CZASOPISMO TECHNICZNE Ś
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
z. 1-Ś/2007
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6336

MAREK BARAŃSKI*, PAWEŁ POPIELSKI**, TOMASZ SZCZEPAŃSKI*,
MARIUSZ WRONA***

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WERYFIKACJI MODELU NUMERYCZNEGO NA PODSTAWIE POMIARÓW I BADAŃ WYKONANYCH W TRAKCIE REALIZACJI OBIEKTU

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF THE NUMERICAL MODEL VERIFICATION ON THE BASIS OF THE MEASUREMENTS AND INVESTIGATION CARRIED OUT DURING A STRUCTURE REALIZATION

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki numerycznej analizy rozwiązań konstrukcyjnych posadowienia budynku X. Obliczenia przeprowadzono, wykorzystując parametry materiałowe zweryfikowane za pomocą analizy wstecz opartej na wynikach obserwacji dotychczasowych osiadań budowli oraz nowoczesnych badań gruntu. Przedstawiono metodykę zastosowanej analizy oraz wyniki weryfikacji parametrów

Słowa kluczowe: *modele numeryczne, analiza wstecz, nowoczesne badania gruntu*

Abstract

This paper presents the results of numerical analysis of the constructional solutions of building X foundations. The calculations were performed using material parameters verified by "back analysis" depending on the observations of the construction's movements and recent soil investigation. The paper shows the methods used in the analysis and the results of parameters veryfication.

Keywords: *numerical analysis, back analysis, recent soil investigation*

* Dr Marek Barański, dr Tomasz Szczepański, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Zakład Geologii Inżynierskiej, Uniwersytet Warszawski.
** Dr inż. Paweł Popielski, Instut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska.
*** Mgr inż. Mariusz Wrona, PRO-INVEST Pracownia Obsługi Inwestorów.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Analiza głębokich posadowień wraz z otaczającym je gruntem jest zadaniem uwarunkowanym przez wiele czynników. Do współpracy z fundamentem budowli włączone jest podłoże gruntowe na dużej głębokości (najczęściej znacznie przekraczającej głębokość rozpoznania geologicznego). Doświadczenia wskazują, że od warstw położonych głębiej można oczekiwać wyższych wartości parametrów (przede wszystkim sztywności), głównie na skutek większego wpływu prekonsolidacji i wartości naprężeń efektywnych.

Wiarygodność wyników obliczeń numerycznych uzależniona jest od dokładności rozpoznania geologicznego i poprawności wyznaczenia wartości parametrów materiałowych.

Powszechnie wiadomo, że sztywność ośrodka jest parametrem zmiennym, zależnym od jego odkształceń. Charakterystyka sztywności gruntu jest omówiona np. w pracach [5, 10].

Zazwyczaj przy braku odpowiedniej liczby parametrów do zastosowania zaawansowanych modeli gruntów (co jest, niestety, powszechne przy obliczeniach dotyczących rzeczywistych obiektów) projektant decyduje się na obliczenia bazujące na warunku Coulomba–Mohra lub Druckera–Pragera (gdzie E = const).

Znając obciążenie działające na obiekt w wybranym etapie budowy i dysponując pomierzonymi wartościami przemieszczeń, można – wykonując analizę wstecz – oszacować parametry materiałów znajdujących się poniżej poziomu posadowienia.

Obserwacje osiadań budynków wysokich wskazują, że rzeczywiste osiadania są dużo mniejsze od wyliczonych z zastosowaniem tradycyjnie wyznaczanych modułów sprężystości (np. na podstawie normy PN-81/B-03020). Wykonując analizę wstecz, zgodność wyliczonych i pomierzonych osiadań otrzymuje się przy wartości modułów sprężystości kilkakrotnie zwiększonych dla materiałów zalegających głęboko poniżej poziomu posadowienia. Analiza wstecz nie jest, oczywiście, idealną metodą doboru parametrów materiałowych w obszarach trudno dostępnych dla pomiarów bezpośrednich. Z jej stosowaniem wiąże się zawsze pewien stopień niepewności, tym wyższy, im bardziej skomplikowana jest budowa geologiczna podłoża, pomimo, że analiza taka prowadzona jest w oparciu o racjonalne przesłanki – np. sztywność podłoża modyfikowana jest proporcjonalnie do ciśnienia prekonsolidacji.

