

NUMERYCZNA ANALIZA GŁĘBOKO POSADOWIONYCH OBIEKTÓW W REJONIE WARSZAWY

Paweł Popielski, Błażej Smoliński, Adam Kasprzak

Politechnika Warszawska, Warszawa

Streszczenie. W artykule zaprezentowano możliwość wykorzystania rozległych analiz numerycznych w kontekście głębokich posadowień budynków w rejonie Warszawy. Zwrócono uwagę na specyfikę omawianego rejonu związaną z występowaniem złożonych warunków gruntowo-wodnych. W pracy zaproponowano tok postępowania związany z konstrukcją modeli oraz przebiegiem obliczeń numerycznych. Zwrócono uwagę na czynniki mające istotny wpływ na wyniki końcowe prowadzonych analiz. Omówiono konieczność prowadzenia procesu kalibracji numerycznych modeli obliczeniowych z punktu widzenia praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników. Na podstawie zaprezentowanych przykładów i przeprowadzonych analiz sformułowano wnioski końcowe.

Słowa kluczowe: głębokie wykopy, geotechnika, modelowanie numeryczne

WSTĘP

Głębokie posadowienie nowych obiektów budowlanych w terenie zurbanizowanym jest zadaniem trudnym i skomplikowanym. Realizacja tego typu przedsięwzięć wymaga przeprowadzenia rozległych analiz. Szczególnie istotnym zagadnieniem wydaje się być ocena oddziaływania planowanej inwestycji na już istniejącą infrastrukturę i obiekty sąsiadujące. Przypadek miasta Warszawy jest szczególnie złożony. Większość badań hydrogeologicznych i geotechnicznych prowadzonych w rejonie centrum i jego okolic wskazuje na bardzo skomplikowaną budowę geologiczną i hydrogeologiczną podłoża. Większość realizowanych obiektów budowlanych to:

- budynki wysokościowe projektowane w istniejącej zabudowie miejskiej,
- obiekty wysokie, których głębokość posadowienia bezpośredniego przekracza 5,0 m lub które zawierają więcej niż jedną kondygnację zagłębioną w gruncie.

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

Zgodnie z Rozporządzeniem... [2012] inwestycje mieszczące się w powyższych kryteriach należy zaliczyć do trzeciej kategorii geotechnicznej. Wiąże się to z koniecznością sporządzenia odpowiedniej dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, a cały proces projektowo-wykonawczy wymaga szczególnej staranności.

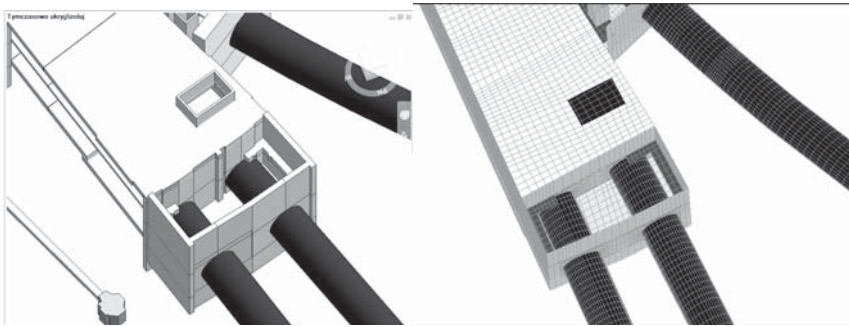
METODYKA OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Coraz chętniej stosowanym narzędziem wspomagającym proces realizacji inwestycji jest modelowanie numeryczne. Rozwój technik komputerowych oraz metod obliczeniowych spowodował, że obecnie możliwe jest prowadzenie wielowariantowych analiz, niezwykle pomocnych w ocenie charakteru pracy analizowanego obiektu oraz jego wpływu na otoczenie. W przypadku analizy numerycznej nowego, głęboko posadowionego obiektu zlokalizowanego w środowisku zurbanizowanym wskazane jest zastosowanie odpowiedniego toku postępowania związanego z konstrukcją modelu i procesem obliczeń numerycznych. Wyróżnić można następujące etapy:

