

Analiza wstecz w praktycznych zagadnieniach posadowienia budowli przy wykorzystaniu pakietu HYDRO-GEO

# Wyznaczanie wzmocnionych parametrów podłoża

Paweł Popielski<sup>1</sup>

## Możliwości praktycznego zastosowania pakietu HYDRO-GEO

HYDRO-GEO jest polskim programem [1] wykorzystującym metodę elementów skończonych do analizy problemów geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska. Jest on rozwijany od końca lat 1970. na Politechnice Warszawskiej, przy współpracy Politechniki Śląskiej i Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW. Program HYDRO-GEO daje bardzo szerokie możliwości numerycznej analizy zachowania się konstrukcji geotechnicznych i hydrotechnicznych. Może być wykorzystywany do analizy przemieszczeń i wytrzymałości konstrukcji, takich jak: fundamenty pod różnego rodzaju konstrukcje (zbiorniki, maszyny, budynki), mury oporowe, zapory ziemne i betonowe, wykopy, tunele, skarpy i nasypy. Metoda elementów skończonych jest stosowana tam, gdzie zawodzą tradycyjne sposoby obliczenia nośności granicznej czy osiadania konstrukcji. Wzmocnienia konstrukcji, prognozowanie osiadań w skomplikowanych sytuacjach oraz na podatnych podłożach organicznych bądź konsolidujących glinach czy ilach, mogą być skutecznie analizowane za pomocą metody elementów skończonych.

Program HYDRO-GEO był z powodzeniem użyty do analizy wielu konstrukcji geotechnicznych, m.in. osiadań fundamentów pod turbogeneratory w elektrowni Połaniec, czy analizy muru oporowego w Czorsztynie-Niedzicy. Program stosowany był do modelowania awarii osadników odpadów przemysłowych w Skawinie, Połańcu, Stalowej Woli i Krasnymstawie. Ponadto za pomocą tego programu prowadzono obliczenia konsolidacji ilów i awarii składowiska węgla w elektrowni w Połańcu, filtracji wód gruntowych w rejonie składowiska odpadów chemicznych w Świętochłowicach.

Program daje duże możliwości modelowania zjawisk związanych z budową nasypów i obwałowań osadników przemysłowych. Wielokrotnie wykonywano obliczenia wieloetapowego wznoszenia lub poszerzania nasypów drogowych i obwałowań na podatnych konsolidujących podłożach organicznych.

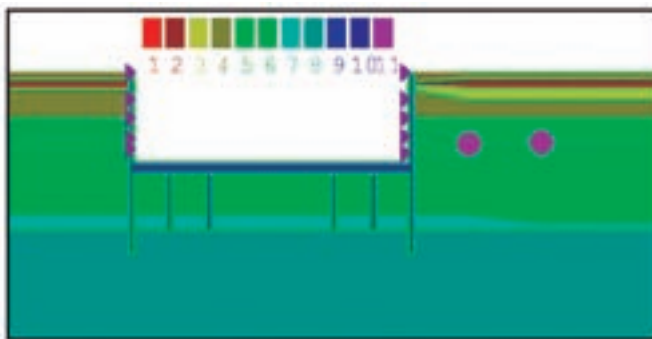
Istnieje możliwość uwzględniania efektów zamykania się porów w trakcie konsolidacji torfów czy glin, które powodują zmianę współczynnika filtracji, a w konsekwencji zmianę prędkości redystrybucji nadwyżki ciśnienia porowego.

HYDRO-GEO jest wykorzystywany do numerycznego modelowania posadowienia budynków wysokich w Warszawie (ryc. 1) oraz konstrukcji warszawskiego metra. W wykonywanych obliczeniach dotyczących głębokiego posadowienia budowli, oprócz wyznaczenia osiadań projektowanego obiektu, określane jest oddziaływanie na obiekty sąsiednie znajdujące się zarówno na powierzchni, jak i poniżej poziomu terenu.

Przykładem oddziaływania projektowanej konstrukcji na obiekty podziemne jest przypadek posadowienia budynku w bezpośrednim sąsiedztwie tuneli szlakowych metra. W analizie numerycznej [2] określono oddziaływanie budowanego obiektu przy uwzględnieniu współpracy ścian szczelinowych, płyty dolnej i baret. Wykonywano wariantową analizę, zmieniając długość ścian szczelinowych oraz długość i liczbę baret,

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; e-mail: pawel.popielski@is.pw.edu.pl.

w celu opracowania optymalnego układu do posadowienia budynku. Na rycinie 1 zaprezentowano przykładowe rozwiązanie w formie schematu stref materiałowych. Warunki brzegowe przyłożone do ścian szczelinowych wynikają z liczny stropów wykonywanych w trakcie modelowanej „podstropowej” realizacji obiektu.