W obliczeniach inżynierskich stosuje się zwiększenie wartości parametrów dla warstw gruntu zalegającego głęboko poniżej poziomu posadowienia. Najczęściej realizuje się to przez uproszczone wydzielenie dodatkowych, poziomych warstw materiałów. W pracy [7] prezentowane są wstępne wyniki zmiany omawianego podejścia do wyznaczania stref materiałowych o zmodyfikowanych wartościach parametrów. Omawiana metoda zmian wartości parametrów ośrodka oparta jest na uzyskanym w obliczeniach rozkładzie odkształceń ośrodka dla parametrów początkowych (bez modyfikacji). Następnie granice poszczególnych „obszarów wzmocnienia" wyznaczane są iteracyjnie dla zmieniających się wartości parametrów odkształceń ośrodka gruntowego oraz jego odkształceń.

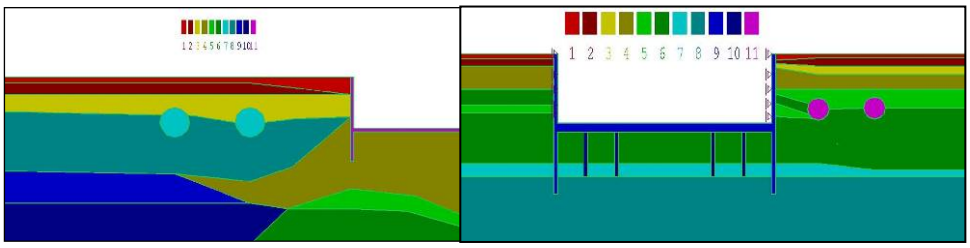
Model obiektu powinien odzwierciedlać kolejne fazy wznoszenia budowli i związane z nimi zmiany obciążeń. Rzeczywiste, zaobserwowane zachowanie się budowli (np. przemieszczenia, odkształcenia, przebieg filtracji) porównywane są z danymi uzyskanymi z modelu. Istotna niezgodność wyników obserwacji (monitoringu) z wynikami obliczeń na modelu świadczy o tym, że model jest nieadekwatny do rzeczywistości. W kolejnych przybliżeniach, zmieniając właściwości materiałowe modelu, a niekiedy i sposób jego obciążania, dochodzi się do zgodności modelu z realiami, co pozwala w sposób bardziej wia-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

rygodny niż w projekcie prognozować przyszłe zachowanie się budowli. Tak przeprowadzone obliczenia pozwolą na wyznaczenie uśrednionych wartości parametrów podłoża lub innych elementów modelu.

Doświadczenia z analizy osiadań różnych obiektów wskazują, że wyznaczone za pomocą analizy wstecz moduły sprężystości obarczone są małym błędem, co daje możliwość dokładniejszej prognozy przemieszczeń. Przeprowadzenie analizy wstecz można utożsamiać z tarowaniem modelu numerycznego. Dopiero odpowiednio zweryfikowany model numeryczny może mieć zastosowanie w praktycznych zagadnieniach inżynierskich.

Przykładem możliwości analizy oddziaływania projektowanej konstrukcji na obiekty podziemne jest przypadek posadowienia budynku w bezpośrednim sąsiedztwie tuneli szlakowych metra. Na ryc. 1 zaprezentowano przykładowe modele w formie schematu stref materiałowych. Warunki brzegowe przyłożone do ścian szczelinowych wynikają z liczby stropów wykonywanych w trakcie modelowanej „podstropowej" realizacji obiektu.



Ryc. 1. Schemat stref materiałowych do analizy głębokiego posadowienia w rejonie obiektów podziemnych

Fig. 1. Diagram of the material zones for the analysis of the deep foundation in the area of underground objects

Podstawę warsztatu naukowego wszystkich omawianych przykładów stanowi metoda elementów skończonych (MES), pozwalająca na rozwiązanie zadanego zagadnienia początkowo-brzegowego [11]. Do tego celu zostało wykorzystane oprogramowanie zawarte w pakiecie HYDRO-GEO [3].

Analizując przykład omówiony w pracy [6], można stwierdzić, że w zależności od odkształceń ośrodka jego sztywność może zmieniać się kilkukrotnie. W przypadku modelu numerycznego stacji metra A17 parametry początkowe gruntów przyjęto w oparciu o dokumentację geologiczno-inżynierską oraz opracowanie „Analiza osiadań konstrukcji metra dworzec Gdański" [4]. W kolejnych krokach, metodą prób i błędów zmieniano wartości modułu sprężystości wybranych warstw gruntów aż do uzyskania w obliczeniach przemieszczeń, zgodnych z uzyskanymi w pomiarach *in situ*. Przeprowadzono w ten sposób tarowanie modelu numerycznego. Zwiększając wartość modułów sprężystości w kolejnych przybliżeniach, opierano się na założeniach teorii dotyczącej sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń, dla których wartości modułów sprężystych są większe niż dla zakresu dużych odkształceń np. [10]. Otrzymane wyniki zestawiono w tabl. 1. Zmiana sztywności dotyczyła tylko materiałów znajdujących się w strefie małych odkształceń, tj. poniżej 1 E-04. W tabl. 1, w kolumnie „Opinia geotechniczna" prezentowane są wartości wykazane w wykonanym rozpoznaniu geologicznym, w kolumnie „Metoda porównawcza" zawarte są wartości wykorzystane przez autorów opracowania [4] uzyskane na podstawie doświad-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

