

WERYFIKACJA PARAMETRÓW PODŁOŻA NA PODSTAWIE WYKONANEJ ANALIZY WSTECZ PRZY REALIZACJI GŁĘBOKICH POSADOWIEŃ W WARSZAWIE

Paweł Popielski

Politechnika Warszawska

Streszczenie. W pracy omówiono problemy występujące przy analizie głębokich posadowień, głównie przy określaniu wartości parametrów podłoża, i związanej z nimi niepewność pomiaru. Przedstawiono ich źródło oraz rozwój metod i rozwiązań poprawiających zgodność obliczonych i pomierzonych przemieszczeń budynków. Zaprezentowano możliwość wykorzystania i trafność reguł różnicowania (uzmienniania) parametrów geotechnicznych warstw gruntu zalegającego na dużych głębokościach na podstawie zależności lokalnych z uwzględnieniem zmian sztywności gruntu, bazując na teorii małych odkształceń. Wykorzystano autorskie modyfikacje wartości parametrów określonych w rozpoznaniu bazującym na normie PN-81/B-03020, która przez wiele lat była wykorzystywana przy rozpoznaniu podłoża pod głębokie posadowienia przy symulacjach numerycznych.

Słowa kluczowe: głębokie posadowienia, parametry podłoża, modelowanie numeryczne, analiza wstecz

WSTĘP

Opracowania obejmujące analizę oddziaływania obiektów posadowionych głęboko znajdują miejsce nie tylko w pracach naukowych. Z racji społecznych i gospodarczych coraz częściej stają się też elementem wymagań formalno-administracyjnych, warunkujących realizację inwestycji w mieście. Właściwie przeprowadzona analiza, zweryfikowana za pomocą monitoringu przemieszczeń, stanowi dobry materiał do oceny poprawności zastosowanych modeli i metod obliczeniowych.

Wyznaczenie oddziaływania głęboko posadowionych obiektów budowlanych (GPOB) obarczone jest niepewnością licznych pomiarów. Najistotniejsze z nich dotyczą: zmien-

ności obciążeń i wartości parametrów geotechnicznych podłoża oraz zmiany geometrii wykonywanych elementów konstrukcji.

Niepewności pomiarów związanych z wyznaczeniem oddziaływań GPOB, ze względu na występujące lub możliwe zmienności, można związać ze:

- zmiennością obciążeń spowodowaną stosowaniem różnych współczynników zależnych od przyjętej do obliczeń normy lub zmianą przeznaczenia obiektu w czasie trwania budowy,
- zmiennością parametrów geotechnicznych podłoża (dokładność i głębokość rozpoznania, wartości parametrów mechanicznych i wytrzymałościowych ośrodka),
- zmiennością parametrów filtracyjnych ośrodka (wywołaną przez erozję, sufozję lub kolmatację gruntu),
- niezgodnością geometrii elementów konstrukcji z założeniami projektowymi (np. skrzyżowane elementy wprowadzane w grunt czy nieosiowe obciążenia).

Największe znaczenie ma niepewność pomiarów związanych z wydzieleniem warstw geotechnicznych oraz wyznaczeniem wartości parametrów materiałowych podłoża. W analizie tego zagadnienia można wyróżnić cztery główne źródła niepewności pomiarów geotechnicznych:

- naturalną zmienność parametrów, wynikającą z procesów występujących w podłożu gruntowym,
- niepewność pomiarową parametrów podłoża, wynikającą z zastosowanej aparatury badawczej, procedur badań, obsługi (czynnik ludzki) i innych losowych efektów towarzyszących badaniom,
- niepewność „przejścia” z parametrów określonych w badaniach terenowych lub laboratoryjnych do parametrów projektowych (obliczeniowych); w przypadku wystąpienia w podłożu małych odkształceń bardzo często wartości parametrów mechanicznych (odkształceniowych) są niedoszacowane – w zależności od przyjętej metody obliczeń (normy) stosowane są różne współczynniki redukujące wartości tych parametrów,
- zmianę wartości parametrów w czasie realizacji budowy, spowodowaną przerwami w budowie lub złym określeniem zakresu odkształceń gruntu w trakcie realizacji inwestycji.