Ryc. 1. Schemat stref materiałowych

Za pomocą programu HYDRO-GEO wykonano analizę wytrzymałościową kilkunastu zapór, w tym Włocławek, Besko, Dobczyce, Wisła, Dębe, Mietków, Jeziorsko, Jarnoltówek, Klimkówka i innych. Często w obliczeniach uwzględniano zmiany parametrów materiałowych wynikających np. z destrukcyjnego działania wody. Analiza numeryczna zachowania się zapory kamiennej przy zmiennych obciążeniach (napełnianie – opróżnianie zbiornika) z uwzględnieniem wyników badań geofizycznych jest przedstawiona w pracy [3]. W opracowaniu analizowano zmiany parametrów materiałowych konstrukcji i podłoża, mogące spowodować wzrost osiadań. Wykorzystano w tym celu tzw. analizę wstecz.

Program ma kilkadziesiąt instalacji w Polsce i kilka za granicą.

## Poprawa dokładności modelowania MES

Świadomość znaczenia przeprowadzonych obliczeń oraz wiarygodności niektórych dostępnych parametrów materiałowych sprawia, że w celu określenia deformacji w rejonie projektowanego obiektu należy zastosować odpowiednią, sprawdzoną metodę obliczeń. Wykorzystywana metoda powinna właściwie modelować rzeczywiste procesy i pozwalać na wykorzystanie obecnego stanu wiedzy dotyczącej zmian parametrów gruntowych. Winna mieć możliwość uwzględnienia różnych wariantów realizacji obiektu oraz wszystkich czynników decydujących w istotny sposób o przebiegu analizowanego procesu (np. zmiany poziomu wody gruntowej). Oddziaływanie głębokiego posadowienia jest jednym z bardzo aktualnych tematów, któremu zostały poświęcone prace [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Zagadnienie jest bardzo istotne, ponieważ w centrum miasta, w gęstej i często starej zabudowie, pojawiają się, i będą się pojawiały, coraz to nowe inwestycje, nierzadko o kilkukondygnacyjnej części podziemnej [10, 11]. Wykonywane obiekty mają wpływ nie tylko na zabudowę znajdującą się na powierzchni

terenu, lecz również na budowie podziemne, takie jak tunele i stacje komunikacyjne. Ponadto w zurbanizowanym terenie znajduje się dużo innej infrastruktury, wrażliwej na przemieszczenia, które może wywołać realizacja głębokiego posadowienia obiektu. Określenie oddziaływań pomiędzy posadowieniem głębokim wznoszonej budowli a sąsiednią zabudową lub infrastrukturą podziemną, jest często wymagane nie tylko w procesie projektowym, ale również w procedurze uzyskania pozwolenia na budowę. W przypadku skomplikowanej geologii podłoża oraz przy analizie posadowienia obiektu zakładającego współpracę obudowy wykopu, płyty dennej i innych elementów konstrukcyjnych, jak baretę lub pale, jedyną możliwością określenia wzajemnych oddziaływań jest przeprowadzenie symulacji numerycznej.

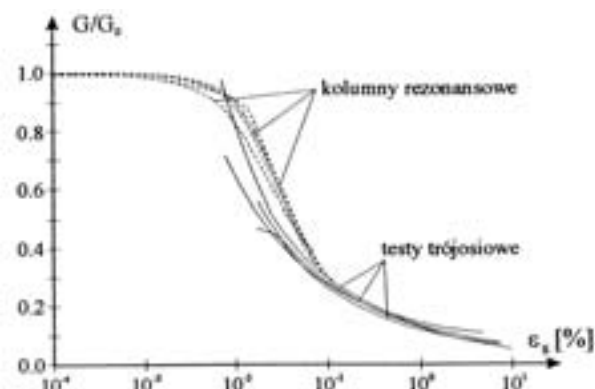
Do przeprowadzenia symulacji jest niezbędnie posiadanie specjalistycznych programów komputerowych. Wiele z nich jest szeroko dostępnych. Jednak czy samo posiadanie oprogramowania wystarczy?

Wykonanie analizy numerycznej oddziaływania głębokiego posadowienia budynku jest zadaniem uwarunkowanym przez wiele czynników. Jakość przeprowadzonych obliczeń zależy od poprawnej i dokładnej dyskretyzacji schematu obliczeniowego oraz od przyjętych parametrów ośrodka gruntowego. Do współpracy z posadowieniem włączone jest podłoże gruntowe na znacznej głębokości (najczęściej przekraczającej głębokość odwiertów wykonanych w trakcie rozpoznania geologicznego). Doświadczenia wskazują, że od warstw położonych głębiej można oczekiwać „mocniejszych” materiałów (o wyższych parametrach), np. na skutek większego wpływu prekonsolidacji. W miarę zagłębiania się pod poziomem posadowienia budynku będą występowały coraz mniejsze odkształcenia.

Obecny stan wiedzy w zakresie omawianego tematu został wyczerpująco omówiony w raporcie końcowym [12] z realizacji projektu badawczego KBN nr 7 T07E 023 19. Oddziaływanie głębokiego posadowienia na zabudowę sąsiednią nie jest nowym problemem [13, 14], zazwyczaj jednak analizowany jest wpływ na obiekty znajdujące się na powierzchni terenu oraz obudowę wykopu (np. ściany szczelinowe). Dodatkowo w trakcie realizacji posadowienia głębokiego i późniejszej eksploatacji obiektu, następują zmiany w warunkach wodno gruntowych [15]. Analiza ich wpływu ma bardzo duże znaczenie.