czenia przy realizacji podobnych obiektów. W kolumnie trzeciej pomieszczono wartości otrzymane za pomocą analizy wstecz [2]. Trzeba od razu zaznaczyć, że wartości uzyskane za pomocą analizy wstecz nie uwzględniają osiadania na skutek konsolidacji podłoża, a także wynikających z pełzania gruntu odkształceń reologicznych.

Tablica 1

Wybrane parametry materiałowe [2]

Nr	Nazwa materiału	Moduły sprężystości E [kPa]		
		Opinia geotechniczna	Metoda porównawcza	Analiza wstecz
1	Nasyp	40 000	40 000	40 000
2	Piaski drobne i pylaste nad wodą	60 000	60 000	60 000
3	Piaski drobne i pylaste pod wodą	60 000	60 000	60 000
4	Pyły + Pd i Pp	53 000	100 000	179 000
5	Gliny	30 000	60 000	107 000
6	Gliny piaszczyste	47 000	80 000	143 000
7	Iły plioceńskie	26 000	150 000	210 000

W analizie wstecz należy wykorzystywać wyniki przemieszczeń dla jednoznacznie określonych obciążeń, np. wykonania płyty fundamentowej obiektu. Jest to możliwe, jeżeli na dnie wykopu fundamentowego przed wykonaniem płyty dennej (na warstwach chudego betonu i izolacji) zostaną zainstalowane odpowiednie repery [6]. Gdy są znane pomiary przemieszczeń po wykonaniu płyty fundamentowej, w celu zapewnienia maksymalnej wiarygodności należy dokonać weryfikacji parametrów materiałowych przyjętych do obliczeń. W przypadku opracowania projektu monitoringu w rejonie wykonywanej inwestycji celowe jest uwzględnienie reperów do pomiarów przemieszczeń podłoża pod wpływem wykonania płyty fundamentowej.

2. Warianty posadowienia obiektu

W omawianym przykładzie obliczeniowym analizowany jest wpływ wykonywanej inwestycji, na przemieszczenia istniejącego, znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie budynku. Analiza uwzględnia współpracę płyty dolnej i ścian szczelinowych pełniących role ścian fundamentowych. Budynek biurowy był projektowany jako obiekt 12-kondygnacyjny. Dodatkowo posiada 3 kondygnacje podziemne (głębokość posadowienia 10,2 m p.p.t.). Grubość płyty dolnej wynosi 1 m. Grubość ścian szczelinowych wynosi 80 cm. W sąsiedztwie znajduje się 10-kondygnacyjny inny budynek biurowy, którego poziom posadowienia znajduje się ok. 5 m p.p.t.

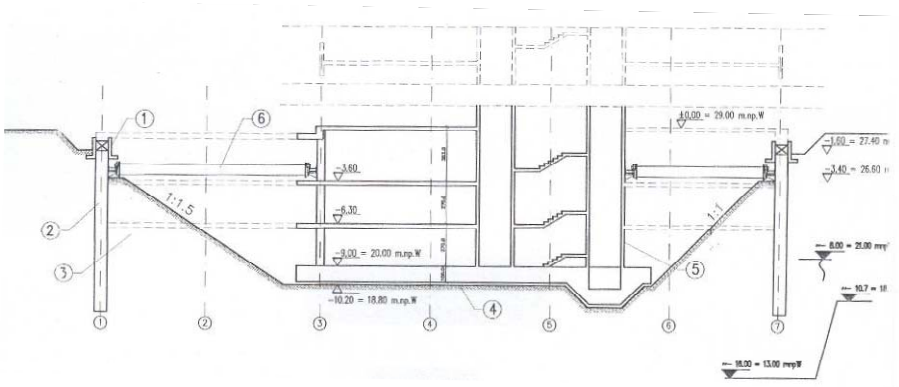
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W trakcie symulacji numerycznej analizowano kilka wariantów posadowienia [8, 9]:

Wariant 1 – podparcie za pomocą skarp ziemnych do momentu wybudowania trzonu i wykorzystanie go jako podparcia do rozpór zabezpieczających ściany szczelinowe w trakcie głębienia wykopu bezpośrednio w ich sąsiedztwie (ryc. 2).