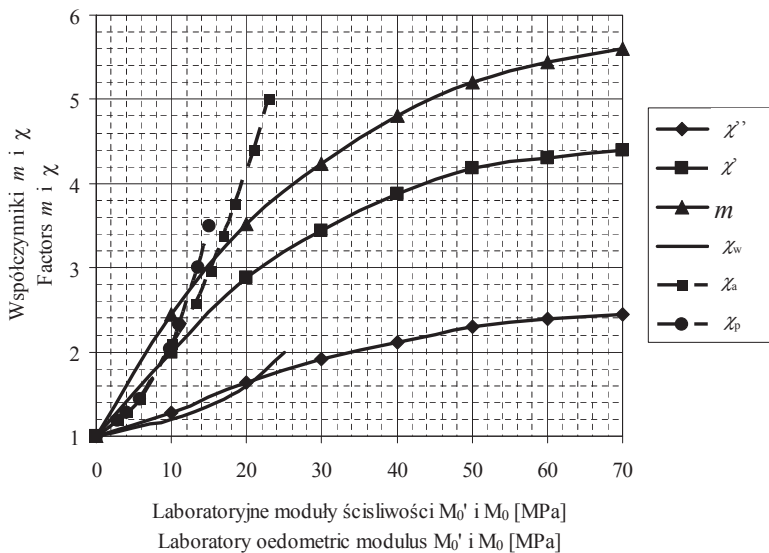
W ogólnie przyjętej praktyce inżynierskiej poszczególne warstwy gruntów są opisane tylko jedną wartością parametru (np. modułu odkształcenia E , c , φ), przypisaną całej analizowanej warstwie. Takie podejście prowadzi do uśredniania wartości parametru i nieuwzględniania zmiany stanu naprężenia wraz z głębokością, która ma wpływ na wartość tego parametru.

O wartościach przemieszczeń (miar, które są monitorowane w trakcie wykonywania inwestycji) decydują moduły sztywności. Przy obliczaniu wartości osiadań na podstawie normowych parametrów odkształceniowych (mechanicznych) występują znaczne różnice w stosunku do pomierzonych na budowie. W pracy Kłosińskiego [2010] przedstawiono wartości modułów M_0 na podstawie różnych źródeł, między innymi zgromadzone na podstawie obserwacji osiadań budynków wysokich w Warszawie (z praktyki IBDiM). Wartości różnią się znacznie od podanych w normach, a w miarę zyskiwania nowych danych różnice stają się coraz większe.

W głębokich warstwach podłoża Warszawy występują ility plioceńskie „pознаńskie”, które są zwykle silnie prekonsolidowane. Przy powierzchni są dość ściśliwe, natomiast

na dużej głębokości i przy małych odkształceniach moduł ich znacząco rośnie, osiągając wartości dużo większe niż przyjmowane powszechnie dla płytkich fundamentów. Moduł odkształcenia gruntów nie jest parametrem stałym. Zależy on od naprężeń i odkształceń ośrodka i zmienia się wraz z upływem czasu po wykonaniu wykopu. W trakcie realizacji GP zmienia się stan naprężeń efektywnych, rosną odkształcenia, a ścieżka naprężeń zmienia kierunek, co powoduje duże zmiany sztywności. O tych zmianach należy pamiętać szczególnie, stosując proste modele konstytutywne. Zdaniem autora różnice w obliczeniach i pomiarach wynikają głównie ze zmiany modułów, w zależności od odkształceń ośrodka oraz z niedostosowania norm i wykonywanych badań laboratoryjnych do wyznaczania wartości parametrów sztywności przy analizie głębokich posadowień.

