

ZAKRES ROZPOZNANIA I DOBÓR PARAMETRÓW PODŁOŻA DO OPRACOWANIA MODELI NUMERYCZNYCH GŁĘBOKO POSADOWIONYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH – DOŚWIADCZENIA I WNIOSKI

Paweł Popielski, Anna Siemińska-Lewandowska

Politechnika Warszawska, Warszawa

Streszczenie. W artykule został omówiony zakres rozpoznania i dobór parametrów podłoża, uwzględniający warunki pracy konstrukcji, pozwalający na wykorzystanie nowoczesnych technik modelowania numerycznego oraz zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntu w analizie głęboko posadowionych obiektów budowlanych. Zaprezentowano doświadczenia i wnioski z wykonanych numerycznych modeli obliczeniowych w przestrzeni 2D i 3D wybranych obiektów, odzwierciedlające lokalne uwarunkowania geotechniczne i istniejącą infrastrukturę.

Słowa kluczowe: głębokie posadowienie, obliczenia numeryczne, rozpoznanie podłoża, parametry gruntowe

WSTĘP

Obliczenie przemieszczeń pionowych (wypiętrzeń i osiadań) oraz poziomych istniejącej konstrukcji, wraz z otaczającym ją gruntem, wywołanych budową nowej głęboko posadowionej inwestycji jest uwarunkowane przez wiele elementów [Siemińska-Lewandowska 2010]. Do współpracy włączony jest obszar gruntu o znacznej głębokości, a w przypadku lokalizacji budowy w środowisku zurbanizowanym wykonane wcześniej obiekty zmieniają warunki występujące w podłożu, takie jak naprężenia i poziomy wody gruntowej. Coraz częściej do projektowania głęboko posadowionych budowli i budynków stosowane jest modelowanie numeryczne z wykorzystaniem modeli dwu- lub trzy-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Paweł Popielski, Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: pawel.popielski@is.pw.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

wymiarowych. Poprawność wykonanego modelu obliczeniowego można stwierdzić na podstawie zgodności wyznaczonych za jego pomocą przemieszczeń i naprężeń z wartościami pomierzonymi w trakcie budowy oraz eksploatacji obiektu.

W celu opracowania modelu numerycznego wykorzystywanego przy projektowaniu konstrukcji, ocenie oddziaływania lub ocenie stanu i eksploatacji obiektu niezbędne jest zgromadzenie odpowiednich materiałów pozwalających na przygotowanie danych do obliczeń.

MATERIAŁ I METODY

Do wykonania modelu głębokiego posadowienia niezbędne są następujące materiały i dane:

1. Mapy okolicy obiektu z zaznaczonymi sąsiadującymi budynkami oraz lokalizacją obiektów infrastruktury (historycznej, istniejącej i projektowanej) w analizowanym rejonie. Mapa dokumentacyjna wykonanych otworów badawczych i lokalizacja badań polowych wykonanych w celu opracowania geotechnicznej dokumentacji podłoża.

2. Dokumentacja geologiczna i geotechniczna podłoża gruntowego projektowanego obiektu oraz obiektów znajdujących się w sąsiedztwie w strefie oddziaływania, którą należy zdefiniować.

3. Dokumentacja budowlana sąsiednich budynków (rodzaj fundamentów, poziomy posadowienia itd.) oraz ocena ich stanu technicznego (o ile jest wykonana) i warunków gruntowych w ich podłożu.

4. Plan obiektu i okolicy z zaznaczonymi reperami objętymi pomiarami lub innymi punktami, które są monitorowane – do uwzględnienia w modelu w celu jego późniejszej weryfikacji.

5. Wybrane rysunki z dokumentacji budowlanej, przekroje poprzeczne i rzuty części podziemnej obiektu (określenie rzędnych: powierzchni terenu, dna płyty fundamentowej, dna ścian szczelinowych oraz grubości płyty dennej i ścian szczelinowych itd.). Ewentualnie modele komputerowe do wymiarowania elementów konstrukcyjnych.

6. Fazowanie robót w części podziemnej obiektu – etapowanie, rzędne stropów, rozpór tymczasowych, kotew gruntowych, lokalizacja słupów tymczasowych, rozmieszczenie baret lub pali pod płytą.

7. Projekt hydrogeologiczny odwodnienia budowlanego wykopu fundamentowego obiektu.

8. Harmonogram realizacji obiektu pozwalający określić zaawansowanie konstrukcji przy określaniu poszczególnych etapów obliczeń.

9. Zestawienie obciążeń na płytę i ściany szczelinowe w poszczególnych etapach realizacji obiektu (stan „0”, stan surowy itd.).

