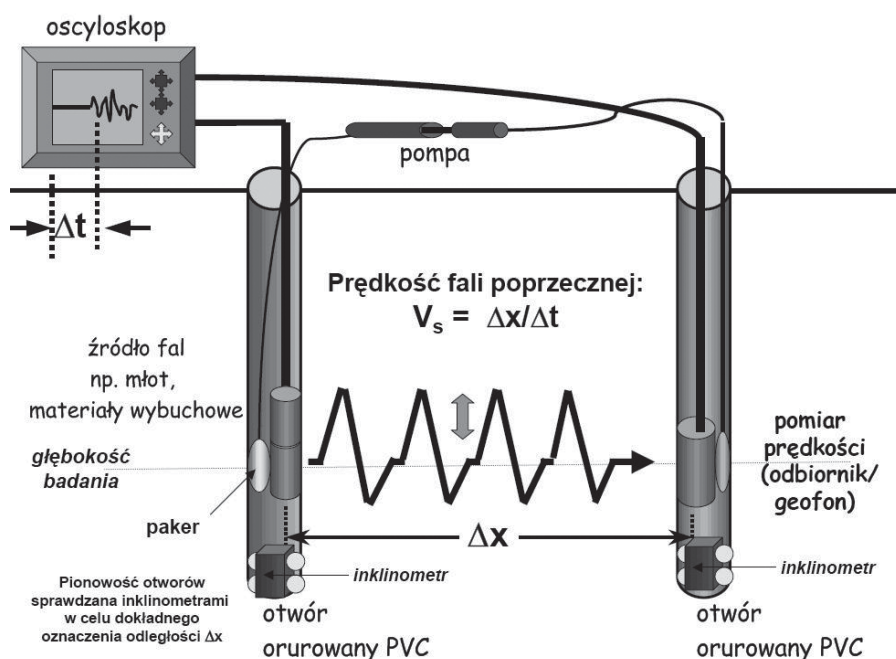
W sondowaniu SCPTU wykorzystuje się sondę statyczną przystosowaną do pomiarów danych sejsmicznych. Podczas badania używa się piezostopka wyposażonego w jeden lub dwa zestawy geofonów rozmieszczone w stałej odległości od siebie, a badanie uzupełnione jest o pomiar wzbudzonego w trakcie sondowania ciśnienia wody w porach. Cały zestaw zawiera również dwukierunkowy inklinometr. W trakcie wciskania stożka w grunt następuje wzbudzenie fal sejsmicznych na powierzchni terenu. Fale sejsmiczne przemieszczają się w głąb ośrodka, a zainstalowane na stożku geofony rejestrują sygnał (zapisywany przez wielokanałowy sejsmograf).

W badaniu SDMT oprócz standardowego zagłębiania końcówki łopatką co 0,2 metra i pomiaru wartości ciśnienia sprężonego powietrza przy styku membrany z gruntem, przy ruchu 1,1 mm w kierunku gruntu oraz po powrocie membrany do pozycji początkowej, dodatkowo odbywa się pomiar czasu propagacji fali od nadajnika umieszczonego na powierzchni terenu do dwóch odbiorników zainstalowanych na pierwszej żerdzi dylatometru.

W metodach geofizyki otworowej badania przeprowadza się w otworze badawczym. Dochodzi do naruszenia struktury gruntu, jednakże można uzyskać wyniki badań parametrów sprężystych na żądanych, nawet znacznych głębokościach. Wyróżnia się dwa typy badań: test typu down-hole (D-H) i test typu cross-hole (C-H).

Badanie D-H przeprowadza się w jednym otworze badawczym na założonej głębokości (odbiornik zainstalowany jest w otworze, a nadajnik znajduje się na powierzchni). Przeprowadza się pomiar czasu przejścia fali między źródłem a odbiornikiem i oblicza się prędkość fali poprzecznej [2].