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.

Badania prezentowane w pracy [16] wskazują, że dla tzw. małych odkształceń wartości modułów sprężystych są większe niż dla zakresu dużych odkształceń. Zmienność znormalizowanego siecznego modułu ścinania z odkształceniem postaciowym na podstawie pracy [17] prezentuje rycina 2.



Ryc. 2. Krzywa zmienności znormalizowanego siecznego modułu ścinania z odkształceniem postaciowym

Sondowania CPT i DTM wykazują znaczny wzrost parametrów odkształceniowych ze wzrostem głębokości, prezentowane

np. w pracy [16]. Jednak, jak można wywnioskować z pracy [17], trudne jest znalezienie korelacji pomiędzy wartościami uzyskanymi z sondowań gruntów w terenie a parametrami geotechnicznymi (np.  $\phi$ ,  $c$ ,  $E$ ). Profesjonalnie przeprowadzone badania polowe dla tego samego ośrodka, z wykorzystaniem różnych zaawansowanych metod, nie zawsze prowadzą do zgodnych wartości parametrów gruntowych.

#### Analiza wstecz – wykorzystanie istniejącego monitoringu

W obliczeniach numerycznych w oparciu o teorię małych odkształceń czasami stosuje się wzmocnienie parametrów dla warstw gruntu zalegającego głęboko. Najczęściej realizuje się to przez uproszczone wydzielenie poziomych, dodatkowych warstw materiałów.

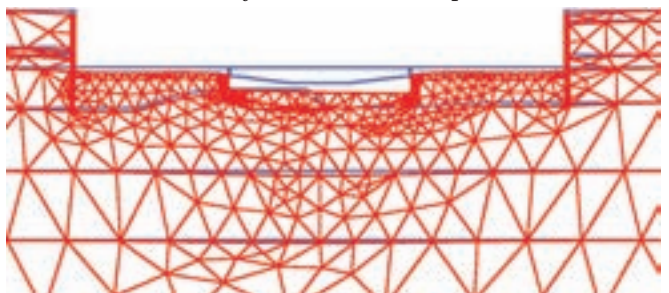
Wyznaczenie modułów sprężystości dla małych odkształceń można wykonać metodami geofizycznymi, np. za pomocą mikrosond lub badając zależność odkształcenie – naprężenie w aparacie trójosiowego ściskania ze specjalnym pomiarem elementami piezoelektrycznymi w zakresie małych odkształceń. W Polsce techniki te są stosowane głównie w badaniach naukowych. Niestety bardzo rzadko stosuje się je do inżynierskiego rozpoznania warunków gruntowych. Wartości modułów wyznaczone metodami geofizycznymi są kilkukrotnie większe od wyznaczonych na podstawie normy PN-81/B-03020 [20]. Są one najczęściej zdecydowanie większe od wyznaczonych na podstawie tradycyjnych sondowań.

Wykonując analizę wstecz, zgodność wyliczonych i pomierzonych wartości osiadań, otrzymuje się dla modeli numerycznych przy kilkukrotnie wzmocnionych modułach sprężystości warstw poniżej poziomu posadowienia. Wykonanie analizy wstecz można utożsamiać z tarowaniem modelu numerycznego.

Pierwsze praktyczne wykorzystanie analizy wstecz wykonanej za pomocą pakietu HYDRO-GEO miało miejsce przy obliczeniach dotyczących budynku Reform Plaza [12]. Budynek był wznoszony w latach 1997–1998. W trakcie jego realizacji wykonywano systematyczne pomiary przemieszczeń budynku, jak i otaczających terenów. Na podstawie analizy pomierzonych przemieszczeń budynku Reform Plaza [21] wyznaczono parametry podłoża, dla których uzyskano zgodność wyników obliczeń z pomiarami osiadań.

Następnie w 1999 r. w obliczeniach dotyczących osiadań budynku TUiR WARTA wykorzystano nabyte doświadczenia i wyniki analizy wstecz. Budynek znajduje się w sąsiedztwie Reform Plaza po drugiej stronie Al. Jerozolimskich. Już na etapie przygotowywania modelu numerycznego w podłożu budynku wydzielono dodatkowe warstwy gruntu o zwiększonej sztywności. Parametry materiałowe ustalono korzystając z badań geologicznych i przeprowadzonej wcześniej analizy wstecz. Następnie po uzyskaniu wyników przemieszczeń płyty dolnej zmodyfikowano wartości parametrów i przeprowadzono weryfikację obliczeń numerycznych. Schemat deformacji dylatowanej płyty fundamentowej (skala skażona) z wyraźnie widocznymi poziomymi warstwami podłoża przedstawia rycina 3.