Wariant 2 – zastosowanie metody podstropowej, podparcie stropami prawie na całym obwodzie ścian szczelinowych.

Wariant 3 – zastosowanie kotwionych ścian szczelinowych.



Ryc. 2. Schemat rozparcia ścian szczelinowych [15]

Fig. 2. Diagram of the hollow slurry walls [15]

Ostatecznie zastosowano podparcie ściany szczelinowej od strony najbliższego budynku za pomocą metody podstropowej w celu ograniczenia spodziewanych przemieszczeń ściany. W celu poprawienia możliwości transportu z i do wnętrza wykopu na całej długości przeciwległej ściany szczelinowej zastosowano kotwienie. Przykład potwierdzający zalety takiego rozwiązania transportu urobku w trakcie głębienia wykopu bezpośrednio przy ścinane szczelinowej przedstawiony jest na ryc. 3.



Ryc. 3. Wykonywanie wykopu

Fig. 3. Excavation execution

Podstawowym problemem w takcie przeprowadzonych analiz było ustalenie parametrów materiałowych podłoża. Parametry materiałowe wyznaczono w trakcie rozpoznania geologicznego w trzech opracowaniach [12–14] w latach 1997, 1999, 2001. We wszystkich bazowano na normie PN-81/B-03020. Wybrane parametry materiałowe ustalone na podstawie opracowań zaprezentowano w tabl. 2 Numery materiałów odpowiadają numeracji

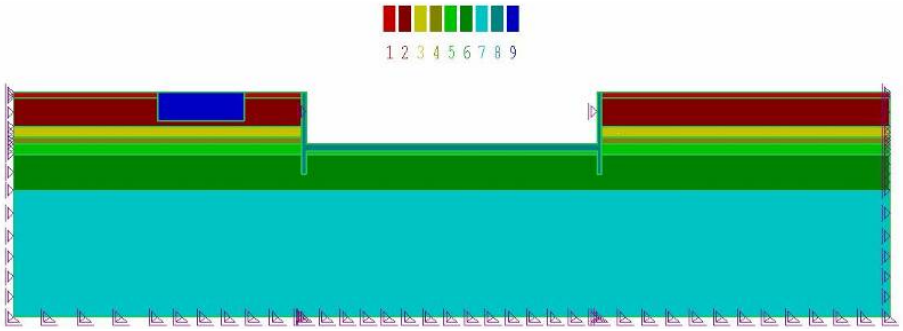
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

prezentowanej na ryc. 4. Paramenty materiału nr 6 w zależności od opracowania różniły się pięciokrotnie.

Tablica 2

Wybrane wartości parametrów materiałowych

Lp.	Nazwa gruntu	*E* [kPa]
1	nasyp niekontrolowany	35 000
2	piaski gliniaste, gliny piaszczyste	35 000
3	gliny piaszczyste, nad wodą	31 000
4	gliny piaszczyste, pod wodą	31 000
5	piaski średnie, piaski grube pod wodą	92 800
6	gliny piaszczyste, pod wodą	74 000 (15 000)
7	piaski średnie, piaski grube pod wodą	140 000



Ryc. 4. Schemat stref materiałowych

Fig. 4. Diagram of the material zones

Wykorzystując wyniki analizy wstecz dla obliczeń osiadań innych budynków wysokich w Warszawie posadowionych na ścianach szczelinowych współpracujących z płytą dolną oraz wyniki pomiarów osiadań z monitoringu wykonywanych wcześniej obiektów, zmodyfikowano na potrzeby obliczeń wartości sztywności gruntów zalegających głęboko. Parametry modyfikowano w strefie gruntu, w której występowały tzw. małe odkształcenia.

We wnioskach każdej z przeprowadzonych analiz [8, 9] zaznaczano, że wartości osiadań mają charakter szacunkowy ze względu na technikę wyznaczania modułów podłoża. Postulowano prowadzenie pomiarów geodezyjnych przemieszczeń, zainstalowanie reperów na ścianach szczelinowych, płycie fundamentowej i pierwszych wykonywanych stropach. W ścianach szczelinowych proponowano zainstalowane inklinometrów i prowadzenie pomiarów przemieszczeń poziomych. Dodatkowo zalecono zainstalowanie ok. 20 reperów wokół budynku i włączenie ich do cyklu pomiarowego oraz bezpośrednio przed wykonaniem płyty fundamentowej 8 reperów pozwalających na pomierzenie osiadań pod wpływem wykonania płyty dolnej. Punkty pomiarowe powinny być dostępne przez cały okres prowadzenia prac.