Badania metodą C-H polegają na pomiarze czasu propagacji fal podłużnych oraz poprzecznych przemieszczających się pomiędzy dwoma (lub więcej) otworami wiertniczymi. Zmiany w strukturze, gęstości oraz właściwościach sprężystych bezpośrednio



2. Schemat pomiaru metodą cross-hole, źródło: [4]

Tab. 1: Wartości parametrów sprężystych uzyskanych z BES (oznaczenia jak wyżej)

Numer i głębokość pobrania próby NNS [m ppt]	ρ [Mg/m ³]	V_s [m/s]	V_p [m/s]	p' [kPa]	$G_{\max}$ [MPa]	ν [-]	E [MPa]
1. 5,0 - 5,4*)	2,11	278,8	464,6	100,0	164,0	0,32	433,0
2. 14,0 - 14,4	2,05	176,7	322,6	250,0	64,0	0,35	173,0
3. 17,0 - 17,4	2,07	201,4	380,7	320,0	84,0	0,36	218,0
4. 18,5 - 19,1	2,04	194,2	333,2	340,0	77,0	0,33	205,0

*) Próba gruntu pobrana w stropowej części wyraźnej elewacji glacytektonicznej.

Źródło: Opracowanie własne

wpływają na rozkład wartości prędkości fali. Na podstawie pomiarów odtwarzana jest struktura wewnętrzna badanego ośrodka. Zapisu fal sejsmicznych dokonuje się w wybranych interwałach głębokościowych. Jeden z otworów służy jako źródło impulsu (rys. 2), podczas gdy w każdym otworze odbiorczym instaluje się geofony – odbiorniki sygnału rejestrujące drgania sejsmiczne. W trakcie kolejnych pomiarów nadajnik i odbiornik znajdują na takich samych głębokościach, zakłada się poziomą ścieżkę propagacji fal [3].

Metoda ta pozwala na wykrycie nawet cienkich przewarstwień np. soczewek piasku w obrębie ilów lub obiektów w górotworze np. głazów narzutowych. Dokładność i rozdzielczość metody C-H jest praktycznie stała na wszystkich głębokościach. Jest to istotne przy pomiarze parametrów sprężystych gruntu, których wartości maleją wraz z głębokością przy użyciu metod powierzchniowych. Ograniczeniem tej metody jest trudność w uzyskaniu odpowiedniej energii bez uszkodzenia obudowy otworu. Wiarygodne wyniki w metodzie C-H uzyskuje się przy wykorzystaniu co najmniej trzech otworów

wiertniczych (w jednym nadajnik, w dwóch odbiorniki). Przy dwóch otworach nie ma możliwości wykorzystania przedziału czasu przejścia fal – trzeba znać dokładny czas wzbudzenia fali sejsmicznej. W takim przypadku prędkość określana jest jako przebyta odległość podzielona przez dokładny czas podróży fali [7].

Metody badawcze - badania laboratoryjne

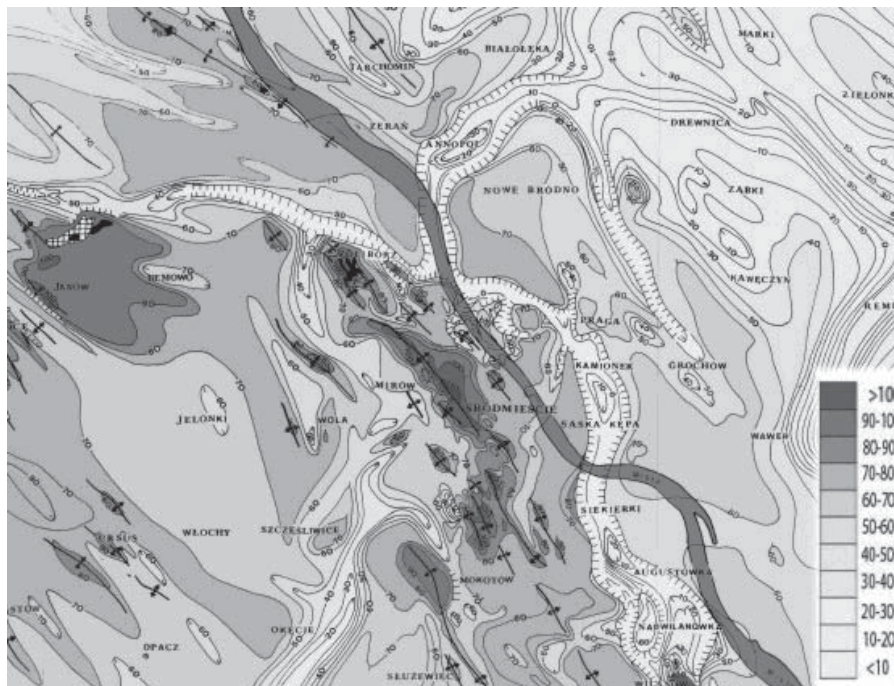
W badaniach laboratoryjnych, do pomiaru bardzo małych odkształceń próbki pod obciążeniem wykorzystuje się aparat trójosiowego ściskania z wykorzystaniem czujników przemieszczeń bocznych, kolumnę rezonansową oraz tzw. Bender Element Test. W typowym aparacie trójosiowego ściskania stosowany jest zewnętrzny system pomiaru zmiany wysokości próbki (bez pomiaru przemieszczeń poziomych), a precyzja pomiaru odkształceń mieści się w zakresie 0,1-0,5% (por. rys. 1). Zastosowanie w takich badaniach dodatkowo systemu pomiaru lokalnych przemieszczeń poziomych za pomocą czujników o dużej rozdzielczości, pozwala

