Prof. Giulia VIGGIANI
Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ingegneria Informatica
Università di Roma Tor Vergata
Via del Politecnico 1
00133 Rzym WŁOCHY

Rzym, 9 maja 2016

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Ochmańskiego
pt. *„Numerical Analyses of the effects of tunnels construction – Analizy numeryczne efektów budowy tuneli"*

1. Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Niniejsza recenzja rozprawy doktorska Macieja Ochmańskiego pt. „Numerical analyses of the effects of tunnels construction" została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Pana Profesora Jana Ślusarka, wyrażoną w piśmie zgodnie z stosowną uchwałą Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej z dnia 16 marca 2016 roku.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy opracowania procedur numerycznych mających na celu przeprowadzenie symulacji procesu drążenia tuneli metodą konwencjonalną i metodą wykorzystującą zmechanizowaną tarczę drążącą.

Rosnące zapotrzebowanie na transport publiczny, usługi oraz sieci uzbrojenia terenu wymagają budowy coraz większej liczby tuneli na terenach silnie zurbanizowanych. Przemieszczenia podłoża gruntowego wywołane tunelowaniem, przekazywane na fundamenty istniejących obiektów mogą przejawiać się jako ich osiadania, obroty oraz odkształcenia. Może to z kolei prowadzić do uszkodzeń tych obiektów mając wpływ na ich wygląd zewnętrzny oraz estetykę, użyteczność oraz funkcjonalność, oraz w najgorszym przypadku, stateczność konstrukcji. Poruszany temat przywidywania efektów tunelowania jest niezaprzeczalnie ważnym zagadnieniem, nie tylko z akademickiego punktu widzenia, ale także ze względu na jego wykorzystanie w praktyce inżynierskiej. Instytucje kredytowe, zakłady ubezpieczeniowe, wykonawcy oraz wiele stowarzyszeń związanych z tunelowaniem mają wspólny cel, jakim jest obniżenie kosztów oraz ryzyka związanego z tą działalnością inżynierską.

2.1. Aktualny stan wiedzy z zakresu poruszanego w rozprawie

Zasadnicze znaczenie dla wykonalności tunelowania na obszarach miejskich w słabym podłożu gruntowym ma możliwość kontroli przemieszczeń wywołanych zmianą stanu naprężeń całkowitych oraz ciśnienia wody w porach gruntu, zarówno podczas procesu drążenia, jak i długoterminowo. W ciągu ostatnich dziesięcioleciach został osiągnięty znaczący postęp w projektowaniu, wykonawstwie i analizie metod drążenia tuneli, zarówno w odniesieniu do

aspektów teoretycznych jak i technologicznych. Przeprowadzając analizę numeryczną, możliwe jest zasadniczo, uwzględnienie znacznej różnorodności oddziaływujących czynników, takich jak trójwymiarowa geometria, sekwencja faz budowy oraz sposób drążenia, nieliniowość ośrodka gruntowego, zmienność ciśnienia wody w porach gruntu, współpraca pomiędzy podłożem gruntowym i konstrukcją czy technologia wzmacniania podłoża gruntowego.

Niemniej jednak, kilka aspektów związanych z obserwowanymi przemieszczeniami nie jest łatwych do odtworzenia w analizie numerycznej, która z konieczności zakłada pewną formę idealizacji. W zakresie tematyki będącej przedmiotem recenzowanej dysertacji wiele jeszcze pozostało do zrobienia, aby wyjaśnić rolę głównych procesów technologicznych konwencjonalnej metody tunelowania oraz zjawisk zachodzących wokół maszyny TBM (w przypadku metody zmechanizowanej) w celu wiarygodnego przewidywania przemieszczeń podłoża gruntowego w obszarze przypowierzchniowym lub na niewielkiej głębokości oraz jego wpływu na istniejące obiekty i instalacje.

W powszechnej praktyce, analizy numeryczne skutków tunelowania przy zastosowaniu zmechanizowanej tarczy drążącej są przeprowadzane w dość uproszczony sposób. Zamiast szczegółowo modelować zjawiska zachodzące w obrębie maszyny TBM, na ogół symuluje się proces drążenia przez wprowadzenie fikcyjnych warunków brzegowych na brzegach tunelu. Podejście to może być jednak zawodne w wykrywaniu sytuacji związanych z nadmiernym wybraniem gruntu, które, jeśli proces drążenia będzie kontynuowany bez wprowadzenia żadnych modyfikacji, mogą prowadzić do awarii, takich jak nadmierne osiadania podłoża gruntowego, a nawet zawał. W recenzowanej rozprawie doktorskiej, w celu zbadania przemieszczeń podłoża gruntowego wywołanych procesem tunelowania, utworzono dwu- i trójwymiarowe modele numeryczne. Uwzględniono realistyczną symulację faz budowy tunelu drążonego metodą konwencjonalną ze sklepieniem wstępnym wykonanym w technologii jet-grouting a stanowiącym obudowę tymczasową, jak również podstawowe zjawiska zachodzące podczas wykonywania tunelu tarczą EPB, takie jak zmienne ciśnienie podparcia przodka, nadmierne urabianie gruntu w obrębie tarczy tnącej, stożkowatość tarczy, pustkę pomiędzy segmentową obudową a otaczającym gruntem oraz iniekcję w ogonie tarczy. Przeprowadzono analizy parametryczne w celu zbadania, czy uproszczone i mniej obliczeniowo czasochłonne procedury numeryczne mogą być użyte do symulacji rzeczywistych tuneli, w przypadku których mogą się pojawić inne problemy związane z przebiegiem trasy tunelu, uwarstwieniem podłoża gruntowego, warunkami wodnymi czy współpracą grunt-konstrukcja. Opracowane modele numeryczne pozwalają na eliminację fikcyjnych warunków brzegowych na krawędziach drążonego tunelu oraz na założenie konkretnych wartości straty objętości jako parametru początkowego.