Na podstawie wieloletnich doświadczeń praktycznych wiadomo [Wiłun 1976], że istnieje różnica między wartościami modułów uzyskanych z próbnych obciążeń i z badań laboratoryjnych. Jest to spowodowane nieuwzględnieniem niektórych trudno uchwytanych skutków naruszenia struktury gruntu przy pobieraniu próbki w terenie i laboratorium. Dodatkowo w próbkach występuje rozkład naprężeń inny niż w podłożu oraz spadki hydrauliczne inne w naturze i inne na przykład w edometrze. Zjawisko to próbowano rozwiązać już w normie PN-75/B-04481, gdzie podano współczynniki χ_p i χ_w , pozwalające odpowiednio zwiększyć uzyskane wartości modułów otrzymane z badań edometrycznych. Na rysunku 1 przedstawiono inne współczynniki poprawkowe modyfikujące wartości modułów ścisłości [Wiłun 1976]. Wartości modułu uzyskane w laboratorium i wyznaczone na podstawie próbnych obciążeń różnią się kilkukrotnie.



Rys. 1. Współczynniki poprawkowe m i χ : χ_p – według PN-75/B-04481, χ_w – według PN-75/B-04481, χ_a – według Wiłuna [1976], m – według Jurika [Wiłun 1976], χ' – według Wiłuna [1976], χ'' – według Wiłuna [1976]

Fig. 1. Correction factors m i χ : χ_p – by PN-75/B-04481, χ_w – by PN-75/B-04481, χ_a – by Wiłun [1976], m – by Jurik [Wiłun 1976], χ' – by Wiłun [1976], χ'' – by Wiłun [1976]

Do obliczeń M i M_0 należy stosować wzory:

$$M_0 = mM_0'; M_0 = \chi_p M_0'; M_0 = \chi' M_0' \quad (1)$$

$$M = \chi_w M'; M = \chi'' M' \quad (2)$$

gdzie: M_0' – laboratoryjny moduł ściśliwości pierwotnej liczony bez poprawek,
 M_0 – moduł ściśliwości pierwotnej,
 M'' – laboratoryjny moduł ściśliwości liczony bez poprawek,
 M – moduł ściśliwości,
 $\chi_p, \chi_w, m, \chi', \chi''$ – współczynniki poprawkowe.

Moduł ścinania G_0 (opisujący zachowanie się gruntu przy bardzo małych odkształceniach), podobnie jak wytrzymałość gruntu, jest funkcją wielu zmiennych [Hardin 1978]:

$$G_0 = f(\sigma'_0, e, H, S_r, C, T, \theta, K) \quad (3)$$

Czynniki decydujące o wartości modułu G_0 to: σ'_0 – efektywne naprężenie średnie, e – wskaźnik porowatości, H – historia naprężeń, S_r – stopień nasycenia gruntu, C – charakterystyki granulometryczno-mineralogiczne, T – efekty uzależnione od czasu, θ – struktura gruntu, K – temperatura. Nie wszystkie wymienione czynniki można i należy uwzględnić w obliczeniach osiadań. W gruntach moduł ścinania jest funkcją stanu naprężenia efektywnego, wskaźnika porowatości, współczynnika prekonsolidacji oraz odkształcenia postaciowego [Shibuya 1992].

Jak wynika z badań laboratoryjnych, zmiana sztywności zachodzi razem ze zmianą stanu odkształcenia postaciowego. Wartości początkowego modułu ścinania (G_0) nie są stałe i silnie zależą od średniego naprężenia efektywnego. Sztywność gruntu w zakresie małych odkształceń jest bardzo ważnym czynnikiem bezpośrednio wpływającym na interakcję konstrukcji budowlanych z otaczającym je gruntem. Zależność modułu ścinania (G) od wartości odkształcenia ścinającego (γ) przyjmuje charakterystyczny kształt, określany w literaturze [Atkinson 2000] jako krzywa S.