- analizę danych geologicznych i geotechnicznych oraz dokumentacji budowlanej istniejących obiektów sąsiednich,
- ustalenie parametrów materiałowych podłoża i elementów konstrukcyjnych,
- opracowanie modelu geometrycznego (najlepiej 3D) podłoża i wykonanych wcześniej obiektów budowlanych (budynków, tuneli, elementów infrastruktury podziemnej) oraz części podziemnej projektowanego obiektu,
- wykonanie analizy wstecz, na podstawie dostępnych wartości przemieszczeń pomierzonych w trakcie wykonywania poszczególnych obiektów sąsiednich oraz danych pochodzących z szeroko rozumianego monitoringu, w celu weryfikacji wartości parametrów materiałowych podłoża przyjętych do obliczeń,
- przeprowadzenie symulacji numerycznej etapowej realizacji wykopu fundamentowego, a następnie projektowanego budynku, określenie odprężenia gruntu w trakcie wykonania wykopu budowlanego (wyznaczenie wartości wypiętrzenia sąsiednich obiektów) oraz osiadań w trakcie wznoszenia budynku (określenie osiadań zabudowy sąsiedniej),
- optymalizację rozwiązania posadowienia budynku (określenie długości i lokalizacji baret lub pali oraz długości i grubości ścian szczelinowych) pod kątem minimalizacji oddziaływania projektowanej inwestycji na obiekty sąsiednie.

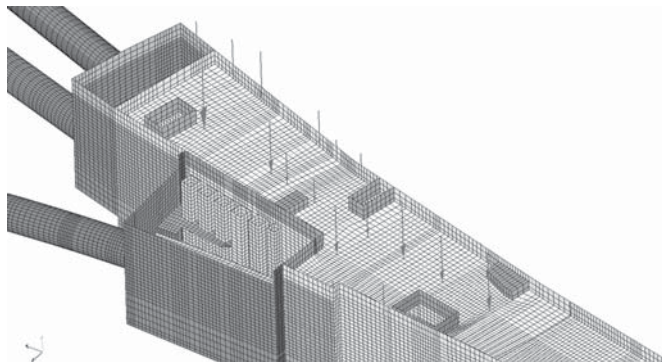
OBLICZENIA NUMERYCZNE – ISTOTNE CZYNIKI

Większość dostępnego na rynku oprogramowania jest kompatybilna z popularnymi narzędziami grafiki inżynierskiej. Jest to istotne z punktu widzenia wiernego odtworzenia geometrii analizowanego obiektu i jej późniejszego importu (rys. 1). Istotną zaletą zaawansowanych pakietów do obliczeń numerycznych jest możliwość uwzględnienia historii współpracy analizowanego obiektu z podłożem gruntowym oraz odzwierciedlenie kolejnych etapów jego realizacji z przyłożeniem wartości obciążeń od elementów konstrukcji i innych, na przykład obciążeń technologicznych (rys. 2). Wszystkie te czynniki mają bezpośredni wpływ na rezultaty obliczeń i ich dokładność [Popielski 2005].



Rys. 1. Model numeryczny 3D. Odzworowanie danych projektowych (po lewej stronie przedstawiono model w programie Revit, po prawej jego odzworowanie w programie Z-Soil)