Wszystkie wymienione elementy są ważne, ale kluczowa jest dokumentacja podłoża z odpowiednio ustalonym zakresem i metodami doboru parametrów podłoża. Rozpoznanie powinno być podzielone na minimum 2 etapy, w trakcie których jest opracowany model hydrogeologiczny oraz model geotechniczny podłoża. Badania podłoża należy przeprowadzić wieloetapowo i największy nacisk położyć na nowoczesne badania penetrujące dokumentujące stan gruntu *in situ* oraz badania laboratoryjne wyznaczające

parametry gruntu w zakresie odkształceń i naprężeń, które mogą wystąpić podczas budowy.

Model hydrogeologiczny obszaru (opracowany w pierwszym etapie) powinien polegać na interpretacji budowy geologicznej i hydrogeologicznej podłoża do głębokości około 30–40 m.

Dokładana głębokość rozpoznania wynika z rzędnej posadowienia i zakresu zmian naprężenia w podłożu, wywołanych realizacją obiektu. Model powinien zawierać określenie ilościowe, dotyczące modyfikacji podłoża, spowodowane przez elementy wykonanych wcześniej obiektów (np. kotwienie ścian szczelinowych, infrastruktura podziemna, fundamenty nieistniejących budynków, zmiany warunków wodnych), ustalone na podstawie analizy archiwalnej dokumentacji oraz wykonanych badań geofizycznych (georadar, sejsmika powierzchniowa, badania elektrooporowe) [Mieszkowski i in. 2014, Pacanowski i in. 2014, Kowalczyk i in. 2015]. Wynikiem tych prac jest zdefiniowanie obszarów typowych oraz tych z lokalizacją anomalii, gdzie należy prowadzić dalsze analizy.

Rozpoznanie wstępne należy przeprowadzić, wykorzystując metody geofizyczne, aby ograniczyć stosowanie takich metod, jak wiercenia oraz sondowania dynamiczne.

Lokalizacja badań penetracyjnych i miejsc poboru próbek powinna być ustalona na podstawie badań geofizycznych, tak aby wykonać badania obszarów typowych oraz obszarów, w których zostały zlokalizowane anomalie. Oczywiście lokalizacja badań terenowych musi uwzględniać geometrię projektowanego budynku (np. rzut fundamentów, obrys ściany szczelinowej) oraz odpowiedni obszar gruntu poza obrysem obudowy wykopu.

W trakcie wierceń należy wykonać badania podstawowych właściwości fizycznych ograniczonej liczby próbek gruntu i skalibrować badania geofizyczne.

Przy wyznaczaniu parametrów hydrogeologicznych do obliczeń filtracji konieczne należy określić poziom spągu warstwy wodonośnej w obrysie wykopu (jest to niezbędne przy założeniu pełnej przesłony przeciwfiltracyjnej). Do określania wartości współczynników filtracji należy korzystać w większym zakresie z badań terenowych (np. sonda BAT) niż laboratoryjnych oraz z wzorów empirycznych.

Na podstawie wstępnego oszacowania i badań geofizycznych wybiera się punkty do dalszych badań i testów laboratoryjnych. Same badania geofizyczne bez weryfikacji dalszymi badaniami penetracyjnymi i laboratoryjnymi nie mogą być podstawą do rozpoznania podłoża.

Badania zasadnicze należy przeprowadzić na podstawie wyników badań wstępnych. W badaniach terenowych powinno się wykorzystać sondowania CPTU oraz sondowania przy użyciu piezostozka sejsmicznego (SCPT lub SDMT), które pozwolą m.in. na profilowanie wartości początkowego modułu odkształcenia. Dla sprawdzenia wartości parametrów uzyskanych za pomocą sondowania CPTU należy przeprowadzić badania dodatkowe inną, równie zaawansowaną metodą *in situ*. Najlepiej wykonać sondowania podłoża w ciągłych profilach i równolegle dwiema metodami – CPTU i DMT. Nie chodzi tylko o rozpoznanie warstw gruntu, ale przede wszystkim o ciągłą obserwację zmian jego parametrów. W przypadku występowania w podłożu gruntów uniemożliwiających wprowadzenie urządzeń penetracyjnych w celu wyznaczenia sztywności początkowej gruntu należy zastosować metody sejsmiki powierzchniowej lub międzyotworowe prześwietlenia sejsmiczne (*cross-hole*) [Godlewski i Szczepański 2015].

Na podstawie profili z badań penetracyjnych (np. CPTU) należy przeprowadzić rozpoznanie stanu naprężeń początkowych w podłożu przez określenie stopnia prekonsolidowania gruntu (OCR) oraz współczynnika parcia spoczynkowego (K_0).

Należy wyznaczyć wartości modułów przy różnych zakresach odkształcenia. Jako niezbędne badania laboratoryjne zalecane są badania w aparacie trójosiowego ściskania, z zastosowaniem elementów pozwalających określić moduły sztywności w zakresie małych odkształceń [Barański i in. 2008].

Próbki do wykonania badań laboratoryjnych należy pobierać w profesjonalnych próbnikach zalecanych przez laboratorium, które będzie prowadziło badania.