Należy pamiętać, że zależności podawane w literaturze geotechnicznej dotyczą zwykle konkretnych gruntów występujących w danym kraju i nie powinny być bezkrytycznie stosowane do oszacowania wartości modułu G_0 dla gruntów występujących na terenie Polski. Grunty warszawskie mają inną genezę i geologiczną historię naprężeń. Ważne są zależności opracowane dla gruntów lokalnych, na przykład il występujący w rejonie Warszawy ma specyficzne parametry [Barański 2004] w stosunku do ilów londyńskich. Iły warszawskie i londyńskie są gruntami prekonsolidowanymi, o różnej wartości stopnia prekonsolidowania OCR: londyńskie 4–41, warszawskie 2–14. Iły warszawskie w porównaniu z londyńskimi charakteryzują się mniejszą wytrzymałością i większą odkształcalnością. W przypadku ilów warszawskich kąt tarcia wewnętrznego i moduł ściśliwości są około dwukrotnie mniejsze, a spójność kilka razy mniejsza od ilów londyńskich [Kaczyński 2007].

Wartości modułu sztywności powinny być wyznaczone z badań laboratoryjnych lub polowych w nawiązaniu do rodzaju konstrukcji inżynierskiej. Inne wartości modułu mogą być odpowiednie do zagadnień płytkich posadowień, a inne dla konstrukcji typu ściany szczelinowe lub fundamenty zespolone.

Jak wspomniano wcześniej, szczególnie istotna jest właściwa ocena naprężenia efektywnego w warstwach gruntów spoistych, które często stanowią dno wykopu oraz znaczącą część podłoża obiektu budowlanego. Przy ocenie warunków hydrogeologicznych należy pamiętać, że odwodnienie ma charakter tymczasowy i po jego wyłączeniu po pewnym czasie nastąpi odtworzenie warunków początkowych lub warunków do nich zbliżonych. Po wykonaniu obiektu budowlanego część odprężenia w ośrodku gruntowym będzie skompensowana przez obciążenie ciężarem obiektu.

Do obliczenia wartości modułu ścinania (G_0) należy wykorzystywać badania laboratoryjne lub polowe badania geofizyczne z wykorzystaniem fal powierzchniowych Rayleigha [Barański i in. 2008]. Badania polowe można przeprowadzić na różnych etapach realizacji inwestycji budowlanej. Najważniejszą zaletą tych badań jest to, że prowadzone są one *in situ* przy rzeczywistym stanie naprężeń efektywnych w gruncie.