Tab.2: Zestawienie wartości parametrów odkształceniowych badanych iłów

Numer i głębokość pobrania próby NNS [m ppt]	Bender Elements Test				Bender Elements Test	
	G _{max} [MPa]	v [-]	p' [MPa]	G _{max} /σ _{v0} [MPa]	E _{max} /σ _{v0} [MPa]	G _{max} = E _{max} /2(1+v) [MPa]
1. 5,0-5,4*)	164,0	0,32	0,10	1640,0	-	-
2. 14,0-14,4	64,0	0,35	0,25	256,0	920,0	343,3
3. 17,0-17,4	84,0	0,36	0,32	262,5		
4. 18,5-19,1	77,0	0,33	0,34	226,5		

*) Próba gruntu pobrana w stropowej części wyraźnej elewacji glaciektonicznej.

Źródło: Opracowanie własne



3. Schemat występowania iłów formacji poznańskiej w rejonie Warszawy; stopy osadów plioceniowych w m n.p.m.; źródło: [6]

na uzyskanie zakresu zmienności modułu odkształcenia 0,001-0,1%.

Podstawową zasadą działania drugiej metody pomiarowej – kolumny rezonansowej – jest wzbudzenie jednego końca ograniczonej cylindrycznej próbki gruntu za pomocą drgań skrętnych lub pionowych przy użyciu elektromagnetycznego systemu obciążania. Pomiary wykonywane są z częstotliwością rezonansową danej próbki przy stopniowym zwiększaniu częstotliwości drgań. Znając częstotliwość rezonansową próbki oraz amplitudę drgań można obliczyć prędkość rozchodzenia się fali oraz amplitudę odkształceń (przy zastosowaniu teorii sprężystości, przeliczając je na moduł odkształcenia w zakresie 10-4-10-1%.

W przypadku trzeciej metody (BES - Bender Elements System) wykorzystuje się aparat trójosiowego ściskania zmodyfikowany o dodatkowe dwa piezoelementy umieszczone w górnej i dolnej części próbki. Odkształcając się mechanicznie wytwarzają na swoich powierzchniach różnicę potencjału,

a pod wpływem pola elektrycznego zmieniają kształt podłużnie lub poprzecznie. Piezoelementy są zarówno źródłem, jak i odbiornikiem fali poprzecznej oraz podłużnej. Wykorzystując zależności empiryczne można z tych badań określić moduł odkształcenia w zakresie 10-6-10-5 %.

Badania parametrów sprężystych w zakresie małych odkształceń na przykładzie iłów plioceniowych

Poniżej zostaną przedstawione wartości parametrów odkształceniowych iłów plioceniowych z rejonu budowy centralnego odcinka metra w Warszawie. Iły formacji poznańskiej w Warszawie stanowią istotną część podłoża budowlanego. Należy mieć na uwadze ich skomplikowaną przeszłość geologiczną. Istotny wpływ na wartości parametrów mechanicznych mają warunki występowania, rodzaj gruntu, rodzaj struktury, rodzaj i przebieg procesu konsolidacji i innych procesów geologicznych, jakim grunt podlegał

w przeszłości. Iły plioceniowe były obciążone łądolodami co najmniej trzykrotnie [6] i są gruntami prekonsolidowanymi. W przypadku tuneli i wykopów realizowanych w iłach poznańskich możliwe jest wystąpienie odprężenia masywu gruntowego oraz ekspansyjności pobudzonej zawilgoceniem (odciążone łatwo pęcznią).