Fig. 1. 3D numerical model. Representation of design data

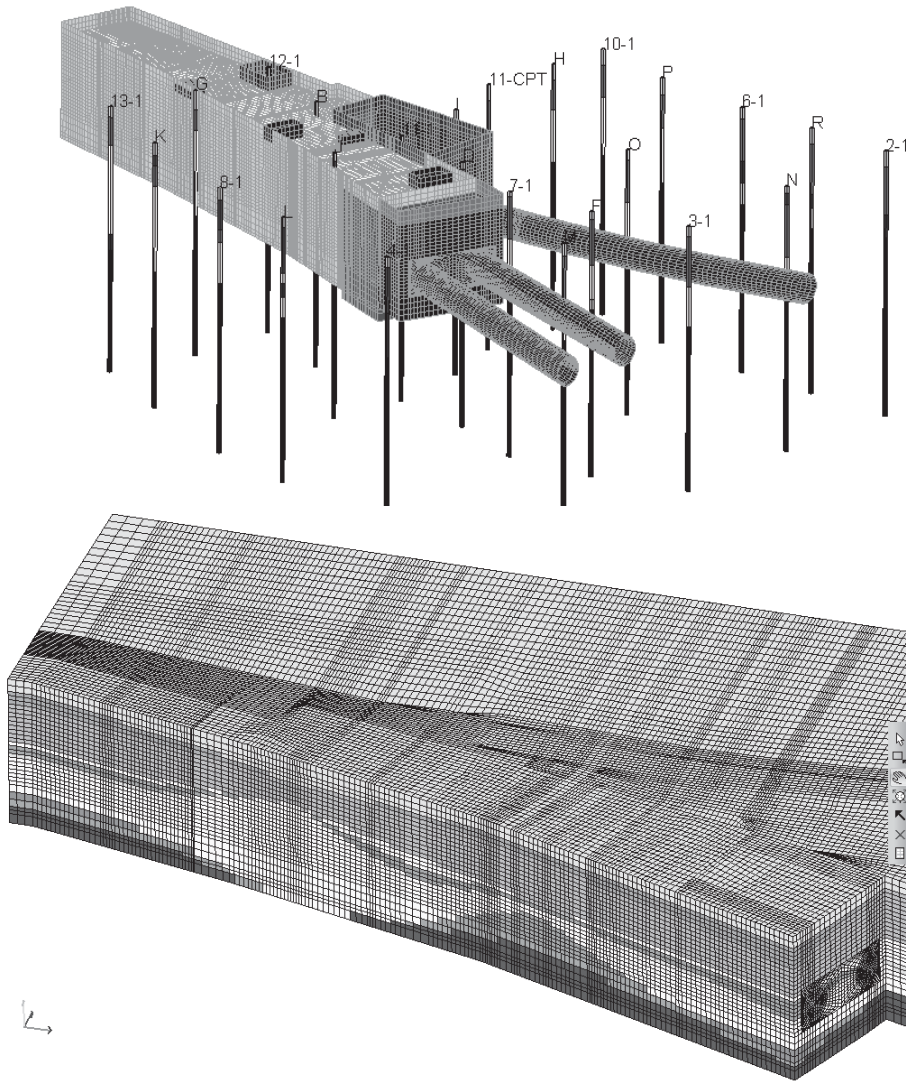


Rys. 2. Model numeryczny 3D. Obciążenia punktowe

Fig. 2. 3D numerical model. Nodal loads

W tym miejscu należy podkreślić znaczenie dokładnego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych w rejonie realizacji inwestycji. Praktyka inżynierska pokazuje, że koszty badań geologiczno-geotechnicznych stanowią ułamek procenta sumarycznych kosztów inwestycji, a wszelkie próby oszczędności w tym zakresie mogą skutkować poważnymi problemami na etapie wykonawstwa i eksploatacji obiektu.