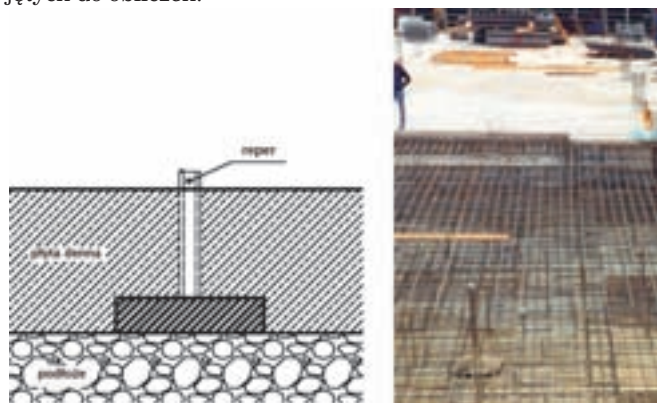
Obserwacje osiadań budynków wysokich w Warszawie Reform Plaza, TUiR WARTA, PPL LOT, PPPL i innych wskazują, że osiadania są dużo mniejsze od wyliczonych z zastosowaniem tradycyjnie wyznaczanych modułów sprężystości. W analizie numerycznej osiadań wyżej wymienionych budynków [22, 23, 24] zastosowano zmodyfikowane wartości parametrów.



Ryc. 3. Schemat deformacji dylatowanej płyty fundamentowej

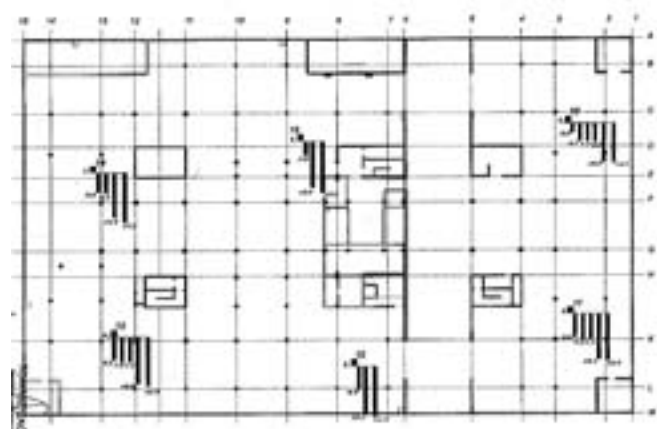
Znając obciążenie działające na obiekt w wybranym etapie budowy i dysponując pomierzonymi wartościami przemieszczeń, można, wykonując analizę wstecz, oszacować parametry materiałów znajdujących się poniżej poziomu posadowienia. Jako wyjściowe należy stosować parametry wynikające z badań geologicznych w wydzielonych strefach materiałowych opisanych przez geometrię modelu. Tak przeprowadzone obliczenia pozwolą na wyznaczenie uśrednionych wartości modułów sprężystości podłoża.

Doświadczenia z innych obiektów wskazują, że wyznaczone za pomocą analizy wstecz moduły sprężystości obciążone są małym błędem, co daje możliwość dokładniejszej prognozy przemieszczeń. Bardzo dobrze, jeżeli jest możliwe uzyskanie wyników przemieszczeń dla jednoznacznie określonych obciążeń, np. wykonania płyty fundamentowej obiektu. Jest to możliwe wtedy, gdy na dnie wykopu fundamentowego, przed wykonaniem płyty dennej (na warstwach chudego betonu i izolacji) zostaną zainstalowane odpowiednie repery (ryc. 4). Przykład reperu dającego możliwość weryfikacji obliczeń, zainstalowanego przed wylaniem płyty dennej, jest przedstawiony na rycinie 5. Gdy są znane pomiary przemieszczeń po wylaniu płyty fundamentowej, w celu zapewnienia maksymalnej wiarygodności należy dokonać weryfikacji parametrów materiałowych przyjętych do obliczeń.



Ryc. 4. Repery na dnie wykopu fundamentowego  
Ryc. 5. Przykład zainstalowanego reperu

Omawiana metoda została zastosowana z bardzo dobrymi rezultatami na kilku realizowanych obiektach. Mapę przemieszczeń pionowych w trakcie realizacji biurowca PLL LOT dla omawianych reperów, na tle rzutu płyty fundamentowej prezentuje rycina 6.



Ryc. 6. Mapa przemieszczeń pionowych w trakcie realizacji biurowca PLL LOT z uwzględnieniem reperów

Przy wykonywaniu pomiarów osiadań płyty dolnej należy przestrzegać następujących zasad:

- bezpośrednio przed wykonaniem płyty fundamentowej powinno się zainstalować 6–8 reperów, pozwalających na kontrolę osiadań pod wpływem wylewania płyty dolnej;

- w zależności od zastosowanej izolacji przeciwwodnej właściwe jest wykonanie reperu z dwuteownika stalowego, mosiężnego bądź stali nierdzewnej;
- reper składa się z dwuteownika oraz z metalowej podstawy. W trakcie montażu podstawa jest zalana warstwą betonu. Schemat reperu jest przedstawiony na rycinie 4;
- repery należy zainstalować na warstwie chudego betonu, nad izolacją w trakcie wykonywania zbrojenia płyty;
- w trakcie ustawiania trzeba unikać naruszenia izolacji płyty dolnej;
- pierwszy pomiar powinno się wykonać po zakończeniu prac związanych ze zbrojeniem płyty, bezpośrednio przed wylewaniem betonu;
- repery należy odpowiednio zabezpieczyć w trakcie wylewania płyty tak, aby nie uległy zniszczeniu, np. osłonić w rurze z PCV;
- repery nie mogą być zlokalizowane w miejscu baret;
- po wykonaniu płyty dolnej należy zainstalować na niej repery i również włączyć je do cyklu pomiarowego.