Parametry materiałów znajdujących się bezpośrednio pod dnem wykopu mają największe znaczenia przy obliczeniach osiadań. W analizach sugerowano wykonanie sondowań CPT lub badań geofizycznych w celu wyznaczenia wartości parametrów materiałowych zalegających poniżej płyty fundamentowej do głębokości 15 m.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

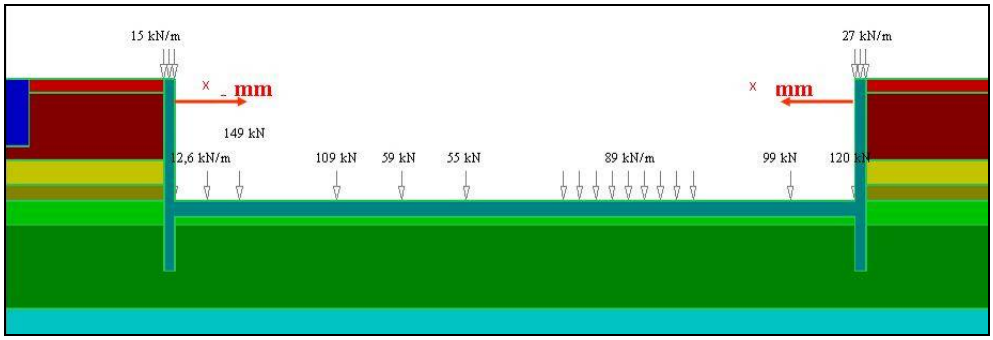
Ze względu na technikę wyznaczania modułów sprężystości podłoża gruntowego na etapie rozpoznania geologicznego zaplanowano powtórzyć obliczenia, gdy znane będą pomiary przemieszczeń po wykonaniu płyty dolnej lub po wykonaniu nowoczesnych badań gruntu. W dodatkowych obliczeniach planowano wykonanie analizy wstecz na podstawie monitoringu w pierwszych etapach budowy lub wykorzystanie nowych parametrów ustalonych na podstawie badań gruntu dostosowanych do zakresu odkształceń, które będą występowały w podłożu.

3. Wykonany monitoring obiektu

W trakcie wykonywania inwestycji w rejonie omawianego w artykule obiektu zastosowano bardzo szeroki zakres monitoringu. Wykonano:

- repery do pomiarów przemieszczeń podłoża pod wpływem wykonania płyty fundamentowej – 6 sztuk,
- inklinometry w ścianach szczelinowych – 6 sztuk,
- monitoring przemieszczeń poziomych ścian szczelinowych – 10 punktów,
- repery kontrolne na płycie – 12 sztuk,
- monitoring przemieszczeń pionowych budynków sąsiadujących z budową – 15 reperów kontrolnych i 4 repery odniesienia,
- monitoring przemieszczeń poziomych budynków sąsiadujących z budową – 12 punktów (celowników),
- piezometry głębokie – 3 sztuki,
- piezometry płytkie – 2 sztuki.

Uwzględnienie uzyskanych w pierwszym etapie budowy wyników pomiarów, podczas przeprowadzenia analizy wstecz, pozwoliło na skuteczne wytarowanie modelu numerycznego. Na ryc. 5 przedstawiano schemat modelu wykorzystanego do określenia przemieszczeń w rejonie inwestycji przy stanie „0” budynku. W obliczeniach dotyczących wszystkich etapów budowy otrzymano wyniki zgodne z pomiarami przemieszczeń.



Ryc. 5. Schemat modelu wykorzystanego do określenia przemieszczeń w rejonie inwestycji przy stanie „0”.

Fig. 5. Diagram of the model used for the displacement determination in the area of investment in the "0" state

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4. Dodatkowe sondowania

Wykonano badania geofizyczne, sondowania statyczne CPT oraz badania dylatometrem Marchettiego [16]. Wyniki badań wykorzystano w celu potwierdzenia wartości parametrów przyjętych podczas analizy w strefie małych odkształceń. Na ryc. 6 prezentowana jest lokalizacja poszczególnych stanowisk badawczych. Jako dodatkową weryfikację zmodyfikowanych parametrów wykorzystano wyniki przeprowadzanych nowoczesnych badań polowych gruntu



Ryc. 6. Lokalizacja poszczególnych badań

Fig. 6. Location of the investigation points

5. Geofizyczne badania polowe parametrów sprężystych gruntu

Geofizyczne metody sejsmiczne, znajdujące zastosowanie w geologii od początku XX w., zostały omówione w pracy [1].