Wpływ wyznaczenia poprawnych wartości parametrów materiałowych na wyniki obliczeń numerycznych, a także ich przestrzenny rozkład związany ze złożoną zazwyczaj budową geologiczną podłoża gruntowego jest rzeczą oczywistą [Kasprzak i in. 2016]. Dokładne odzwierciedlenie układu poszczególnych warstw litologicznych może wydawać się zadaniem trudnym, żmudnym i skomplikowanym. W praktyce inżynierskiej budowę geologiczną podłoża opracowuje się przy wykorzystaniu odwiertów, tzw. boreholes (rys. 3). Dodatkowo, dysponując przekrojami geotechnicznymi lub modelem przestrzennym podłoża, można wygenerować tzw. odwierty wirtualne (np. w regularnej siatce). Umożliwiają one zaprogramowanie układu warstw gruntowych w poszczególnych otworach badawczych, a następnie interpolowanie ich przebiegu zgodnie z indywidualnymi potrzebami [ZSoil Manual... 2012]. Podejście takie jest niezwykle efektywne i pozwala na możliwie wierne uwzględnienie w obliczeniach rzeczywistych warunków gruntowo-wodnych.



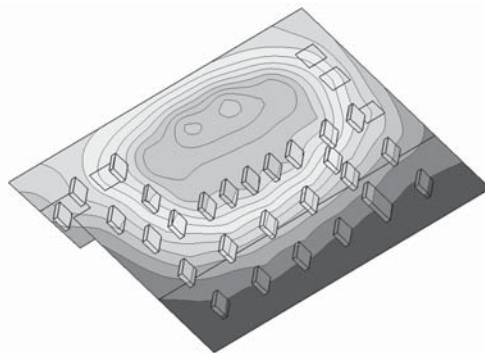
Rys. 3. Przykład wykorzystania funkcji wirtualnych odwiertów
 Fig. 3. The example of implementation of borehole function

Czynnikiem istotnie wpływającym na poprawę jakości wyników analiz numerycznych jest możliwość powiązania modułu sztywności z zakresem odkształceń i naprężeń. Obecnie standardem staje się stosowanie złożonych modeli sprężysto-plastycznych ośrodka gruntowego jak na przykład Hardening Soil-small strain (HS_{ss}). W modelu tym moduł sztywności nie jest wielkością stałą, a funkcją stanu naprężenia, odkształcenia oraz historii obciążenia [Truty i Podleś 2010]. Oczywiście odpowiednie wartości poszczególnych parametrów muszą być wyznaczone w trakcie badań podłoża.

Jako wartości wyjściowe parametrów materiałowych najlepiej stosować te uzyskane na podstawie rozpoznania geologicznego i geotechnicznego. Dopuszczalne jest również wykorzystanie tzw. parametrów eksperckich, bazujących na analogiach, metodzie obserwacyjnej, dotychczasowych doświadczeniach i praktyce. W przypadku braku wystarczającej liczby danych możliwe jest zastosowanie „analizy wstecz”. Polega ona na modyfikacjach poszczególnych parametrów aż do uzyskania zgodności uzyskiwanych wyników z wartościami pomierzonymi, pochodzącymi na przykład z monitoringu geodezyjnego [Popielski 2012]. Trzeba podkreślić konieczność bieżącej kontroli uzyskiwanych wyników. W przypadku zauważenia istotnych rozbieżności pomiędzy wartościami rzeczywistymi a obliczonymi należy dokonać stosownych korekt w budowie modelu i uwzględnionych parametrach. Nawet w przypadku dysponowania kompletnym zestawem danych i informacji bezkrytyczne przyjmowanie uzyskiwanych wyników jest niedopuszczalne. Wymagana jest każdorazowa weryfikacja modelu numerycznego pod kątem zgodności na przykład przemieszczeń obliczonych, z zaobserwowanymi. W przypadku nowo projektowanych konstrukcji weryfikacji można dokonać na podstawie monitoringu wybudowanych wcześniej sąsiednich obiektów lub ich elementów. Uzyskanie akceptowalnego poziomu zgodności warunkuje przydatność wykonanych obliczeń numerycznych do praktycznego wykorzystania.