Zamontowanie reperów do pomiaru przemieszczeń płyty dolnej pozwala na stosunkowo wczesną (na początku realizacji obiektu) i skuteczną weryfikację danych. Można również wykonać analizę wstecz przed rozpoczęciem inwestycji, na podstawie próbnego obciążenia głębokich warstw gruntu. Wykonuje się takie doświadczenie w specjalnej odkrywce na znacznej głębokości. Przykład takiej realizacji (obciążenia próbne w szybach o głębokości do 25 m) jest opisany w archiwalnej pracy [25].

W innych przypadkach należy wykorzystać dane uzyskane z monitoringu przemieszczeń w innych etapach wykonywania obiektu. Takie doświadczenie numeryczne przeprowadzono dla stacji metra A17 i opisano w pracy [26]. Zadanie było ważne m.in. dlatego, że na konstrukcji stacji w przyszłości ma być wykonany 10-piętrowy wieżowiec.

W trakcie opracowywania projektu posadowienia stacji metra A17, założenia techniczne były kilkakrotnie modyfikowane. Przykłady kolejnych wersji projektu i wykonanych do nich dyskretyzacji zostały przedstawione na rycinach 7–10.

Przedstawione poniżej dwa modele numeryczne dotyczą tego samego przekroju hydrogeologicznego (Z 157+65) zlokalizowanego w północnym odcinku stacji. Modele różnią się przyjętymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi:

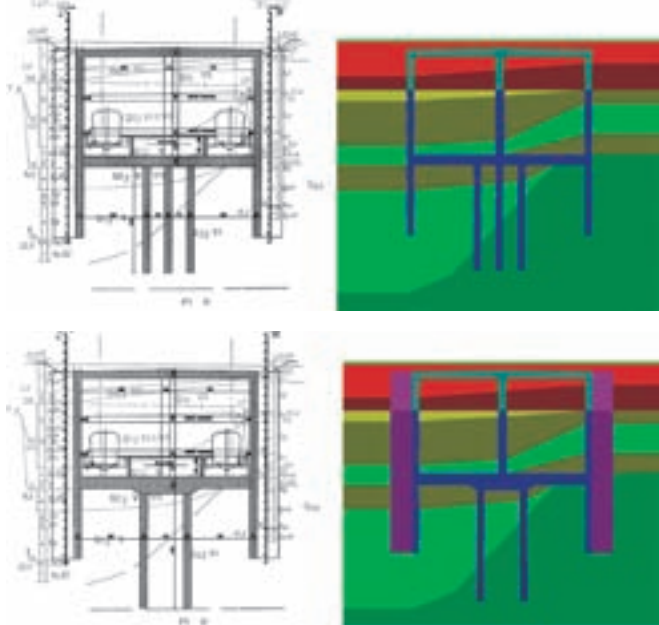
- model nr 1 – pod płytą fundamentową grubości 120 cm przewidziano „skrzynię” fundamentową w postaci trzech ciągów baret grubości 80 cm i rozstawie w osiach 250 cm. Głębokość posadowienia baret przewidziano na 12 m poniżej spodu płyty fundamentowej;
- model nr 2 – pod płytą fundamentową pogrubioną w części środkowej o dodatkowe 65 cm przewidziano skrzynię fundamentową w postaci dwóch ciągów baret grubości 80 cm i rozstawie w osiach 500 cm. Głębokość posadowienia baret przewidziano na 13 m poniżej spodu pogrubionej płyty dennej (o grubości 185 cm).

Modele ośrodka gruntowego przyjęto jako sprężysto-plastyczne, w oparciu o warunek plastyczności Columba – Mohra. Założono nieściśliwość materiałów w plastycznym zakresie ich pracy. Dyskretyzacji modelu dokonano stosując sześciowęzłowe izoparametryczne elementy trójkątne. Uwzględniono poziom wody gruntowej na podstawie aktualnych badań terenowych. Analiza została wykonana w tzw. naprężeniach efektywnych. Celem analizy wstecz była weryfikacja przyjętych do obliczeń parametrów materiałowych. Proces ten przeprowadzono na podstawie istniejącego monitoringu przemieszczeń.