Raport geotechniczny powinien zawierać informacje geotechniczne i wyznaczone wartości charakterystyczne parametrów gruntów oraz obliczeniowe do projektowania.

Parametry geotechniczne powinny obejmować właściwości fizyczne, parametry odkształceniowe oraz parametry wytrzymałościowe. Przy wyznaczaniu parametrów należy wykorzystywać techniki statystyczne umożliwiające grupowanie danych w wydzieleniach geologiczno-inżynierskich, nie tylko w profilu pionowym, ale również w płaszczyźnie.

W tabelach należy wydzielić grupy parametrów do obliczeń „inżynierskich” z podaniem metodyki wyznaczenia parametrów, jak również do obliczeń za pomocą MES z wykorzystaniem modeli: sprężysto-plastycznego z warunkiem plastyczności Coulumba Mohra, Modified Cam Clay, Hardening Soil-small strain [Truty i Podleś 2010, Truty i Obrzud 2013].

Określenie „oddziaływania na obiekty sąsiednie” wymaga rozpoznania podłoża również pod tymi obiektami. Dlatego rozpoznanie nie może być ograniczone do obrysu nowo projektowanego budynku, ale musi obejmować obszar niezbędny do analizy parcia na obudowę wykopu i podłoża obiektów sąsiednich. Zakres oddziaływania głębokiego posadowienia zależy do rodzaju podłoża i przyjętych rozwiązań obudowy wykopu (tab. 1) [Popielski 2012]. We wstępnej analizie, w przypadku gruntów warszawskich, jako minimalny zasięg rozpoznania należy przyjąć odległość równą trzem głębokościom wykopu, licząc od jego obrysu.

W modelu numerycznym należy odtworzyć możliwie zbliżony do rzeczywistego obraz warstw gruntu zalegających w podłożu, a materiały należy pogrupować w pakiety o podobnych parametrach odkształceniowych.

Jest to ważne szczególnie na terenach silnie zurbanizowanych (np. Warszawy), gdzie bardzo rozwinięta infrastruktura podziemna koliduje ze zróżnicowanym układem warstw geotechnicznych i kilkoma poziomami wody gruntowej. W takich przypadkach konieczne jest budowanie modeli przestrzennych – trójwymiarowych. W przypadku skomplikowanych warunków gruntowych nie można stosować typowych rozwiązań projektowych (np. stałych długości ścian szczelinowych na całym obwodzie obiektu). Przy realizacji głębokich posadowień z powodu zalegania na różnej głębokości stropu utworów nieprzepuszczalnych różnicuje się głębokości ścian szczelinowych, zakładając odcięcie dopływu wód gruntowych do wykopu. Ostateczną głębokość ścian szczelinowych, przyjętych w modelu numerycznym, należy ustalić, analizując profil gruntowy opisany na podstawie informacji z głębinia poszczególnych sekcji ścian, znajdujący się w metryce sekcji, a nie założenia projektowe. Opracowywany model powinien umożliwiać takie modyfikacje. Przy założeniu odcięcia bocznego napływu wody gruntowej do dna wykopu pozostanie jedynie do odpompowania objętość wód gruntowych występujących w obrębie gruntów

Tabela 1. Różne kryteria zasięgu oddziaływania głębokiego posadowienia
 Table 1. Different criteria for range of impact of deep foundation

Kryterium The criterion	Źródło The source	Zasięg oddzia- ływania The range of impact	Uwagi dodatkowe The additional notes
1	Breyman i in. 1997	1,5–2 H_w	grunty niespoiste: piaski drobne, średnie i żwiry
2	Simpson 1979	2–2,5 H_w 2–3 H_w (maks. 5 H_w)	iłły londyńskie i gliny zwałowe mocne grunty spoiste
3	Clough i O'Rourke 1990	2–4 H_w	iłły londyńskie i gliny zwałowe
4	Kotlicki i Wysokiński 2002	2,0 H_w 2,5 H_w 3–4 H_w	w piaskach w glinach w ilach
5	TSN 50-302-2004	30 m	przy wstępnej analizie
6	SP22.13330.2011 przy wstępnej analizie	5 H_w 4 H_w 3 H_w 2 H_w	przy kotwionej konstrukcji zabezpieczającej wykop, ale nie więcej niż 2 L_k , gdzie L_k – długość kotwy (ciągną i buławy) przy stalowej konstrukcji zabezpieczającej wykop, pracującej jako wspornik lub rozpartej (stalowymi rozporami lub zastrzałami), a także przy wykonywaniu wykopu otwartego przy konstrukcji w technologii ścian szczelino- wych lub ścian z pali, pracującej jako wspornik lub rozpartej (stalowymi rozporami lub zastra- łami) przy konstrukcji w technologii ścian szczelino- wych lub ścian z pali i wykonywaniu wykopu metodą podstropową

niespoistych zalegających w wykopie fundamentowym w przestrzeni pomiędzy ścianami szczelinowymi. Musi być jednak spełniony warunek, że wykonana obudowa wykopu jest szczelna, a takie założenie przyjmuje się w typowych modelach numerycznych.