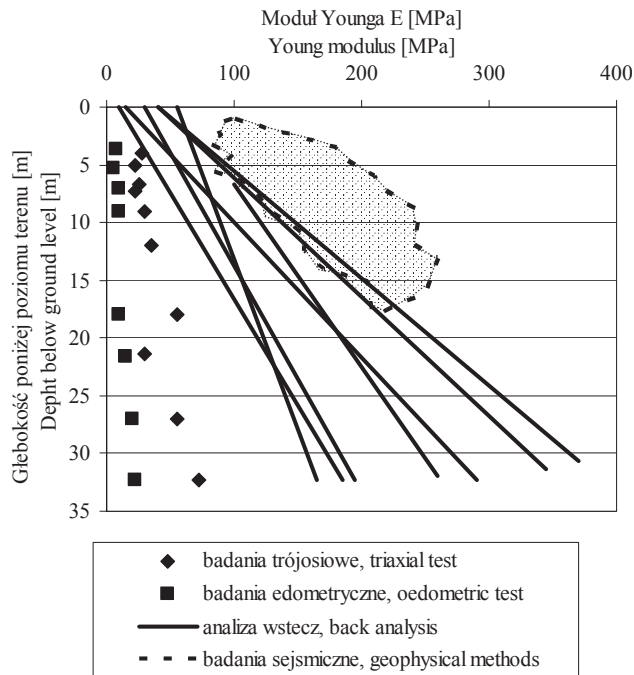
W przypadku obliczeń dotyczących głębokich posadowień należy dysponować zestawem parametrów wyznaczonych dla zakresu małych i średnich odkształceń. Sondowania CPT i DMT wykazują znaczny wzrost parametrów odkształceniowych wraz ze wzrostem głębokości. Ostatnie prace [Robertson 2009, Robertson i Cabal 2010] przedstawiają możliwości modyfikacji badań CPT i ich skutecznej interpretacji. Profesjonalnie przeprowadzone badania polowe tego samego ośrodka, z wykorzystaniem różnych zaawansowanych metod, nie zawsze prowadzą do zgodnych wartości parametrów gruntowych. Skonstruowanie natomiast tzw. wewnętrznej korelacji dla oceny parametrów wytrzymałościowych lub modułu odkształcenia z dwóch testów (np. CPTU i DMT) może przyczynić się do wiarygodnej, globalnej oceny zmienności tych parametrów w podłożu wraz z głębokością. Analiza wstecz przeprowadzona w różnych pracach wykazała, że nawet precyzyjnie przeprowadzona ocena modułów odkształcenia gruntów podłoża w laboratorium może znacznie odbiegać od oceny zależności naprężenie – odkształcenie przeprowadzonej w terenie i wykorzystanej w obliczeniach [Bzówka 2001, Siemińska-Lewandowska 2003, Popielski i Stasiński 2005, Popielski 2008]. Jest to sprawdzone, skuteczne narzędzie pozwalające poprawić dokładność określenia wartości parametrów materiałowych wykorzystanych w obliczeniach. Ograniczeniem metody jest to, że może być wykonana po zrealizowaniu części konstrukcji i monitorowaniu jej przemieszczeń (czasami za późno) oraz że uzyskane w ten sposób parametry mogą być stosowane w podobnych konstrukcjach zlokalizowanych w podłożu o analogicznych cechach.

Dodatkowo, biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z wykorzystanego modelu numerycznego, należy stwierdzić, że precyzyjne określenie warunków drugiego stanu granicznego (użytkowości) jest niezmiernie trudne. Wynik analiz numerycznych zależy od jakości przyjętych parametrów geotechnicznych oraz od adekwatności przyjętego modelu materiału. Adekwatność modelu zależy w dużej mierze od zakresu odkształceń ośrodka gruntowego. Praktyczne aspekty korzystania z modeli konstytutywnych, w zależności od zakresu odkształcenia, można znaleźć w pracy Cudnego [2006].

METODYKA BADAŃ

Decydującym kryterium wyboru modelu obliczeniowego jest dostępność parametrów materiałowych o odpowiedniej jakości, ewentualnie możliwość ich wyznaczenia zarówno w sensie technicznym, jak i ekonomicznym (sfinansowane przez inwestora). Duże znaczenie ma wybór metody wyznaczania parametrów. Wartości modułów odkształcenia wyznaczone metodami geofizycznymi są kilkukrotnie większe od wyznaczonych na bazie tradycyjnych sondowań oraz od przedstawionych w normie PN-81/B-03020. Norma ta służy do liczenia fundamentów płytkich i nie może być stosowana przy głębokich posadowieniach, co niestety zdarzało się w praktyce projektowej.

Na rysunku 2 zostały przedstawione uproszczone profile sztywności gruntu wyznaczone różnymi metodami dla gruntów spoistych w Londynie [Matthews i in. 2000]. Profile wyznaczone za pomocą analizy wstecz lokują się w środku w stosunku do pozostałych. Wartości z analizy wstecz są kilkukrotnie większe od wyznaczonych za pomocą badań edometrycznych i trójosiowych, bez wewnętrznego pomiaru odkształceń. Od góry zaś są ograniczone wartościami wyznaczanymi w badaniach z wykorzystaniem połowych badań sejsmicznych.

