

Projektowanie z wykorzystaniem modelowania numerycznego

na przykładzie
wzmocnienia gruntu
metodą CDMM

Narzędzie TFoW zamontowane na maszynie palownicy

W maju 2018 r. Biuro Inżynierskie Titan we współpracy z firmą Soley Sp. z o.o. rozpoczęło pracę nad przygotowaniem metodyki projektowania wzmocnienia gruntu pod obiektami inżynieryjnymi w formie paneli gruntobetonowych o kształcie rusztów wykonywanych metodą wglębnego mieszania na mokro (*continuous deep mixing method* – CDMM).

Cechą tej technologii jest zwiększona sztywność poprzeczna konstrukcji rusztu wzmocniającego dzięki ciągłości i połączeniu przecinających się paneli. Dodatkowo trójosiowy stan naprężenia zmobilizowany w gruncie zamkniętym wewnątrz obudowy z paneli jest korzystniejszy z punktu widzenia wytrzymałości oraz sztywności ośrodka gruntowego. Uchwycenie tych cech na etapie projektowania wymagało uwzględnienia trójwymiarowego charakteru pracy konstrukcji oraz zaawansowanego opisu stanu naprężenia i odkształcenia w ośrodku gruntowym. Stąd już na samym początku prac podjęliśmy decyzję o wykorzystaniu trójwymiarowego modelowania numerycznego na potrzeby projektowania wyżej opisanych konstrukcji.

Technologia

Formowanie w gruncie paneli w kształcie rusztu było możliwe dzięki autorskiemu urządzeniu (*Trenchmixing Front of Wall* – TFoW), opracowanemu w ramach prac badawczo-rozwojowych firmy Soley. W syntetycznej definicji

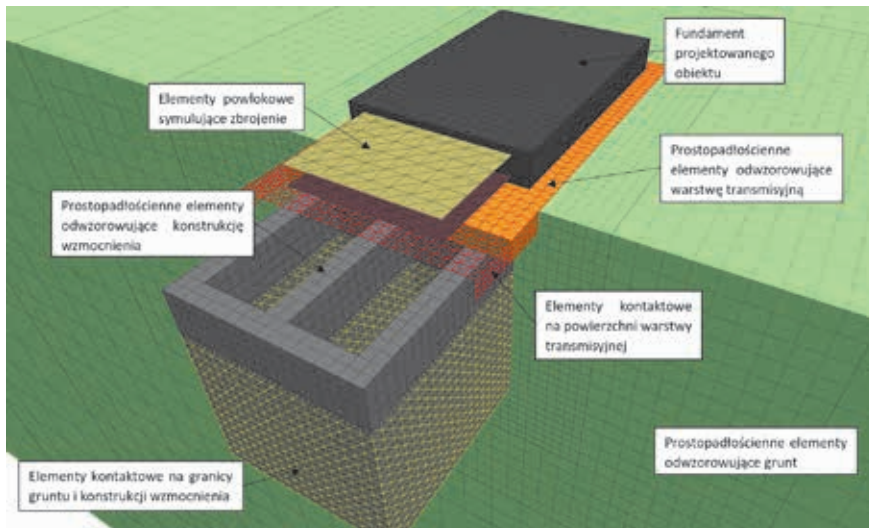
TFoW służy do wglębnego mieszania gruntu z zaczynem cementowym za pomocą prowadnicy zaopatrzonej w łańcuch o zamkniętym obwodzie z zainstalowanymi na nim ostrzami tnąco-mieszającymi. Narzędzie to, poruszając się po maszynie palownicy, zagłębia się pionowo w grunt z możliwością pracy wewnątrz lub na zewnątrz śladu gąsienicy. Duża prędkość łańcucha pozwala na dobre skrawanie i wymieszanie gruntu rodzimego z zaczynem cementowym oraz zhomogenizowanie mieszaniny i jej właściwości na całej głębokości ściany. Homogenizacja mieszaniny umożliwia dokładne zaprojektowanie składu mieszanki gruntobetonowej. Wykonanie i zbadanie próbek w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu wcześniej pobranych prób gruntu z miejsca planowanego wykonania paneli daje informacje na temat przewidywanych parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych samych paneli. Wykorzystanie różnych szerokości łańcucha pozwala na formowanie paneli o grubościach 40, 50 oraz 60 cm.