Szczelność obudowy może zostać potwierdzona przed rozpoczęciem głębenia wykopu na przykład za pomocą metody termomonitoringu [Dornstädter i Huppert 1998, Popielski i in. 2016a].

Poziom zwierciadła wód gruntowych może ulegać okresowym wahaniom w stosunku do stanu nawierconego w rozpoznaniu hydrogeologicznym (np. w Warszawie do około 1,5 m). Dlatego w modelu należy uwzględnić kilka wariantów różniących się poziomami wody gruntowej.

Dokumentacje geologiczne i geotechniczne na ogół nie uwzględniają w rozpoznaniu istniejącej infrastruktury podziemnej i wykonanych wzmocnień podłoża, na przykład nie uwzględniają strefy iniekcji wykonanej w trakcie realizacji obiektów wcześniej wykonanych lub kotwienia ścian obudowy wykopu istniejących obiektów.

Takie zmiany w podłożu gruntowym mogą lokalnie spowodować na przykład jednostronne wzmocnienie gruntu (podparcie) w rejonie sąsiedniego budynku i muszą być

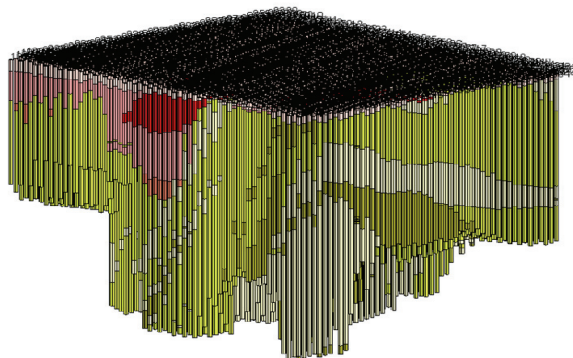
uwzględnione w modelu numerycznym. Należy jeszcze raz podkreślić znaczenie badań geofizycznych, które, poza jakościowym rozpoznaniem podłoża, pozwalają na lokalizację na przykład dużych głazów, niewybuchów i niewypałów oraz niezainwentaryzowanych instalacji podziemnych na placu budowy przed rozpoczęciem wykonania obudowy i głębień wykopu.

W dokumentacji rozpoznania podłoża niektóre firmy stosują różne skale pionowe i poziome. Jest to zrozumiałe przy prostym układzie warstw (często poziomych) i dla długich obiektów liniowych. W przypadku gdy dokumentacja dotyczy skomplikowanych warunków gruntowo-wodnych nie jest to rozwiązanie dobre. Wynika z tego błędna lokalizacja odwiertów na mapach geodezyjnych (zamieszczonych w tym samym opracowaniu), które mają inną skalę poziomą niż skala zastosowana na przekrojach geologicznych.

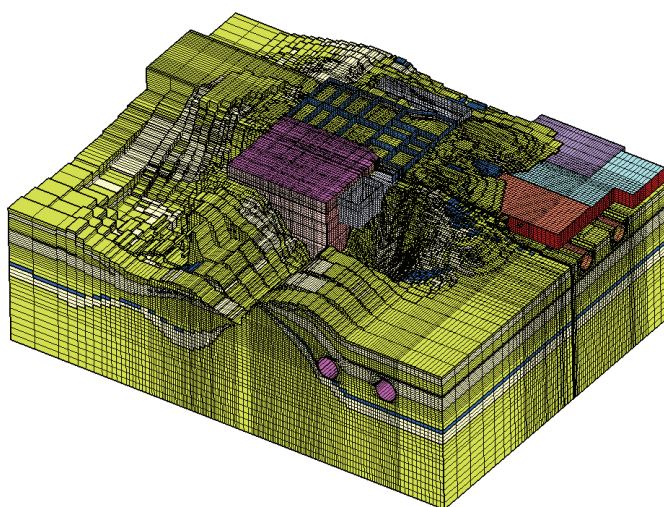
Nie zawsze w dokumentacji podawane są współrzędne GPS wykonanych odwiertów, co pozwoliłyby skorygować błędą lokalizację otworów badawczych na mapie. Generalnie w dokumentacji geotechnicznej bardzo rzadko wykorzystywane są systemy informacji geograficznej. Zastosowanie różnych skal poziomych i pionowych utrudnia weryfikację wykonanej dyskretyzacji układu warstw w modelu numerycznym w stosunku do przekroji zamieszczonych w dokumentacji. Przyjęcie poprawnego modelu geologicznego jest jednym z podstawowych elementów poprawnego modelu numerycznego. Nierzadko rozpoznanie w rejonie otworów badawczych jest interpretowane bardzo lokalnie – zamieszczony jest jedynie komentarz, że wykonany profil może odbiegać od rzeczywistości. W przypadku prowadzenia kolejnego etapu badań geotechnicznych (np. uszczegółowienie budowy podłoża fragmentu analizowanego obszaru) przez innego wykonawcę w nowej dokumentacji zdarza się, że pojawiają się inne wydzielienia warstw geotechnicznych i gruntów (np. 6 warstw oraz 9 rodzajów gruntu w stosunku do wydzielonych w poprzednim opracowaniu 4 warstw i 4 rodzajów gruntu). Te nowe wydzielienia na ogół cechują się diametralnie różnymi parametrami. Do rzadkości należy przygotowanie trójwymiarowych modeli geologicznych lub geotechnicznych, które uwzględniałyby przestrzenny układ warstw.