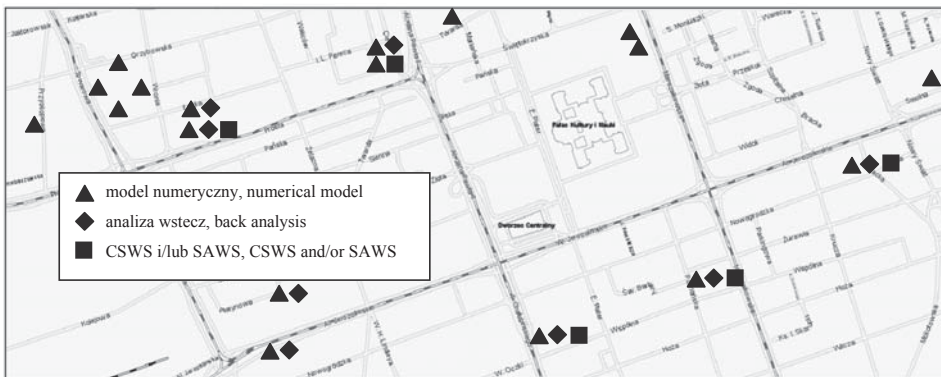


Rys. 2. Porównanie profili sztywności otrzymanych z badań laboratoryjnych, połowych badań sejsmicznych i analizy wstecz [Matthews i in. 2000, zmieniony]

Fig. 2. Comparison of stiffness profiles obtained from laboratory, seismic field geophysics, and back-analysis [Matthews et al. 2000, modified]

Dokładność obliczeń, a tym samym możliwość precyzyjnego określania oddziaływań głębokich posadowień może być poprawiana poprzez:

- wyznaczenie wiarygodnych parametrów geotechnicznych podłoża, uwzględniających stan naprężenia i zakres aktualnych oraz przyszłych odkształceń,
- wykorzystanie lokalnych zależności opracowanych dla badanych gruntów,
- zaawansowane metody pomiarowe, dostosowane do zakresu odkształceń (np. terenowe badania sejsmiczne, ustalenie wartości współczynników korekcyjnych dla wartości modułów ustalonych przy wykorzystywaniu wyników badań sejsmicznych),
- przyjęcie adekwatnego modelu gruntu, w zależności od rodzaju obudowy (kotwiona czy rozpierana) i posadowienia (płyta lub inne rozwiązania),
- wykonanie analizy wstecz przeprowadzonej na podstawie odpowiednio zaprojektowanego monitoringu (weryfikacja modeli numerycznych).
- Wykonanie „analizy wstecz” można utożsamiać z tarowaniem modelu numerycznego. Zestawienie lokalizacji 18 modeli numerycznych wykonanych na potrzeby realizacji głębokich posadowień w centrum Warszawy, na powierzchni około 6 km², przedstawiono na rysunku 3. W zestawieniu uwzględniono 8 modeli, dla których wykonano kalibrację obliczeniowych wartości parametrów materiałowych (analizę wstecz) oraz 5 modeli, dla których zweryfikowano sztywność gruntu w zakresie małych odkształceń za pomocą pomiarów sejsmicznych [Popielski 2012].



Rys. 3. Lokalizacja wykonanych modeli numerycznych i badań polowych gruntu w śródmieściu Warszawy [tło – www.mapa.um.warszawa.pl/mapa; Popielski 2012]

Fig. 3. Location of analyzed numerical models and geophysical field investigation in the center of Warsaw [background – www.mapa.um.warszawa.pl/mapa; Popielski 2012]

WYNIKI BADAŃ

W omówionych przykładach wszystkie parametry materiałowe, ustalone jako wyjściowe lub początkowe, bazowały na normie PN-81/B-03020. W trakcie realizacji obiektów i analizy oddziaływania na otoczenie uzyskiwano niekiedy zgodę inwestora na wykonane badań uzupełniających, lepiej dostosowanych do aktualnego stanu naprężenia i do spodziewanego stanu odkształceń ośrodka. Na podstawie przeprowadzonych analiz i weryfikacji modeli numerycznych autor ustalił przybliżone współczynniki zwiększające