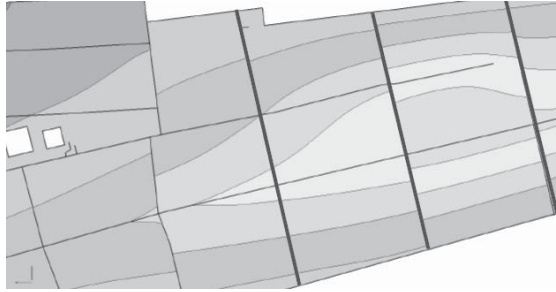
WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Zakres możliwych do przeprowadzenia analiz numerycznych jest bardzo szeroki. Obejmuje zarówno zagadnienia filtracji i konsolidacji, jak i stanu naprężenia i odkształcenia konstrukcji. Z uwagi na charakter danych pochodzących z okresowych pomiarów geodezyjnych, jakie są wykorzystywane do kalibracji modeli numerycznych, najczęściej analizowanym zagadnieniem są przemieszczenia w obrębie modelowanych obiektów. Wyniki obliczeń mogą być prezentowane w rozmaitych formach i wariantach – w odniesieniu do całego modelu, konkretnego fragmentu lub wybranych punktów (np. odpowiadających istniejącym w rzeczywistości reperom kontrolowanym). W przypadku posadowienia głębokich budynków szczególnie istotną kwestią są przemieszczenia pionowe związane z odprężeniem dna wykopu [Barański i in. 2008] i osiadaniem płyty fundamentowej często współpracującej z układem baret (rys. 4) lub pali.

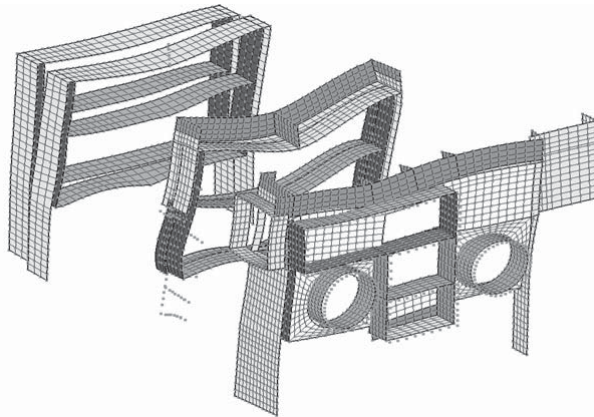


Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych. Współpraca płyty fundamentowej i baret. Osiadania
Fig. 4. Results of numerical calculations. Subsidence of foundation slab

W przypadku złożonych, zdylatowanych konstrukcji istotna jest również ocena zróżnicowania pracy poszczególnych sekcji. W takiej sytuacji w modelu należy odtworzyć istniejące w rzeczywistości dylatacje obiektów budowlanych, na przykład stacji metra. Na rysunku 5 przedstawiono nieciągłość przemieszczeń płyty stropowej w rejonie dylatacji. Zaprezentowanie deformacji siatki elementów skończonych pozwala na lepsze zobrazowanie charakteru pracy analizowanego obiektu. Na rysunku 6 przedstawiono pracę dylatacji w wydzielonych częściach modelu. Prezentowane przemieszczenia są przeskalowane w stosunku do geometrycznych wymiarów elementów.

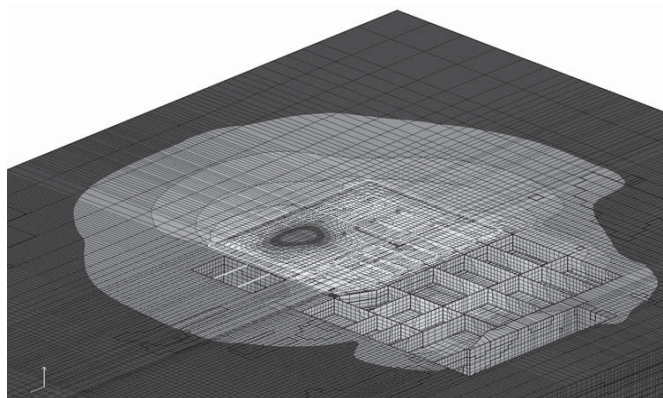


Rys. 5. Wyniki obliczeń numerycznych. Przemieszczenia na dylatacjach
Fig. 5. Results of numerical calculations. Displacement on dilatations