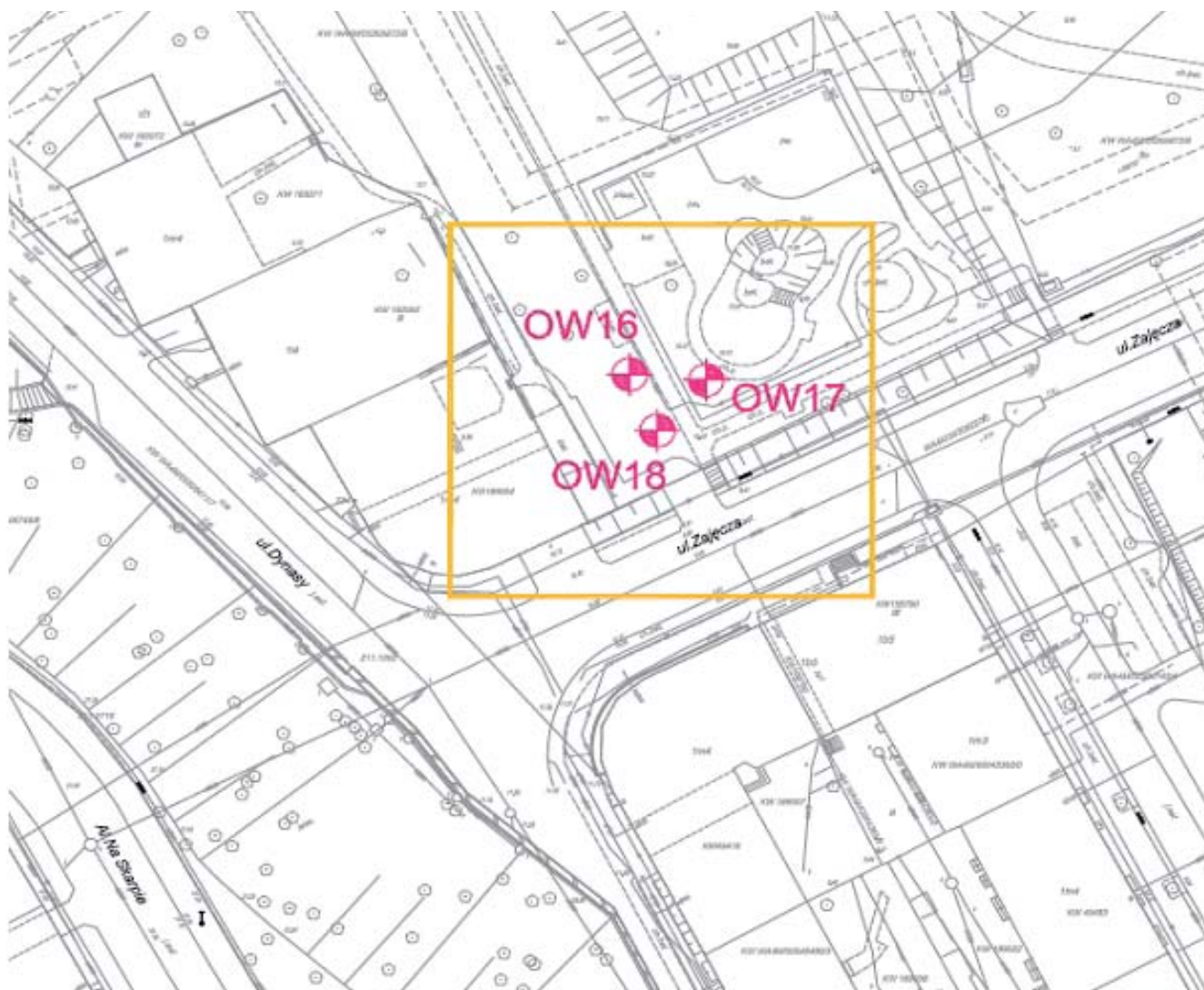
Sedymentacja iłów rozpoczęła się w miocenie, około 13 milionów lat temu i trwała 9 milionów lat. W tym okresie na terenie Polski istniał zbiornik słodkowodny, okresowo wysychający. Swym zasięgiem pokrywał on około 2/3 powierzchni kraju. Pierwotne, sedymentacyjne położenie stropu iłów pstrych znajdowało się na głębokości 60-80 m ppt. W rejonie Warszawy osiągnęły miąższość 90-140 m [5]. Pod względem litologicznym iły formacji poznańskiej reprezentowane są przez iły, iły pylaste z przewarstwieniami pyłów, pyłów piaszczystych i piasków drobnych. W swoim składzie mineralnym zawierają dwa główne składniki: kwarc detrytyczny oraz minerały ilaste (w zmiennych proporcjach). W historii geologicznej ulegały procesom, które miały istotny wpływ na stopień ich skomplikowania jako podłoża budowlanego. Po zakończeniu sedymentacji ulegały procesowi erozji rzecznej, denudacji oraz były poddawane działalności lodowców. W rejonie Warszawy iły pstry występują w różnych układach geologicznych. Ich powierzchnię stropową cechują duże deniwelacje – nawet do 100 metrów (por. rys. 3). Znajdują się w podłożu osadów czwartorzędowych plejstoceniowych i holoceniowych.