Inwestycje na obszarach zurbanizowanych są często lokalizowane na terenach rozbiórkowych, gdzie łatwo może nastąpić uszkodzenie urządzenia penetrującego. Sejsmiczne sondowania statyczne SCPT wymagają wprowadzenia w grunt stożka wyposażonego w jeden lub dwa geofony, który z uwagi na cenę i wrażliwość na uszkodzenia nie jest w Polsce powszechnie wykorzystywany. Dodatkowym ograniczeniem bywają wymiary urządzenia.

Coraz większego znaczenia praktycznego nabierają metody sejsmiki powierzchniowej wykorzystujące fale Rayleigha omówione w pracy [1]. Ich wysoki potencjał, jako dodatkowego źródła danych wynika z nieinwazyjnego (przez co taniego i szybkiego) działania. Możliwe jest też uzupełnienie danymi interesującego obszaru pomiędzy punktami badawczymi (wierceniami, sondowaniami), weryfikujące zmienność parametrów sprężystych ośrodka gruntowego między nimi.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wynikami badań są profile sztywności gruntu, tj. rozkład zmienności modułu ścinania G_{max} lub modułu Younga E_{max} wraz z głębokością. Zaletą badań jest możliwość ich wykonania na każdym etapie inwestycji budowlanej, również w głębokich wykopach. Wyniki badań z wymienionej metody znajdują zastosowanie np. w: obliczaniu osiadań, kontroli zagęszczania lub konsolidacji podłoża gruntowego czy też modelowaniu współpracy budowli z podłożem za pomocą oprogramowania wykorzystującego MES.

Badania wykonano aparaturą, której właścicielem jest Zakład Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego. Aparatura została skonstruowana i wyprodukowana przez znaną brytyjską firmę GDS Instruments Ltd. W badaniach wykorzystywane są dwie metody: **SASW** (*Spectral Analysys of Surface Waves*) i **CSWS** (*Continuous Sufrace Wave System*).

W systemie SASW fale wzbudza się przez uderzenie młotkiem bądź innym przedmiotem (w zależności od pożądanego zakresu częstotliwości). Generowane jest szerokie spektrum częstotliwości. Fala rozchodzi się promieniście od źródła (podobnie jak fala na powierzchni wody) i dociera do geofonów (od 2 do 6) rozstawionych w linii prostej od źródła, w znanych odległościach. Komputer, używając FFT (*Fast Fourier Transform*), analizuje sygnały elektryczne wzbudzone na geofonach, aby znaleźć przesunięcie fazowe fali na każdym z nich.

System CSWS różni się od SASW obecnością sterowanego komputerem wibratora o masie inercyjnej 63 kg. Dzięki niemu możliwe jest ciągłe generowanie fali o dowolnej częstotliwości w zakresie 6–600 Hz. Pozwala to dużo dokładniej kontrolować warunki badania, które są związane z tym, że im niższa częstotliwość fali powierzchniowej tym większa strefa sprężystych odkształceń gruntu. Zmieniając zatem zakres częstotliwości generowanych fal powierzchniowych, uzyskujemy różną głębokość badania.

Poniżej przedstawiono dokumentację fotograficzną wykonanych pomiarów metodą sejsmiki powierzchniowej z rejonu analizowanego posadowienia budynku. Wykonano 3 serie pomiarów geofizycznych na różnych poziomach głębienia wykopu fundamentowego. W trakcie pomiarów była wykorzystywana zarówno metoda **SASW** (*Spectral Analysys of Surface Waves*) i **CSWS** (*Continuous Sufrace Wave System*). Na ryc. 7 i 8 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego przy badaniach na poziomie terenu.



Ryc. 7. Widok stanowiska pomiarowego przy badaniach na poziomie terenu

Fig. 7. The view of the measuring position for the investigation at ground level

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 8. Widok stanowiska pomiarowego przy badaniach na poziomie terenu

Fig. 8. The view of the measuring position for the investigation at ground level

Na ryc. 9 i 10 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego przy badaniach na poziomie dna płyty fundamentowej.