Rys. 6. Wyniki obliczeń numerycznych. Deformacja siatki
Fig. 6. Results of numerical calculations. Mesh deformations

Na podstawie wykonanych analiz numerycznych możliwe jest również określenie zasięgu oddziaływania planowanej inwestycji. Jak już wcześniej wspomniano, jest to szczególnie istotne w przypadku gęstej zabudowy i wrażliwych obiektów sąsiednich. Na rysunku 7 pokazano przykładowe położenie zerowej izolinii przemieszczeń, której lokalizacja w modelu potwierdza poprawność przyjętej do analizy numerycznej geometrii. Brak zaobserwowania zerowej izolinii przemieszczeń w modelu wskazuje na nieodpowiednią (za małą) wielkość obszaru przejętego do analizy i zaburzenie wyników przez wpływ warunków brzegowych.



Rys. 7. Wyniki obliczeń numerycznych. Zasięg oddziaływania
Fig. 7. Results of numerical calculations. Range of influence

PODSUMOWANIE

Rezultaty przeprowadzonych analiz numerycznych uzależnione są od poprawnych założeń i scenariuszy obliczeniowych. Konstrukcja modelu numerycznego musi odzwierciedlać stan rzeczywisty oraz poszczególne etapy realizacji obiektu. Wiarygodność wyników obliczeń numerycznych uzależniona jest od przyjętego zakresu rozpoznania oraz poprawności wyznaczenia parametrów materiałowych. Podczas projektowania i wykonawstwa obiektów budowlanych w trudnych warunkach (skomplikowane warunki gruntowo-wodne, teren zurbanizowany, głębokie wykopy itp.) należy wykorzystywać trójwymiarowe modelowanie numeryczne.

Zalecane jest stosowanie zaawansowanych i rozbudowanych modeli ośrodka gruntowego, uwzględniających zmianę parametrów materiałowych w zależności od stanu naprężeń i odkształceń. Należy weryfikować opracowane modele numeryczne na podstawie oceny zgodności wyników obliczeń z wartościami rzeczywistymi. Jako punkt odniesienia należy wykorzystywać dane pochodzące z monitoringu geotechnicznego.

PIŚMIENNICTWO

- Barański, M., Popielski, P., Szczepański, T. (2008). Analiza numeryczna odprężenia gruntu w głębokich wykopach ze względu na sżywność. *Czasopismo Techniczne, Środowisko*, 3, WPK, Kraków.
- 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.
- 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 Politechniki Warszawskiej, Środowisko*, 61, OWPW, Warszawa.

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.

Truty, A., Podleś, K. (2010). Zastosowanie modelu Hadrening Soil-Small do analizy problemów interakcji konstrukcji budowlanych z podłożem. *Czasopismo Techniczne 1-S*, 16, 117–134.

Zsoil Manual Data Preparation & Tutorial, Z_SOIL PC v 2014 (2014). Zace Services, Lousanne.

NUMERICAL ANALYSIS OF DEEP FOUNDATION BUILDINGS IN THE WARSAW AREA

Abstract. The article presents the possibility of using numerical analysis in the context of the deep foundations of buildings in the Warsaw area. Complicated ground conditions in the Warsaw area were discussed briefly. The paper proposes a guidelines for construction of numerical models and numerical calculations. Many factors affecting on the numerical calculations results were presented. The necessity of calibration performing in relation to the numerical models was discussed. Based on the presented examples and analyzes, the final conclusions were formulated.

Key words: deep foundations, geotechnics, numerical modeling

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: Popielski, P., Smoliński, B., Kasprzak, A. (2016). Numeryczna analiza głęboko posadowionych obiektów w rejonie Warszawy. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 103–110.