Lokalnie mogą występować na powierzchni terenu (np. rejon skarpy warszawskiej) lub pod niewielkim nadkładem osadów czwartorzędowych (np. elewacja śródmiejska), w dolinie Wisły bezpośrednio pod aluwiami. Wyraźnie zaznaczają się elewacje stropu iłów wtórnie wypiętrzonych wskutek procesów glaciektonicznych oraz głębokie rynny o rozciągłości na kierunkach NNW-SSE [5, 6]. Główne zaburzenia, przemieszczenia w układzie warstw powstały wskutek transgresji lodowca, w jego strefie czołowej. Krawędzie boczne łądolodu wywierały nacisk na progi morfologiczne pradoliny Wisły.

Metoda laboratoryjna – BES

Badania zostały przeprowadzone na próbach NNS pobranych z różnych głębokości. Pod względem litologicznym są to iły, iły pylaste i gliny związane o gęstości objętościowej $\rho = 2,06$ [Mg/m³], wilgotności naturalnej $w_n = 16,5-21,2$ [%], początkowej wartości wskaźnika porowatości $e = 0,67-0,76$ [-], wskaźniku plastyczności $I_p = 40-50$ [%].

W czasie badań właściwości sprężystych iłów plioceniowych w zakresie małych odkształceń (odpowiadające przedziałowi



4. Szkic rozstawienia otworów badawczych – rejon skarpy warszawskiej

10-6-10-5% odkształcenia) w laboratorium wykorzystano system pomiaru BES. Prędkość propagacji fali w sprężystym ośrodku gruntowym V obliczana jest na podstawie wzoru:

$$V = \frac{h}{t} \quad (1)$$

gdzie:

h – odległość między nadajnikiem i odbiornikiem [m],

t – czas przejścia fali przez próbkę [s].