wartości modułów odkształcenia (E), zebrane w tabeli 1 [Popielski 2012]. Ważnym ograniczeniem jest tutaj założenie, że grunty, których parametry są modyfikowane, znajdują się na głębokości większej niż 5 m poniżej poziomu terenu i przy wyznaczaniu modułu „wstępnego” nie uwzględniano zmiany wartości modułu wraz z głębokością. Zmienności takiej nie przewiduje norma PN-81/B-03020, ale w opracowywanych dokumentacjach geotechnicznych można znaleźć odpowiednie wskazówki lub sugestie – zdaniem autora całkowicie słuszne. Zjawisko takie występuje w gruntach podłoża powszechnie i jest potwierdzone innymi badaniami opisanymi w rozdziale 5. Dno wykopu w analizowanych przypadkach znajdowało się zazwyczaj na głębokości 10–20 m p.p.t. Parametry podłoża zalegające poniżej 5 m p.p.t są modyfikowane tak jak grunty w pierwszej warstwie pod dnem wykopu.

Tabela 1. Wartości modułów odkształcenia E [MPa] i współczynników zwiększających [Popielski 2012]

Table 1. Values of Young's moduli E [MPa] and amplifications factors [Popielski 2012]

Rodzaj gruntu Type of soil	I_D	E [MPa] według PN-81/ /B-03020	Współczynnik n – Factor n		
			< 5 m*	5–15 m *	> 15 m *
Żwir, pospółka Gravel, sand-gravel mix	$\approx 0,8$ $\approx 0,5$	200 140	1,0	1,5	2,0
Piaski grube i średnie Coarse and medium sands	$\approx 0,8$ $\approx 0,5$	130 80	1,5	2,0	3,0
Piaski drobne i pylaste Fine and dusty sands	$\approx 0,8$ $\approx 0,5$	75 50	2,0	3,0	4,0–5,0
	I_L				
Gliny zwałowe szare Boulder clay gray	≈ 0	A 70	3,0–5,0	5,0–6,0	**
Iły plioceńskie Clay	≈ 0	D 26	**	4,0–8,0	8,0–16,0 (max 22)

*Poniżej dna wykopu – Below the bottom of the excavation.

**Autor nie przeprowadzał weryfikacji modeli numerycznych GPOB, w których dane grunty znajdują się na tak określonych głębokościach – Author did not carry out the verification of numerical models in which the soils are located as specified depths.

Modyfikacji podlegają parametry gruntów w całym obszarze modelu, a nie tylko wewnątrz wykopu. Zdaniem autora wartości współczynników w tabeli 1 prezentują doświadczenie porównywalne [PN-EN 1997-1:2008] i dobrze aproksymują profile sztywności uzyskane z badań laboratoryjnych, polowych badań sejsmicznych i analizy wstecz (rys. 2). Wartości obliczeniowe modułów odkształcenia do obliczeń numerycznych głębokich posadowień z wykorzystaniem analizy przekroji płaskich (2D), bazującej na warunku plastyczności Coulomba-Mohra, można wyznaczać z zależności:

$$E_{OBL} = n E_{03020} \quad (4)$$

gdzie: E_{OBL} – obliczeniowa wartość modułu E wykorzystana w obliczeniach numerycznych,

E_{03020} – wartości modułu E na podstawie normy PN-81/B-03020,

n – współczynnik zwiększający z tabeli 1.

Ze względu na powszechność wykorzystania normy PN-81/B-03020 pokazanie różnic w wartościach parametrów wydaje się uzasadnione.

PODSUMOWANIE

Prezentowane w tabeli 1 współczynniki zostały wyznaczone na drodze obliczeń metodą elementów skończonych, w płaskim stanie odkształcenia, z wykorzystaniem sprężysto-plastycznego modelu gruntu, z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. W zasadniczy sposób określa to zakres ich ewentualnego, przyszłego zastosowania.

Wartości współczynników określają poziom błędów, jaki może powstać przy wykorzystaniu parametrów wyznaczonych na podstawie normy PN-81/B-03020 w obliczeniach przy realizacji głębokich posadowień.