#### Wpływ na przemieszczenia tuneli szlakowych metra i stacji A17

Parametry początkowe gruntów przyjęto w oparciu o dokumentację geologiczno-inżynierską oraz opracowanie *Analiza osiadań konstrukcji metra „Dworzec Gdański”* [27]. 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 mode-

lu numerycznego. Zwiększając wartość modułów sprężystości w kolejnych przybliżeniach, opierano się o założenia teorii tzw. małych odkształceń, dla których wartości modułów sprężystych są większe niż dla zakresu dużych odkształceń [np. 16]. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 1. Zmiana sztywności dotyczyła tylko materiałów znajdujących się w strefie małych odkształceń, tj. poniżej 1 E-04. W kolumnie *Opinia geotechniczna* prezentowane są wartości wykazane w wykonanym rozpoznaniu geologicznym, w kolumnie *Metoda porównawcza* przedstawiono wartości wykorzystane przez autorów opracowania [27] na podstawie doświadczenia przy realizacji podobnych obiektów. W kolumnie trzeciej zestawiono natomiast wartości uzyskane za pomocą analizy wstecz. Trzeba zaznaczyć, że wartości uzyskane za pomocą analizy wstecz nie uwzględniają osiadania na skutek konsolidacji podłoża, a także wynikających z pełzania gruntu (odkształceń reologicznych).



Ryc. 7–10. Kolejne wersje projektu posadowienia stacji metra A17 w Warszawie i wykonanych do nich dyskretyzacji

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 plicieńskie	26 000	150 000	210 000

Tab. 1. Zmiany wartości modułu sprężystości wybranych warstw gruntów

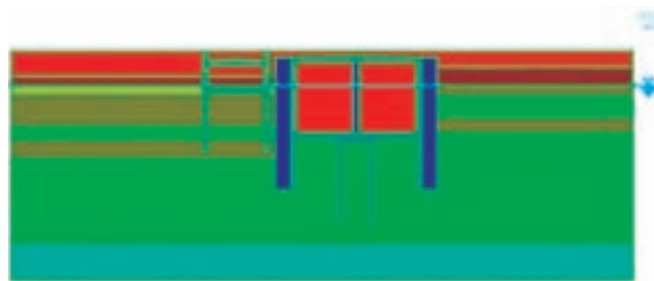
Wykorzystując parametry materiałowe uzyskane za pomocą analizy wstecz, wykonano obliczenia porównawcze dla poszczególnych modeli numerycznych, w tym dla modelu nr 2, który odwzorowuje przyjęty docelowo schemat posadowienia północnej części stacji metra. Wykonane obliczenia potwierdziły słuszność rozwiązania konstrukcyjnego wykorzystanego do posadowienia północnej części stacji A17.

„Ręczna” modyfikacja zmieniających się założeń, polegająca na przebudowie modelu numerycznego, jest bardzo czasochłonna. W obecnym stopniu skomputeryzowania prac projektowych celowe wydaje się zintegrowanie narzędzi do dyskretyzacji modelu i przygotowania danych z systemami CAD-owskimi i elektronicznymi bazami danych parametrów materiałowych. Bazy danych parametrów mają szczególne znaczenie w przypadku pozyskiwania danych weryfikujących parametry materiałowe po przeprowadzeniu analizy wstecz z wykorzystaniem danych z monitoringu wykonanych obiektów.

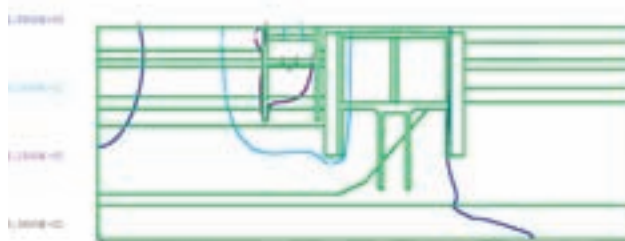
Potwierdzeniem celowości gromadzenia weryfikowanych danych może być wykorzystywanie ich w kolejnych obliczeniach. W centrach miast, w rejonie istniejących obiektów pojawiają się nowe. Niezbędne jest określenie ich wpływu na istniejące obiekty znajdujące się na powierzchni terenu, ale również pod ziemią. Takim przykładem jest przypadek projektowanego przejścia podziemnego, łączącego stację metra A17 „Dworzec Gdański” z dworcem PKP Warszawa Gdańska i Żoliborzem. W ramach wykonywanej analizy [28], w celu określenia wpływu na przemieszczenia tuneli szlakowych metra oraz stacji A17 „Dworzec Gdański”, wykorzystano parametry zweryfikowane kilkanaście miesięcy wcześniej w obliczeniach dotyczących stacji A17.

Projektowane przejście podziemne zaczyna się w połowie długości stacji, przed częścią przeznaczoną do posadowienia kilkunadcondygnacyjnego budynku. Przejście jest zlokalizowane wzdłuż zachodniej ściany stacji A17 i następnie wzdłuż zachodniego tunelu metra w kierunku północnym. Konstrukcyjnie jest to tunel o przekroju prostokątnym i szerokości 9 m. Projektowane jest wykonanie przejścia w technologii ścian szczelinowych, które docelowo będą stanowiły ściany obiektu. Przyjęto do obliczeń ściany szczelinowe o grubości 80 cm, strop tunelu o grubości 80 cm oraz płytę dolną o grubości 100 cm. Do wykonania przejścia przewidywana jest metoda podstropowa.