Rozpoznanie bazujące na przekrojach płaskich jest bardzo konserwatywne, gdyż obecnie wiele pakietów obliczeniowych dysponuje narzędziami umożliwiającymi wczytanie trójwymiarowych schematów warstw podłoża. Wczytanie geometrii warstw może być wykonane w formie zadanych powierzchni eksportowanych z modelu 3D, jak również w formie profili z wykonanych odwiertów [Zace Services 2014]. Opracowanie podczas wieloetapowego rozpoznania geotechnicznego (integrującego wiele rodzajów badań, w tym *cross hole* i dane archiwalne) modelu 3D [PIG PIB 2015] pozwala na wygenerowanie wirtualnych otworów badawczych w regularnej siatce, które uzupełniają dane z odwiertów wykonanych w terenie, a także precyzyjniej odzwierciedlają układ warstw (rys. 1).

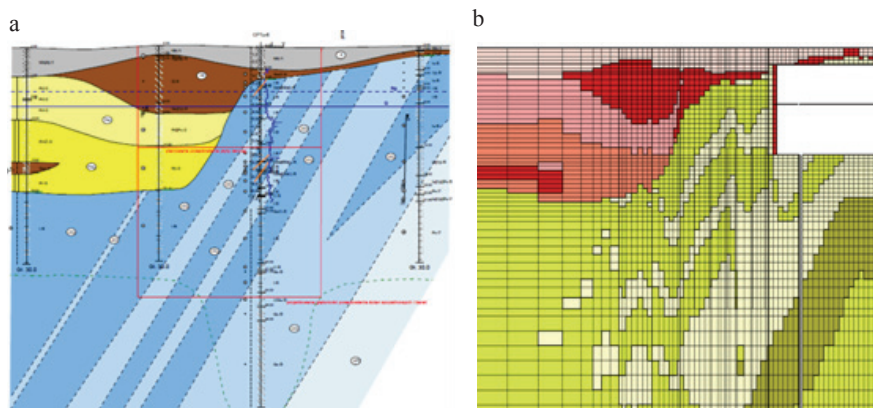
Na rysunku 2 przedstawiono przestrzenny model numeryczny podłoża, uwzględniający rozpoznanie geotechniczne oraz obiekty podziemne występujące w analizowanym rejonie. Rysunek pokazuje sytuację po usunięciu przypowierzchniowych warstw gruntu. Przestrzenna dyskretyzacja została wykonana z wykorzystaniem wirtualnych odwiertów. Na rysunku 3 pokazano porównanie przekroju zamieszczonego w dokumentacji podłoża z przekrojem z modelu numerycznego w analogicznym miejscu. Na rysunku widać charakterystyczny układ warstw, a ewentualne niedokładności mogą być poprawione ręcznie przez użytkownika przed rozpoczęciem obliczeń.



Rys. 1. Schemat wirtualnych odwiertów obrazujących podłoże modelu
 Fig. 1. The diagram showing the virtual boreholes of subsoil model



Rys. 2. Przestrzenny model uwzględniający rozpoznanie podłoża i obiekty podziemne
 Fig. 2. 3D model takes into account identified soil layers and underground objects



Rys. 3. Porównanie przekroju z dokumentacji (a) i wyniku automatycznej dyskretyzacji modelu podłoża (b)
 Fig. 3. Comparison section of the documentation (a) and the result of automatic discretization of the model of subsoil (b)

DYSKUSJA

Doświadczenia wskazują, że od warstw położonych głębiej można oczekiwać „mocniejszych” materiałów (o wyższych parametrach). W miarę wzrostu głębokości pod fundamentem budynku będą występowały coraz mniejsze odkształcenia. Zjawisko to jest znane od lat i opisane m.in. w pracy Satoru i in. [1992].

Wyznaczenie wartości modułów sprężystości w zakresie małych odkształceń można wykonać metodami geofizycznymi, na przykład za pomocą sejsmiki lub badając zależność odkształcenie – naprężenie w aparacie trójosiowego ściskania ze specjalnym pomiarem małych odkształceń lub w kolumnie rezonansowej.