PISMIENNICTWO

- Atkinson J.H., 2000. Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique* 50, 5, 487–508.
- Barański M., 2004. Ocena zachowania się ilów pliczeńskich ze Stegien w warunkach naprężeń efektywnych. Grant KBN nr 5 T12 B 04 122. UW, Warszawa.
- Barański M., Dąbska A., Popielski P., Szczepański T., 2008. Numerical model verification on the basis of the measurements and investigation carried out during the objects realization. International Geotechnical Conference: Development of Urban Areas and Geotechnical Engineering, 16–19 June 2008, St. Petersburg.
- Bzówka J., 2001. Obliczeniowy model pala wykonanego techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Gliwice.
- Cudny M., 2006. Praktyczne aspekty modeli konstytutywnych gruntów drobnoziarnistych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 3, 155–168.
- Hardin B.O., 1978. The nature of stress – strain behaviour for soils. State of the art report. Proc. Spec. Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, California, US, 3–90.
- Kaczyński R., 2007. Geologiczno-inżynierskie zachowanie się ilów londyńskich i warszawskich. III Sympozjum WPGIWP, Puszczykowo 2007, *Geologis* 11, 481–489.
- Kłosiński B., 2010. Wytyczne stosowania ścian szczelinowych. Materiały Seminarium „Ściany szczelinowe”. IBDiM, Warszawa.
- Matthews M.C., Clayton C.R.I., Own Y., 2000. The use of geophysical techniques to determine geotechnical stiffness parameters. *Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Engng.* 143, 31–42.
- Menzies B., 2000. Near-surface site characterisation by ground stiffness profiling using surface wave geophysics. In: H.C. Verma Commemorative Volume, Indian Geotechnical Society, New Delhi.
- PN-75/B-04481 Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Popielski P., 2008. Wykorzystanie analizy wstecz do weryfikacji modeli numerycznych opisujących oddziaływanie głębokich posadowień na obiekty sąsiednie. PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Problemy naukowo-badawcze budownictwa. T. VI. Badawczo-projektowe zagadnienia w budownictwie. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok.

- Popielski P., 2012. Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Środowisko 61, OWPW, Warszawa.*
- Popielski P., Stasiński J., 2005. Zastosowanie pakietu HYDRO-GEO w geotechnice i hydrotechnice, dokładność obliczeń numerycznych, analiza wstecz. *XX Ogólnopolska Konferencja WPPK, Wisła – Ustroń.*
- Robertson P.K., 2009. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal 46, 1337–1355.*
- Robertson P.K., Cabal K.L., 2010. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering.* Gregg Drilling & Testing, Sing Hill, California.
- Shibuya S., 1992. Elastic deformation properties of geomaterials. *Soil and Foundations Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering 32, 3, 23–46.*
- Siemińska-Lewandowska A., 2003. Projektowanie ścian głębokich wykopów na podstawie wyników badań kotew gruntowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo, 97.* Gliwice
- Wiłun Z. 1976. *Zarys geotechniki.* Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

VERIFICATION OF PARAMETERS OF SUBSOIL BASED ON BACK ANALYSIS MADE DURING DEEP FOUNDATIONS IN WARSAW

Abstract. In the paper the discussion of problems and doubts when analyzing deep foundations, mainly whilst determining soil parameters. Problems and doubts regarding geotechnical calculations, their source as well as methods and solutions to improve compatibility of calculated and measured displacements of buildings are also described. In this part the author examines the possibilities of implementation and the accuracy of the principles of geotechnical parameters modification for soil layers deposited at depths. This has been done on the basis of local relationships taking into account changes in soil stiffness for very small strains. The author discusses cases of such benchmarks utilization and their application benefits as well as presents modifications to parameters defined based on Polish standard PN-81/B-03020 in numerical simulations of deep foundations.

Key words: deep foundations, soil parameters, numerical models, back analysis

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013