Ryc. 9. Widok stanowiska pomiarowego na tle wykopu fundamentowego

Fig. 9. The view of the measuring position against the foundation cut

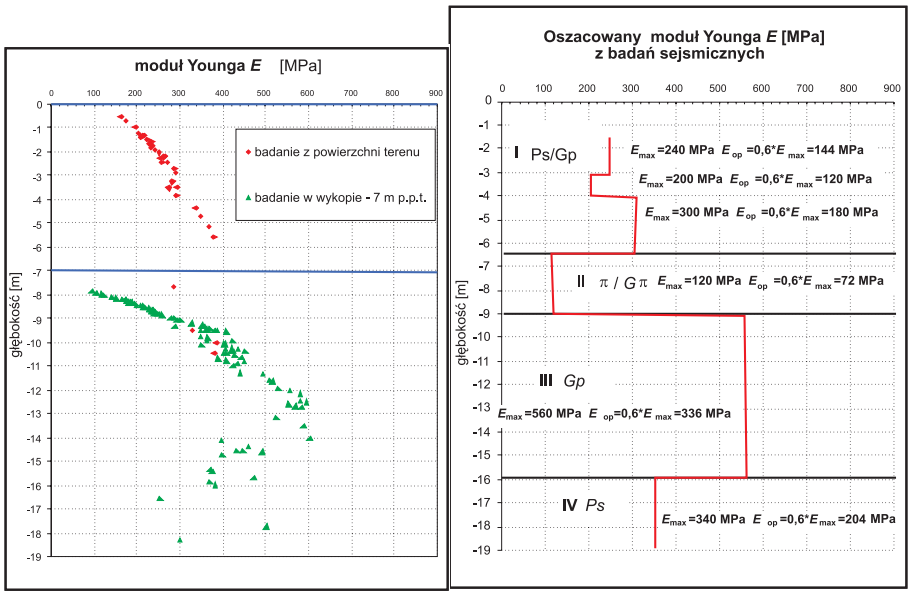
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Ryc. 10. Widok stanowiska pomiarowego przy badaniach na poziomie dna płyty fundamentowej

Fig. 10. The view of the measuring position for the investigation at the bottom of the foundation plate

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań metodami sejsmiki powierzchniowej z rejonu analizowanego posadowienia budynku. Wyniki badań potwierdziły rząd wielkości parametrów oszacowanych za pomocą analizy wstecz.



Ryc. 11. Wyniki badań metodami sejsmiki powierzchniowej z rejonu analizowanego posadowienia budynku

Fig. 11. The results of the investigation carried out with the superficial seismic methods in the area of the analyzed structure's foundation

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6. Podziękowania

Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego Ministerstwa Edukacji i Nauki Nr 4 T07E 020 29 pt. „Wpływ realizacji głębokich posadowień na zabudowę sąsiednią w ujęciu metody elementów skończonych".

Specjalne podziękowania należą się kierownictwu Zakładu Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego za umożliwienie wykorzystania urządzeń metody sejsmiki powierzchniowej do przeprowadzenia badań polowych gruntu.

Równocześnie autorzy pragną zaznaczyć, że zgodnie z życzeniem przedstawiciela Inwestora nie prezentowano w artykule ilościowych wyników monitoringu. Porównanie wyników monitoringu, obliczeń i przeprowadzonej analizy wstecz oraz wnioski z zastosowanych rozwiązań będą stanowiły temat oddzielnej publikacji.

7. Wnioski

- Wiarygodność wyników obliczeń numerycznych uzależniona jest od dokładności rozpoznania geologicznego i poprawności wyznaczania parametrów materiałowych.
- W większości przypadków parametry materiałowe wyznaczane są metodami uproszczonymi, opracowanymi specjalnie dla gruntów zalegających na małych głębokościach, co skutkuje zaniżeniem ich wartości. Konsekwencje tego faktu znajdują zresztą odzwierciedlenie w normowej metodzie szacowania osiadań fundamentów bezpośrednich.
- Często parametry materiałowe wyznaczane są metodami uproszczonymi – szczególnie na wstępnym etapie projektowania lub na obszarach obiektów przeznaczonych do wyburzenia, gdzie bezpośrednie badania z zastosowaniem presjometru lub sondy SCPT nie są możliwe.
- Parametry wyznaczone na podstawie analizy wstecz mogą być nawet kilkakrotnie wyższe w stosunku do przyjętych na podstawie standardowych badań i norm.
- Przy praktycznych zagadnieniach posadowienia budowli należy zweryfikować wyniki obliczeń na podstawie wartości pomierzonych przemieszczeń.
- Analiza wstecz wykonana na podstawie istniejącego monitoringu przemieszczeń pozwala na weryfikację parametrów gruntowych przyjętych do obliczeń.
- Zmodyfikowanie wartości parametrów materiałowych pozwala na weryfikację wyników symulacji numerycznych.
- Dodatkowo do weryfikacji parametrów materiałowych należy zastosować nowoczesne metody pomiarowe, np. mikrosejsmikę lub inne metody geofizyczne.
- Analiza wstecz oraz badania wykonane w trakcie realizacji obiektu pozwalają na skuteczną weryfikację modelu numerycznego przyjętego do obliczeń.
- Do współpracy z posadowieniem włączone jest podłoże gruntowe na znacznej głębokości (najczęściej zdecydowanie przekraczającej głębokość rozpoznania geologicznego). Doświadczenia wskazują, że od warstw położonych głębiej można oczekiwać wyższych wartości parametrów (przede wszystkim sztywności), głównie na skutek większego wpływu prekonsolidacji.
- Realizacja głębokiego posadowienia jest procesem złożonym i wymaga współdziałania specjalistów wielu dziedzin inżynierii budowlanej.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