Należy po raz kolejny stwierdzić, że parametry niezbędne do analizy numerycznej głębokich posadowień nie mogą być wyznaczane na podstawie normy PN-81/B-03020, co nadal się zdarza. Norma ta była stosowana przez kilkadziesiąt lat i może być z powodzeniem wykorzystywana do wyznaczenia parametrów gruntu pod płytko posadowionymi sąsiednimi obiektami. Podczas oceny stanu obiektów sąsiednich często wykonuje się odkrywkę w celu określenia rodzaju i stanu fundamentów. Odslania się poziom posadowienia, ale bardzo rzadko są wykonywane najprostsze sondowania dynamiczne, pozwalające na wskaźnikowe określenie stanu gruntu i na tej podstawie następnie oszacowanie parametrów materiałowych. Woda opadowa odprowadzana rynnami spustowymi lub spływająca powierzchniowo może wpływać pod budynek sąsiedni i spowodować zmiany wartości parametrów gruntu na skutek zjawiska sufozji i erozji. Analogiczne zjawiska może powodować przeciekająca kanalizacja.

Parametry materiałowe można zweryfikować za pomocą analizy wstecz, jeżeli projektant ma do dyspozycji rzeczywiste pomiary przemieszczeń obudowy wykopu i powierzchni terenu [Siemińska-Lewandowska 2001, Mitew-Czajewska i in. 2011, Kasprzak i in. 2016] oraz budynków sąsiadujących z aktualnie realizowaną inwestycją [Popielski 2005, Popielski 2013a, b]. Analiza wstecz (*back analysis*) polega na stworzeniu obliczeniowego modelu pracy obiektu budowlanego przy wprowadzeniu założonych w projekcie właściwości (parametrów) materiałów obiektu i podłoża. Jako wartości początkowe należy stosować parametry uzyskane z rozpoznania geologicznego i geotechnicznego lub tzw. parametry eksperckie, przyjęte na podstawie doświadczenia porównywalnego dla stref materiałowych (czasami wydzielonych pakietów materiałów) opisanych przez przestrzenną geometrię modelu. Aby zweryfikować wartości parametrów materiałów zastosowanych w modelu, znając obciążenie działające na obiekt w wybranym etapie budowy i dysponując pomierzonymi wartościami przemieszczeń, należy wykonać obliczenia i porównać otrzymane wartości przemieszczeń z wartościami pomierzonymi. W przypadku niezgodności przemieszczeń pomierzonych i obliczonych należy zmodyfikować wartości parametrów podłoża i powtarzać obliczenia do momentu uzyskania zgodności. Wykonanie analizy wstecz można utożsamiać z kalibrowaniem modelu numerycznego. Doświadczenia wskazują, że wyznaczone za pomocą analizy wstecz wartości modułów odkształcenia obarczone są małym błędem, co umożliwia dokładniejszą prognozę przemieszczeń.

Model numeryczny powinien odzwierciedlać kolejne fazy wznoszenia obiektu i związane z nimi zmiany obciążeń [Popielski i in. 2016b]. Rzeczywiste, zaobserwowane zachowanie się obiektu budowlanego (np. przemieszczenia, odkształcenia, położenie

krzywej depresji) powinno być na bieżąco porównywane z wynikami uzyskanymi z modelu obliczeniowego (tzw. metoda obserwacyjna) [Zaczek-Peplinska i in. 2013]. Istotna niezgodność wyników obserwacji (monitoringu) z wynikami symulacji świadczy o tym, że model jest nieadekwatny do rzeczywistości.

PODSUMOWANIE

W pracy wykorzystano kilkunastoletnie doświadczenia przy opracowywaniu i weryfikacji kilkudziesięciu modeli numerycznych głęboko posadowionych obiektów budowlanych, zwłaszcza w zakresie doboru i kalibracji parametrów materiałowych podłoża.

Oddziaływanie głęboko posadowionych obiektów budowlanych na środowisko zurbanizowane wynika z przyczyn naturalnych (fizycznych), związanych z procesami odprężenia, obciążenia wtórnego i obciążenia dodatkowego, oraz technologicznych, obejmujących wpływ konstrukcji i technologii wykonywania obiektu na przemieszczenia dna oraz obudowy wykopu, terenu i obiektów znajdujących się w sąsiedztwie wykopu, jak też zmian w warunkach gruntowo-wodnych.

Podlegające superpozycji składowe przemieszczeń mogą się wzajemnie redukować. Podstawowym problemem związanym z realizacją GPOB jest kontrola i utrzymanie w dopuszczalnych granicach przemieszczeń i deformacji obiektów sąsiednich. Analizując konkretny obiekt, należy zidentyfikować najważniejsze oddziaływania i procesy decydujące o rozwoju deformacji i określić granice zasięgu stref ich oddziaływania.

