

NUMERICAL ANALYSES OF THE EFFECTS OF TUNNELS CONSTRUCTION

by

Maciej Ochmański

Submitted to the Department of Geotechnics and Roads (SUT)
and Department of Civil and Mechanical Engineering (UCLAM)
in partial fulfillment of the requirements for the degree of

Doctor of Philosophy in Civil Engineering

at the

SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (SUT)
and
UNIVERSITY OF CASSINO AND SOUTHERN LAZIO (UCLAM)

March 2016

Author
Department of Geotechnics and Roads (SUT)
Department of Civil and Mechanical Engineering (UCLAM)

Certified by.....
Joanna Bzówka
Associate Professor (SUT)
Thesis Supervisor

Certified by.....
Giuseppe Modoni
Associate Professor (UCLAM)
Thesis Supervisor

Analizy numeryczne efektów budowy tuneli

Maciej Ochmański

Wydział Budownictwa. Katedra Geotechniki i Dróg (SUT)
Wydział Inżynierii. Katedra Inżynierii Lądowej i Mechanicznej (UCLAM)
2 marca 2016 r.

Abstrakt

Postępująca urbanizacja ośrodków miejskich wraz z rozwojem coraz bardziej efektywnych metod drążenia tuneli, wywiera wpływ na coraz większe wykorzystanie przestrzeni pod powierzchnią terenu. Proces drążenia tunelu oddziałuje na otaczające środowisko, w stopniu zależnym od zastosowanej technologii. Prowadzone analizy, pomimo wykorzystywanych w nich zaawansowanych modeli, w niewielu przypadkach są w stanie uwzględnić w kompleksowy i zadowalający sposób wszystkie czynniki związane z procesem drążenia tunelu. Prowadzi to do tego, że proces projektowania tuneli bazuje w głównej mierze na subiektywnych założeniach inżynierskich, bądź też na metodach empirycznych. Te wątpliwe podstawy analityczne prowadzą do tego, iż likwidowanie powstałych negatywnych skutków wywołanych budową tuneli w głównej mierze polega na zasadzie sprzężenia zwrotnego, tj. na wykorzystaniu informacji uzyskanych z pomiarów prowadzonych z wykorzystaniem zaawansowanych systemów monitoringu w celu doboru odpowiedniego środka zaradczego. Jest to tak zwana metoda obserwacyjna.

Teza rozprawy doktorskiej brzmi: “zaawansowane modelowanie numeryczne uwzględniające szczegóły technologiczne w różnych metodach drążenia tuneli, do tej pory zaniedbywane bądź uznawane za nieistotne, pozwala na bardziej realistyczne powiązanie skutków wywołanych budową tuneli z ich przyczynami, prowadząc do bardziej efektywnych rozwiązań projektowych, jak i wykonawczych.”

W rozprawie doktorskiej przedstawiono badania dotyczące skutków powstałych w wyniku drążenia tuneli przy wykorzystaniu różnych technologii, skupiając się na wpływie najbardziej istotnych parametrów technologicznych. W tym celu proces drążenia tunelu należało wiernie odtworzyć, wprowadzając modele pozwalające na symulację różnych aspektów technologicznych, np.: iniekcji w części ogonowej tarczy oraz procesu hydratacji zaczynu cementowego, lokalnego zbrojenie ośrodka gruntowego, urabiania gruntu itp. W rozprawie doktorskiej przedstawiono badania literaturowe, które skupiają się na opisie najczęściej stosowanych technologii, z podziałem na metodę konwencjonalną oraz metodę wykorzystującą zmechanizowane tarcze drążące. Przeprowadzono analizę danych doświadczalnych, bazując na wynikach badań laboratoryjnych oraz studiach przypadków, co pozwoliło na identyfikację mechanizmów zachodzących podczas drążenia tuneli. Następnie zwrócono uwagę na narzędzia służące do predykcji efektów wywołanych budową tuneli, przeprowadzając klasyfikację dostępnych metod służących