Schematy stref materiałowych w rejonie stacji A17 przedstawiono na rycinie 11. Na rycinie 12 przedstawiono wyniki analizy numerycznej w formie izolinii przemieszczeń pionowych, kreślonych co 0,001 m na tle konturów stref materiałowych.



Ryc. 11. Schematy stref materiałowych w rejonie stacji A17



Ryc. 12. Wyniki analizy numerycznej w formie izolinii przemieszczeń na tle konturów stref materiałowych w rejonie stacji A17

Podstawę warsztatu naukowego wszystkich omawianych przykładów stanowi metoda elementów skończonych, pozwalająca na rozwiązanie zadanego zagadnienia początkowo-brzegowego [29]. Do tego celu zostało wykorzystane oprogramowanie zawarte w pakiecie HYDRO-GEO [1].

## Wnioski

1. Obliczenie osiadań wysokich budynków wraz z otaczającym je gruntem jest zadaniem uwarunkowanym przez wiele elementów.
2. Do współpracy z posadowieniem włączone jest podłoże gruntowe na znacznej głębokości (najczęściej przekraczającej głębokość rozpoznania geologicznego). Doświadczenia wskazują, że od warstw położonych głębiej można oczekiwać mocniejszych materiałów (o wyższych parametrach) na skutek np. większego wpływu prekonsolidacji.
3. Wyniki obliczeń numerycznych są uzależnione od rozpoznania geologicznego i poprawnych wartości parametrów.
4. W wielu przypadkach parametry materiałowe wyznaczone są metodami uproszczonymi, powodującymi zaniżenie ich wartości.
5. Przy praktycznych zagadnieniach posadowienia budowli należy zweryfikować wyniki obliczeń na podstawie wartości pomierzonych przemieszczeń.
6. Analiza wstecz na podstawie istniejącego monitoringu przemieszczeń pozwala przy założeniu teorii małych deformacji, na wyznaczenie wzmocnionych parametrów gruntowych.
7. Zmodyfikowanie wartości parametrów materiałowych pozwalają na weryfikację obliczeń numerycznych.
8. Parametry wyznaczone na podstawie analizy wstecz są kilkukrotnie większe w odniesieniu do przyjętych na podstawie badań uproszczonych i norm.
9. Realizacja głębokiego posadowienia jest procesem złożonym i wymaga współdziałania specjalistów wielu dziedzin techniki budowlanej.