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

Często w wielu przypadkach parametry materiałowe wyznaczone są metodami uproszczonymi, opracowanymi dla gruntów zalegających na małych głębokościach, co zwykle skutkuje niedoszacowaniem ich wartości. Takie podejście jest dopuszczalne na wstępnym etapie rozpoznania podłoża lub pod budynkami sąsiednimi płytko posadowionymi oraz na obszarach zajętych obiektami przeznaczonymi do wyburzenia (np. w gęstej zabudowie miejskiej), gdzie bezpośrednie badania z zastosowaniem metod penetracyjnych nie są możliwe.

Podczas projektowania i realizacji obiektów budowlanych w trudnych warunkach (skomplikowana budowa podłoża, sąsiedztwo istniejących budynków, głębokie wykopy itp.) typowe oszacowania parametrów oraz normowe metody obliczeń statycznych często okazują się niewystarczające. Metody niestandardowe (modelownie numeryczne) wymagają rozbudowy sieci monitoringu i wykorzystania nowoczesnych badań gruntu, w tym metod geofizycznych.

Analiza wstecz (*back analysis*) na podstawie istniejącego monitoringu przemieszczeń pozwala na wyznaczenie takich wartości parametrów gruntowych (głównie modułów), których zastosowanie w modelach numerycznych prowadzi do znacznie dokładniejszych wyników. Parametry wyznaczone na podstawie analizy wstecz są zazwyczaj kilkakrotnie wyższe w odniesieniu do przyjętych na podstawie badań uproszczonych i norm.

Badając zagadnienia posadowienia budynków, szczególnie w aspekcie praktycznym, należy weryfikować wyniki obliczeń za pomocą obserwowanych w naturze wartości

przemieszczeń. Do weryfikacji parametrów materiałowych należy również stosować nowoczesne metody pomiarowe, na przykład mikrosejsmikę powierzchniową lub inne wydajne metody geofizyczne.

Analiza wstecz oraz badania wykonane w trakcie realizacji obiektu pozwalają na skuteczną weryfikację modelu numerycznego przyjętego do obliczeń. Dopiero po weryfikacji model numeryczny może być wykorzystany do analizy oddziaływania GPOB. Przy weryfikacji należy wykorzystywać dane z typowego monitoringu oraz obserwacji wypiętrzeń dna wykopu na podstawie pomiarów głowic słupów tymczasowych i osiadań wywołanych przez wykonanie płyty dennej budynku, z wykorzystaniem odpowiednio skonstruowanych reperów.

Powinna powstać baza danych dotyczących zrealizowanych projektów, zawierająca parametry materiałowe określone w dokumentacji geologicznej, opis zastosowanych w obliczeniach modeli konstytutywnych gruntu, obserwowane przemieszczenia obudowy wykopu i obiektów sąsiednich oraz wartości parametrów zweryfikowanych metodą analizy wstecz na podstawie wyników monitoringu. Baza powinna być prowadzona przez jednostkę naukową, dane powinny być ogólnodostępne i obowiązkowo wykorzystywane przy realizacji sąsiednich inwestycji.

PIŚMIENNICTWO

- Barański, M., Popielski, P., Szczepański, T. (2008). Analiza numeryczna odprężenia gruntu w głębokich wykopach ze względu na sztywność. *Czasopismo Techniczne, Środowisko*, 3.
- Breymann, H., Freiseder, M., Schweiger, H.F. (1997). Deep excavations in soli ground, in situ measurements and numerical predictions. *Proceedings of the XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg*.
- Clough, G., O'Rourke, T. (1990). Construction induced movements of in situ walls. *Proceedings of Conference "Design and Performance of Earth Retaining Structures"*, New York.
- Dornstädter, J., Huppert, F. (1998). Thermische Leckortung an Trogbaugruben mit tiefliegenden Sohlen. *Vorträge der Baugrundtagung in Stuttgart, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik*, 179–187.
- Godlewski, T., Szczepański, T. (2015). Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych. *ITB Instrukcje, Wytyczne, Poradniki*, 494.
- Kasprzak, A., Popielski, P., Smoliński, B. (2016). Ocena wpływu budowy geologicznej na wyniki numerycznego modelowania przemieszczeń ścian i dna wykopu w świetle danych pomiarowych ze stacji A14 I linii metra w Warszawie. *Przegląd Geologiczny*, 64, 4, 230–237.
- Kotlicki, W., Wysokiński, L. (2002). Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów. *Instrukcja ITB*, 376, Warszawa.
- Kowalczyk, S., Zawrzykraj, P., Mieszkowski, R. (2015). Application of electrical resistivity tomography in assessing complex soil conditions. *Geological Quarterly*, 59 (2), 367–372.
- Mieszkowski, R., Kowalczyk, S., Barański, M., Szczepański, T. (2014). Zastosowanie metod geofizycznych do rozpoznania powierzchni stropowej gruntów słabo przepuszczalnych oraz wyznaczenia stref rozluźnienia w korpusie zapory ziemnej. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN*, 86, 167–180.
- Mitew-Czajewska, M., Siemińska-Lewandowska, A., Tomczak, U. (2011). Analiza przemieszczeń ścian głębokich wykopów realizowanych w Warszawie. *Inżynieria i Budownictwo*, 67, (4), 214–217.