Model numeryczny

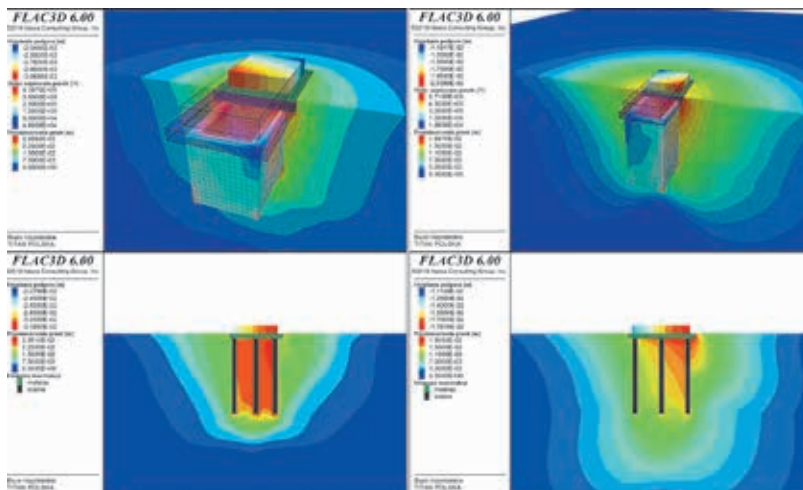
Obliczenia wykonano w programie FLAC3D (*Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*). Jest to oprogramowanie wykorzystujące modelowanie numeryczne dedykowane do analiz zagadnień z zakresu geotechniki i mechaniki skał. W obszarze zastosowań mieści się analiza stanu naprężenia i odkształcenia w gruncie, odwzorowanie interakcji gruntu z elementami konstrukcyjnymi, określenie wskaźnika stateczności skarp i zboczy, analiza wsteczna mająca na celu poznanie mechanizmów zniszczenia materiału, jak również szeroko pojęte prace badawcze i rozwojowe. Obliczenia w pro-



Wykonane wzmocnienie w formie rusztu z paneli gruntobetonowych



Elementy składowe modelu numerycznego



Przykładowe wyniki obliczeń

gramie wykonywane są według metody różnic skończonych w jawnym schemacie obliczeń.

Ośrodek gruntowy został odwzorowany prostopadłościennymi elementami o modelu konstytutywnym *plastic hardening*. Jest to nieliniowo sprężysto-plastyczny model ze wzmocnieniem i dwoma kryteriami wyężeniowymi: Coulomba – Mohra (CM) oraz maksymalnych odkształceń objętościowych. Model ten w swoich założeniach jest podobny do popularnego modelu *hardening soil*, spotykanego w programach MES dedykowanych geotechnice. Panele gruntobetonowe odwzorowano sprężysto-plastycznym modelem z kryterium wyężeniowym CM oraz maksymalną wartością wytrzymałości na rozciąganie. Kolejnymi elementami modelu był fundament obiektu oraz warstwa transmisyjna pomiędzy fundamentem a panelami gruntobetonowymi. Między wszystkimi elementami modelu o znacząco różniących się modułach odkształcenia (jak np. między panelami gruntobetonowymi a gruntem) wprowadzono elementy kontaktowe. Zbrojenie fundamentu odwzorowano dwuwymiarowymi elementami powłokowymi w formie dwóch płyt przy górnej i dolnej powierzchni fundamentu.

Kryterium zakończenia obliczeń było osiągnięcie stanu równowagi sił w elementach modelu (stosunek sił niezrów-

noważonych do wszystkich sił w modelu musiał być mniejszy niż $1e-5$) oraz brak przyrostu przemieszczeń fundamentu i paneli gruntobetonowych. W wyniku uzyskiwano wartości osiadania fundamentów posadowionych na wzmocnionym podłożu oraz maksymalne wartości naprężenia w gruncie i panelach gruntobetonowych, co pozwalało dobrać odpowiednią wytrzymałość paneli.

Definicja modelu zbudowana została w formie skryptu, gdzie poszczególne elementy, takie jak budowa geometrii modelu, przypisywanie parametrów gruntowych, wydzielenie elementów odpowiadających geometrii wzmocnienia, obciążenie fundamentu czy zapisywanie wyników, występowały w formie oddzielnych modułów. Takie podejście daje możliwość stałej rozbudowy i udoskonalania metodyki obliczeń, a także zautomatyzowania procesu generowania modelu. Przy powtarzalnym zadaniu, jak projektowanie wzmocnienia pod wieloma obiektami inżynierskimi, przekłada się to na znaczne oszczędności w czasie przeprowadzania analizy.

Automatyzacja

Zarówno na etapie przetwarzania danych wejściowych, budowy modelu numerycznego, jak i opracowania wyników posłużono się autorskimi skryptami napisanymi w języku programowania Python. Sparametryzowana geometria modelu numerycznego zależna była od wymiarów fundamentu i wzmocnienia, które mogły być podawane z poziomu tabeli programu Excel. Wyniki eksportowane były w formie map naprężeń i odkształceń, jak również w formie tabel. Dzięki temu planowane warianty obliczeń dla analizowanych obiektów można było kolejko-

Podsumowanie

Wykorzystanie trójwymiarowego modelowania numerycznego pozwoliło w dokładny sposób odwzorować charakterystykę pracy wzmocnienia gruntu w postaci rusztu z paneli gruntobetonowych. Dzięki sparametryzowaniu i automatyzacji budowy modelu numerycznego problem czasochłonności takich analiz został częściowo zniwelowany. Pozostała kwestia czasu samych obliczeń, jednak przy możliwości kolejkowania serwer obliczeniowy mógł być wykorzystany przez 24 godziny na dobę siedem dni w tygodniu, a generowane automatycznie arkusze z wynikami umożliwiały bieżącą weryfikację przyjętych danych. Do dzisiaj w ramach opisanej współpracy przeprowadziliśmy analizy dla ponad 250 obiektów, co przekłada się na imponującą liczbę ok. 1200 przeanalizowanych wariantów obliczeń. Bez wprowadzenia innowacyjnych procedur projektowych taka wydajność nie byłaby możliwa.

Więcej na www.bi.titan.com.pl