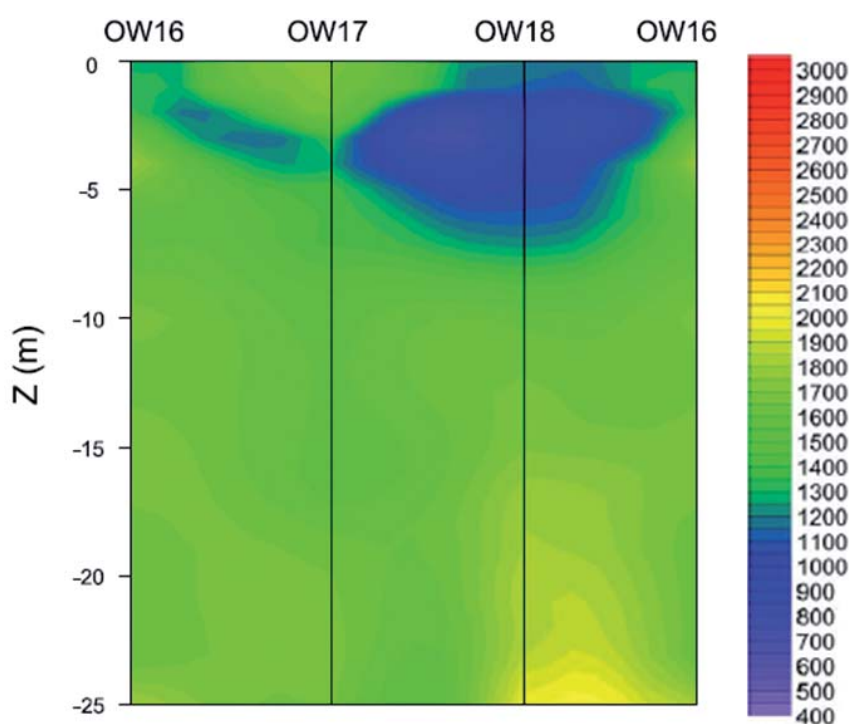
Zmierzone prędkości fal służą do obliczenia parametrów gruntu według podanych wzorów:

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

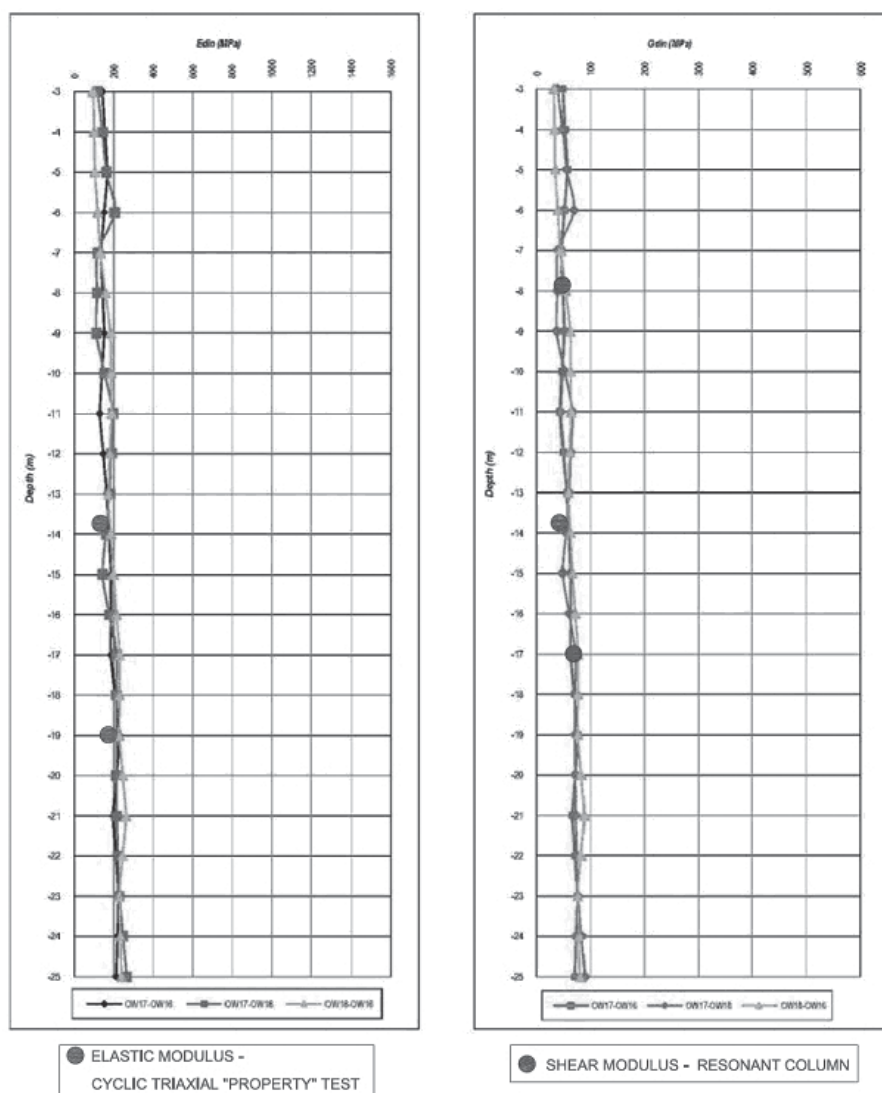
$$M = \rho V_p^2 \quad (3)$$

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (4)$$

$$E = 2\rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (5)$$



5. Rozkład prędkości fal podłużnych [m/s]



6. Rozkład modułów E_{dyn} i G_{dyn} oraz porównawcze, inne badania laboratoryjne

$$v = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (6)$$

gdzie:

- V_s - prędkość fali poprzecznej [m/s],
- V_p - prędkość fali podłużnej [m/s],
- ρ - gęstość objętościowa gruntu [Mg/m³],
- G_{max} - moduł odkształcenia postaciowego [MPa],
- M - moduł ściśliwości [MPa],
- K - moduł odkształcenia objętościowego [MPa],
- E - moduł odkształcenia [MPa],
- v - współczynnik Poissona [-].

Pomiarów dokonywano na próbce obciążonej izotropowo o wartości szacowanego naprężenia całkowitego na głębokości jej pobrania. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań trójosiowych na próbkach NNS pobranych z elewacji śródmiejskiej (próbka 1 - ul. Marszałkowska) oraz z obszaru doliny Wisły (próbka 2 - ul. Wybrzeże Kościuszkowskie, próbki 3 ÷ 4 - ul. Żąbca).

Metoda badania in-situ – test cross-hole

Badania geofizyki otworowej zostały wykonane w układzie trzech otworów usytuowanych względem siebie w odległości 3 m wg schematu na rys. 4. W każdym otworze dokonywano pomiaru fali podłużnej i poprzecznej przeliczając je na wartości dynamicznego modułu sprężystości E_{dyn} oraz dynamicznego modułu ścinania G_{dyn} . Na rys. 5 został przedstawiony obraz rozkładu prędkości fal podłużnych V_p , zaś na rys. 6 wyniki pomiarów modułów. Tabela 2 zestawia wyniki porównawcze badań laboratoryjnych i badań polowych dla poszczególnych próbek.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono zróżnicowanie wartości parametrów odkształceniowych w obrębie iltów trzeciorzędowych z rejonu Warszawy – wysokie wartości w centralnej części elewacji (prób-

ka nr 1) i o ok. 50% niższe w dolinie Wisły.

Badania geofizyczne typu cross-hole wskazują na stosunkowo dużą jednorodność iltów pliocięskich w profilu głębokościowym, w poszczególnych punktach badawczych (por. rys. 5).

W badaniach laboratoryjnych uzyskano mniejsze o około 20 ÷ 30% wartości prędkości fal w stosunku do badań terenowych, a co za tym idzie, również mniejsze wartości modułów. Może to wynikać z odprężenia próbek gruntu w czasie od pobrania do wykonania oznaczenia oraz z naruszenia jego struktury.

Otrzymane wyniki potwierdzają celowość stosowania metod geofizyki otworowej (rzadko wykorzystywanej w praktyce krajowej) do wyznaczania parametrów odkształceniowych gruntów dla konstrukcji inżynierskich. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Atkinson J. H., Salfors G.: Experimental determination of soil properties. Proceedings 10th ECSMFE, Florence, 1991, 3: 915-956
- [2] Andreasson B.: Deformation characteristics of soft high-plastic clays under dynamic loading conditions. Department of Geotechnical Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, 1979.
- [3] Findlay M.J., Goult N.R., Kragh J.E.: The crosshole seismic reflection method in opencast coal exploration, First Break, 1979, Issue: Vol 25, No. 7.
- [4] Georgia Institute of Technology, <http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/Research/misc/Crosshole.jpg>, dostęp 06. 2011.
- [5] Frankowski Z.: Występowanie iltów formacji poznańskiej w Warszawie. Seminarium ITB: Iły pliocięskie Warszawy. Warszawa, 2004, s. 5-14.
- [6] Sarnacka Z.: Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. Prace Państwowego Inst. Geologicznego CXXXVII, Warszawa, 1992.
- [7] Wightman W. E., Jalinoos F., Sirles P., Hanna, K.: Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, 2003, Publication No. FHWA-IF-04-02.