głównie do określania deformacji podłoża gruntowanego. Główną częścią rozprawy doktorskiej są analizy numeryczne, przeprowadzone przy wykorzystaniu programu Abaqus, który bazuje na Metodzie Elementów Skończonych. Autor wykonał symulacje numeryczne zachodzących podczas budowy tuneli mechanizmów dla dwóch różnych metod drążenia. Pierwsza to metoda konwencjonalna, która wykorzystuje wykonane w technologii iniekcji strumieniowej sklepienie wstępne, a druga to metoda wykorzystująca zmechanizowaną tarczę o wyrównanych ciśnieniach gruntowych (ang. [Earth Pressure Balance \(EPB\)](#)). W obu analizowanych przypadkach dane zostały zaczerpnięte z dwóch rzeczywistych tuneli: tunelu drążonego metodą konwencjonalną na przedmieściach Florencji we Włoszech oraz tunelu wydrążonego tarczą EPB w Bangkoku w Tajlandii. Przykłady te stanowią swoiste “benchmarki” czyli wzory do naśladowania, na podstawie których, dzięki danym dotyczącym podłoża gruntowego, parametrom związanym z technologią drążenia oraz pomierzonych na powierzchni terenu efektom, można było przeprowadzić weryfikację analiz numerycznych.

Na potrzeby wykonania analiz numerycznych zbudowano zaawansowane trójwymiarowe modele numeryczne, kładąc nacisk na możliwie najwierniejsze odwzorowanie procesów technologicznych dla każdej z metod drążenia. Model numeryczny dla tunelu drążonego metodą konwencjonalną uwzględnia m.in.: zbrojenie przodka tunelu w postaci kotew gruntowych, instalację każdej kolumny iniekcyjnej w odpowiedniej sekwencji tworząc sklepienie wstępne, urabianie gruntu, instalację obudowy tymczasowej oraz docelowej. Model numeryczny dla tunelu drążonego tarczą EPB uwzględnia wierne odwzorowanie tarczy drążącej, ciśnienia podparcia przodka, iniekcję wykonaną w części ogonowej tarczy, obudowę tunelu oraz system zaplecza. Ponadto, uwarstwienie podłoża gruntowego, warunki hydrodynamiczne oraz ciśnienie wody w porach gruntu dla warunków przepływu nieustalonego zostały zamodelowane przy zastosowaniu nieliniowego modelu sprzężonego. W analizach numerycznych do opisu ośrodka gruntowego wykorzystano trzy modele konstytutywne, charakteryzujące się różnym poziomem złożoności, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy wrażliwości otrzymanych wyników w zależności od zastosowanego modelu konstytutywnego. Dla materiałów scementowanych sztywność oraz wytrzymałość została uzależniona od przebiegu procesu hydratacji.

Dodatkowo, w przypadku analizy tunelu drążonego tarczą EPB, w języku programowania Fortran zaimplementowano kod, który pozwolił na uwzględnienie odkształceń nieodwracalnych pojawiających się podczas hydratacji iniekcji w części ogonowej tarczy. Aby przeprowadzić analizę parametryczną geometrii pustki, powstałej pomiędzy tarczą a otaczającym ją ośrodkiem gruntowym oraz ciśnienia podparcia przodka, w języku programowania Python został utworzony skrypt, który pozwolił na przyspieszenie procesu budowy modelu numerycznego. Stopień złożoności analizowanych modeli numerycznych wymagał dużej mocy obliczeniowej, co zostało spełnione przeprowadzając obliczenia na wysokiej klasy komputerze stacjonarnym oraz na jednym węźle klastra obliczeniowego HPC.

W rozprawie doktorskiej został przedstawiony pełny zakres wyników otrzymanych z przeprowadzonych analiz numerycznych, zwracając szczególną uwagę na deformacje powierzchni terenu oraz siły wewnętrzne w elementach konstrukcyjnych tunelu. Dzięki przeprowadzonym symulacjom numerycznym była również możliwa analiza zachodzących w ośrodku gruntowym i w elementach konstrukcyjnych mechanizmów, wywołanych drążeniem tuneli przy wykorzystaniu różnych technologii.

Wnioski z przeprowadzonych badań i analiz numerycznych oraz propozycje dalszych badań przedstawiono w zamykającym pracę rozdziale siódmym.

Promotor: Joanna Bzówka

Tytuł naukowy: dr hab. inż., prof. SUT

Promotor: Giuseppe Modoni

Tytuł naukowy: dr hab. inż., prof. UCLAM