## Literatura

1. Dłużewski J.: *HYDRO-GEO: program elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska*. Oficyna wydawnicza PW. Warszawa 1997.
2. Popielski P.: „Model numeryczny do analizy przemieszczeń podłoża spowodowanych budową budynku przy ul. Żurawiej przy uwzględnieniu współpracy ścian szczelinowych, płyty dolnej i baret. Określenie wpływu na przemieszczenia tuneli szlakowych metra” (mps). Biuro Projektów Konstrukcji Budowlanych KIP sp. z o.o. Warszawa 2003.
3. Dłużewski J., Popielski P.: *Analiza numeryczna zachowania się zapory kamiennej przy zmiennych obciążeniach (napętnianie zbiornika) z uwzględnieniem wyników badań geofizycznych*. Geotechnika. Warszawa lipiec 2000.
4. *Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów*. Instrukcja ITB. „Instrukcje, wytyczne, poradniki” 2002, nr 376.
5. Michalak H., Pęski S., Pyrak S., Szulborski K.: *O wpływie wykonywania wykopów głębokich na zabudowę sąsiednią*. „Inżynieria i Budownictwo” 1998, nr 1.
6. Siemińska-Lewandowska A.: *Głębokie wykopy w miastach na przykładzie metra warszawskiego*. Seminarium: Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich. Warszawa 19 listopada 2002. Materiały seminaryjne, s. 95–114.
7. Szulborski K.: *Awarie budowlane związane z głębokimi posadowieniami*. Seminarium: Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich. Warszawa 19 listopada 2002. Materiały seminaryjne, s. 77–94.
8. Wysokiński L., Kotlicki W., Motak E.: *Zagadnienia geotechniczne w realizacji inwestycji w gęstej zabudowie*. „Inżynieria i Budownictwo” 1999, nr 10.
9. Wysokiński L., Kotlicki W.: *Ochrona obiektów budowlanych w otoczeniu głębokich wykopów*. „Materiały Budowlane” 2003, nr 3.
10. Dłużewski J.: *Analiza numeryczna współpracy ścian szczelinowych z płytą dolną i podłożem gruntowym*. „Inżynieria i Budownictwo” 1997, nr 3.
11. Szulborski K., Michalak H., Pęski S., Pyrak S.: *Doświadczenia z realizacji budynku wysokiego Reform Plaza w Warszawie*. „Inżynieria i Budownictwo” 1999, nr 7–8.
12. Dłużewski J. et al.: *Posadowienie głębokie w ujęciu metody elementów skończonych. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego KBN nr 7 T07E 023 19*. Warszawa 2002.
13. Michalak H., Pęski S., Pyrak S., Szulborski K.: *O diagnostyce zabudowy usytuowanej w sąsiedztwie głębokich wykopów*. „Inżynieria i Budownictwo” 1998, nr 6.
14. Wierzbicki S., Kłociński B., Juszcak L.: *Zastosowanie ścian szczelinowych do obudowy wykopów w sąsiedztwie obiektów istniejących*. „Inżynieria i Budownictwo” 1992, nr 6.
15. Pęski S., Dawidowski S.: *Problemy realizacji głębokich wykopów i zmian stosunków wodnych na przykładzie budynku TP SA*. Seminarium: Głębokie wykopy na terenach wielkomiejskich. Warszawa 19 listopada 2002. Materiały seminaryjne, s. 115–123.
16. Satoru S.: *Elastic deformation properties of geomaterials. Soil and Foundations*. “Journal of the Japanese society of Soil Mechanics and Foundation Engineering” 1992, no. 3, Sept., Vol. 32, pp. 23–46.
17. Georgiannou V.N., Rampello S., Silvestri F.: *Static and Dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays*. Proc. 10<sup>th</sup> Firenze 1991, Vol 1 pp., 91–95.
18. Woski W., Fürstenberg A., Sorbjan P., Skutnik Z.: *Wpływ warunków geotechnicznych na rozwiązania fundamentów hotelu Hyatt w Warszawie*. „Materiały Budowlane” 2003, nr 3.
19. Wysokiński L.: *Badania geotechniczne do projektowania i wykonywania głębokich wykopów budowlanych*. „Materiały Budowlane” 2003, nr 3.
20. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
21. Dłużewski J., Popielski P.: *Przemieszczenia reperów na budynku Reform Plaza (obserwacje pierwotne 11.03.1997 – obserwacje końcowe 23.07.1998)*. Warszawa lipiec 1998.
22. Dłużewski J., Popielski P.: *Analiza osiadań posadowienia budynku TUiR WARTA przy ul. Chmielnej 85/87; Geotechnika – Janusz Dłużewski*. Warszawa marzec 2000.
23. Dłużewski J., Popielski P.: *Analiza osiadań posadowienia budynków PPL LOT i PP Porty Lotnicze przy ul. 17 Stycznia w Warszawie za pomocą metody elementów skończonych*. Warszawa marzec 2000.
24. Dłużewski J., Popielski P.: *Współczynniki sprężystego oporu gruntów wyznaczone na podstawie pomiarów osiadań reperów oraz analiza osiadań posadowienia budynków PPL LOT i PP Porty Lotnicze przy ul. 17 Stycznia w Warszawie za pomocą metody elementów skończonych*. Warszawa wrzesień 2000.
25. Wilun Z.: *Badania geotechniczne podłoża Pałacu Kultury i Nauki w Warszawie*. „Inżynieria i Budownictwo” 1955, nr 7.
26. Chmielewski A., Dąbrowski H., Popielski P., Stankiewicz G., Zalewski P.: *Modele numeryczne konstrukcji posadowienia stacji metra A17 „Dworzec Gdański”*. Konferencja Naukowo-Techniczna: Metody numeryczne do projektowania i analizy konstrukcji hydrotechnicznych. Korbiewów 2004. Materiały konferencyjne.
27. Dłużewski J.M., Grabowski Z., Siemińska-Lewandowska A.: *Analiza osiadań konstrukcji metra „Dworzec Gdański”*. Geotechnika – Janusz Dłużewski. Warszawa 2001.
28. Popielski P.: *Modele numeryczne do analizy przemieszczeń podłoża spowodowanych budową przejścia podziemnego, łączącego stację metra z A17 „Dworzec Gdański” ze stacją PKP Warszawa Gdańska i Żoliborzem. Określenie wpływu na przemieszczenia tuneli szlakowych metra i oraz stacji A17 „Dworzec Gdański”. Etap 1” (mps). Biuro Projektów Konstrukcji Budowlanych KIP sp. z o.o. Warszawa 2003.*
29. Zienkiewicz O.C.: *Metoda elementów skończonych*. Arkady. Warszawa 1972.



GSI jest producentem systemu iniekcyjnych mikropali, kotew i gwoździ gruntowych znajdujących szerokie zastosowanie w geotechnice i tunelarstwie, jako sprawdzone elementy do zabezpieczenia zboczy oraz wykopów, stabilizacji skarp, czy też tworzenia obudowy kotwiowej w tunelach.



Posiadamy aprobatę techniczną IBDiM o nr AT/2004-041781 w zakresie stosowania w/w elementów systemu do rozwiązań tymczasowych oraz trwałych.

**Gonar Systems International**

40-833 Katowice, ul. Obroki 109

Sekretariat:

tel.: +48 32 20 71 201, fax: +48 32 20 71 250

e-mail: [gsi@gonar.com.pl](mailto:gsi@gonar.com.pl)

Dział Handlowy:

tel.: +48 32 20 71 295, tel.: +48 32 20 71 220,

fax: +48 32 20 71 296

e-mail: [gsi.maltazar@gonar.com.pl](mailto:gsi.maltazar@gonar.com.pl)