– Celowym wydaje się stworzenie banku danych dotyczących zrealizowanych projektów zawierających parametry materiałowe z dokumentacji geologicznej oraz parametry zweryfikowane metodą analizy wstecz na podstawie wyników monitoringu.

Literatura

[1] Barański M., Szczepański T., *Zastosowanie metod sejsmiki powierzchniowej do oceny sztywności gruntu*, XIX Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych", Korbielów 2007.

[2] Chmielewski A., Dąbrowski H., Popielski P., Stankiewicz G., Zalewski P., *Modele numeryczne konstrukcji posadowienia stacji metra A17 „Dworzec Gdański"*, Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Metody numeryczne do projektowania i analizy konstrukcji hydrotechnicznych", Korbielów 2004.

[3] Dłużewski J., *HYDRO-GEO: program elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997.

[4] Dłużewski J.M., Grabowski Z., Siemińska-Lewandowska A., *Analiza osiadań konstrukcji metra dworzec Gdański*, [w:] Dłużewski J., *Geotechnika*, Warszawa 2001.

[5] Georgiannou V.N., Rampello S., Silvestri F., *Static and Dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays*, Proc. 10th Firence, Vol. 1, 1991, 91-95.

[6] Popielski P., Stasierski J., *Zastosowanie pakietu HYDRO-GEO w geotechnice i hydrotechnice, dokładności obliczeń numerycznych, analiza wstecz*, XX Ogólnopolska Konferencja nt. „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji", Wisła–Ustroń marzec 2005.

[7] Popielski P., Stasierski J., *Wstępne wyniki zastosowania algorytmu uwzględniającego odkształcalność gruntów w zakresie małych odkształceń przy obliczeniach z wykorzystaniem warunku Coulomba–Mohra*, XVIII Konferencja Naukowa nt. „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych", Korbielów 2006.

[8] Popielski P., *Model numeryczny do analizy przemieszczeń podłoża spowodowanych budową budynku biurowego X przy skrzyżowaniu ul. X z ul. Y w Warszawie z uwzględnieniem współpracy ścian szczelinowych i płyty dolnej. Określenie wpływu na sąsiedni budynek*, ProInvest, kwiecień 2005.

[9] Popielski P., *Model numeryczny do analizy przemieszczeń podłoża spowodowanych budową budynku biurowego X przy skrzyżowaniu ul. X z ul. Y w Warszawie z uwzględnieniem współpracy ścian szczelinowych i płyty dolnej. Określenie wpływu na sąsiedni budynek. Modyfikacja koncepcji rozwiązania posadowienia budynku X. Uwzględnienie określonego przemieszczenia poziomego ściany szczelinowej (20 mm na rzędnej odpowiadającej poziomowi kotwienia). Określenie wpływu na sąsiedni budynek*, ProInvest, kwiecień 2006.

[10] Satoru S., *Elastic deformation properties of geomaterials; Soil and Foundations*, Journal of the Japanese society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 32, No. 3, Sep. 1992, 23-46.

[11] Zienkiewicz O.C., *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1972.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[12] *Dokumentacja geologiczno-inżynierska do projektu architektoniczno-budowlanego budynku biurowego X przy ulicy X/Y w Warszawie*, Warszawa, wrzesień 1997.
[13] *Opinia geotechniczna działki przy ul X/Y w Warszawie*, if-CBS Inżynieria i fundamentowanie dr inż. Roman Czarnota-Bojarski Warszawa styczeń 1999.
[14] *Uproszczona dokumentacja geologiczno-inżynierska dla określenia warunków gruntowo-wodnych w obrębie działki u zbiegu ul. X i Y w Warszawie*, Warszawa, wrzesień 2001.
[15] *Wybrane rysunki dokumentacji budowlanej dotyczące projektowanego budynku, tj. przekroje posadowienia budynku, rzut poziomy posadowienia, obciążenia płyty dolnej itp*., ProInvest Sp. z o.o., Warszawa kwiecień 2005.
[16] *Uzupełniające badania geotechniczne na terenie budowy „X" w Warszawie*, Geoteko Sp. z o.o., Warszawa, maj 2006.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