- Pacanowski, G., Czarniak, P., Bąkowska, A., Mieszkowski, R., Welc, F. (2014). The role of geophysical ERT method to evaluate the leakproofness of diaphragm wall of deep foundation trenches on the example of the construction of retail and office complex in Lublin, Poland. *Studia Quaternaria*, 31 (2), 91–99.
- PIG PIB (2015). Dokumentacja badań podłoża gruntowego na potrzeby optymalizacji posadowienia budynku przy skrzyżowaniu ulic Marszałkowskiej i Świętokrzyskiej w Warszawie. PIG PIB, Warszawa.
- PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Popielski, P. (2005). Zastosowanie pakietu HYDRO-GEO w geotechnice i hydrotechnice, dokładność obliczeń numerycznych, analiza wstecz. XX Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja „Warsztaty pracy projektanta konstrukcji”, Wisła.
- Popielski, P. (2012). Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. *Prace Naukowe Inżynieria Środowiska*, 61. OWPW, Warszawa.
- Popielski, P. (2013a). Metody oceny oddziaływania głębokiego posadowienia na otoczenie. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji – Geotechnika. Wisła, 5–8 marca.
- Popielski, P. (2013b). Weryfikacja parametrów podłoża na podstawie wykonanej analizy wstecz przy realizacji głębokich posadowień w Warszawie. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 12 (2), 91–100.
- Popielski, P., Radzicki, K., Dornstädter, J. (2016a). Badania szczelności obudowy głębokiego wykopu metodą termomonitoringu. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 127–138.
- Popielski, P., Smoliński, B., Kasprzak, A. (2016b). Numeryczna analiza głęboko posadowionych obiektów w rejonie Warszawy. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 103–110.
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dz.U. 2012 poz. 463.
- Satoru, S. et al. (1992). Elastic deformation properties of geomaterials. *Soil and Foundations. Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 32, 3, 26–46.
- Siemińska-Lewandowska, A. (2001). Przemieszczenia ścian kotwionych szczelinowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo*, 139.
- Siemińska-Lewandowska, A. (2010). Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Siemińska-Lewandowska, A., Mitew-Czajewska, M., Tomczak, U. (2012). The study of displacements of diaphragm walls built in Warsaw Quaternary soils. W: *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, 7th International Symposium. G. Viggiani (ed.), Taylor & Francis Group, 605–610.
- Simpson, B. (1979). Design parameters for stiff clays. *Proceedings of the VII European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton.
- SP22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redakcija SNiP 2.02.01-83*
- Truty, A., Obrzud, R. (2013). Komputerowa analiza współdziałania konstrukcji budowlanych z podłożem przy zastosowaniu modeli konstytutywnych gruntów kalibrowanych na podstawie wyników badań laboratoryjnych i polowych. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 5–8 marca.
- Truty, A., Podleś, K. (2010). Zastosowanie modelu Hardening Soil-Small do analizy problemów interakcji konstrukcji budowlanych z podłożem A. *Czasopismo Techniczne*, 1-S, 16, 117–134.
- TSN 50-302-2004. Sankt-Peterburg. Proektirovanie fundamentov zdaniy i sooruzheniy v Sankt-Peterburge.
- Zace Services (2014). ZSOIL MANUAL DATA PREPARATION & TUTORIAL, Z_SOIL PC v 2014, Lousanne.

Zaczek-Peplinska, J., Pasik, M., Popielski, P. (2013). Geodezyjny monitoring obiektów w rejonie oddziaływania budowy tuneli i głębokich wykopów – doświadczenia i wnioski. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 12 (2), 17–31.

THE SCOPE OF SOIL INVESTIGATION AND SELECTION OF PARAMETERS, REQUIRED FOR THE PREPARATION OF NUMERICAL MODELS OF DEEP FOUNDATION – EXPERIENCES AND CONCLUSIONS

Abstract. In the article there was discussed the scope of the soil investigation and selection of substrate parameters taking into account the working conditions of the construction. Presented range allows to use the modern techniques, numerical modelling and advanced constitutive models of soil for buildings analysis with deep foundations. The experiences and conclusions of numerical computational models selected objects made in the 2D and 3D, taking into account local geotechnical conditions and existing infrastructure were presented.

Key words: deep foundation, numerical computing, soil investigation, soil parameters

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Popielski, P., Siemińska-Lewandowska, A. (2016). Zakres rozpoznania i dobór parametrów podłoża do opracowania modeli numerycznych głęboko posadowionych obiektów budowlanych – doświadczenia i wnioski. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (4), 31–42.