Jedną z najważniejszych form idealizacji w analizie numerycznej zagadnienia brzegowego jest wybór modelu konstytutywnego właściwego dla danego ośrodka gruntowego, który w zasadzie powinien odtworzyć główne cechy zachowania tego ośrodka, jak np. nieodwracalność, nieliniowość czy zależność od historii naprężenia. W przedstawionej pracy rozważano kilka modeli konstytutywnych o rosnącym stopniu złożoności, od modelu liniowo-sprężystego idealnie-plastycznego aż do skomplikowanego modelu hypoplastycznego, co niewątpliwie wpłynęło na jakość uzyskanych przewidywań.

2.2. Układ rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska składa się ze:

- wstępu, w którym określono cele i tezę pracy oraz przedstawiono układ pracy (Rozdział 1);
- przeglądu konwencjonalnych oraz zmechanizowanych metod drążenia tuneli (Rozdział 2);
- przeglądu głównych dostępnych wyników badań doświadczalnych, zarówno tych pochodzących ze studiów przypadków jak i z modeli fizycznych a dotyczących efektów wywołanych procesem drążenia tuneli (Rozdział 3);
- przeglądu istniejących metod służących do przywidywania głównie deformacji ośrodka gruntowego wywołanych procesem drążenia tuneli, ale również w nieznacznym stopniu sił wewnętrznych w obudowie tunelu (Rozdział 4);
- szczegółowego opracowania trój- i dwuwymiarowego modelu numerycznego w celu przeprowadzenia symulacji procesu drążenia tunelu metodą konwencjonalną pod ochroną sklepienia wstępnego wykonanego w technologii jet-grouting; luźno opartego o studium przypadku tunelu na przedmieściach Florencji, dla którego dostępne były dane z monitoringu (Rozdział 5);
- szczegółowego opracowania trójwymiarowego modelu numerycznego w celu przeprowadzenia symulacji procesu drążenia tunelu tarczą wyrównanych ciśnień gruntowych (ang. EPB), bazującego luźno na studium przypadku tunelu wydrążonego tarczą EPB w Bangkoku (Rozdział 6); w rozdziale tym zawarto również wyniki z analiz wrażliwości przeprowadzonych w celu określenie wpływu różnych czynników, takich jak ciśnienie podparcia przodka oraz parametry geometryczne pustki;
- wniosków oraz rekomendacji co do dalszych badań (Rozdział 7);
- dwóch załączników przedstawiających szczegółowo podstawy matematyczne modeli konstytutywnych wykorzystanych w symulacjach numerycznych (Załącznik A) oraz opracowanego przez kandydata kodu Fortran, zawierającego równania modelu konstytutywnego iniektu (Załącznik B).

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Wyniki przedstawione w rozprawie mają wartość publikacyjną, o czym świadczy choćby fakt, iż do tej pory na podstawie wyników przestawionych w rozdziałach 5 i 6, stanowiących główną część niniejszej dysertacji, powstały dwa artykuły w czasopismach naukowych, jeden referat konferencyjny oraz kilka krótkich komunikatów.

Formatowanie pracy oraz zawarte w niej rysunki zostały wykonane na bardzo wysokim poziomie; natomiast słownictwo w języku angielskim wymaga wprowadzenia w kilku miejscach niewielkich poprawek.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Niektóre z ogólnych stwierdzeń zawartych w **rozdziale 1** prowokują do przemyśleń i mogą być przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony.

Treść **rozdziału 2** nie zawsze jest uporządkowana w przekonujący sposób. Niektóre z poruszanych zagadnień, jak np. odwodnienie, są przedstawione w postaci tylko kilku zdań mimo, że ich następstwa są szczególnie ważne. Powinny one być pominięte ze względu na niewielkie powiązanie z tematyką pracy, bądź znacząco rozwinięte.

W **rozdziale 3** przedstawione efekty budowy tuneli odnoszą się przede wszystkim do stanu zniszczenia w podłożu piaszczystym. Brakuje niektórych z ostatnich, jak i starszych wyników z badań modeli fizycznych. W przedstawionej dyskusji nie wprowadzono rozróżnienia pomiędzy badaniami fizycznymi w warunkach przeciążenia 1*g* i N*g* ani nie roli opisano roli, jaką odgrywa efekt skali. Niektóre istotne szczegóły zawarte w przedstawionych badaniach eksperymentalnych nie zostały ujęte, przez co część informacji jest niezrozumiała.

W **rozdziale 4**, czasami nie jest jasne czy przedstawione dane odnoszą się do modelu czy obserwacji, a także czy są to rzeczywiste dane czy dane otrzymane z centryfugi. Duża liczba wzorów empirycznych służących do przewidywań przemieszczeń na powierzchni i pod powierzchnią terenu wywołanych przez proces tunelowania jest przedstawiona przez wielu Autorów. W niektórych przypadkach przedstawione wzory są identyczne (patrz np. Peck, 1969 oraz Clough i Schmidt, 1981 - pierwszy wzór jest taki sam jak drugi, tyle że z parametrem n = 0.8). Uwaga poświęcona narzędziom numerycznym jest chyba nieadekwatna do ich znaczenia w dalszych opracowaniach. To prawda, że wiele wyników badań zaczerpniętych z literatury jest przytoczonych tam, gdzie są one efektywnie wykorzystane (np. badania dotyczące ciśnienia podparcia przodka przeprowadzone przez Meschke'go i współpracowników), jednak inne badania, np. modelowanie z zastosowaniem arbitralnej formuły Lagrange'a – Eulera (ALE), nie zostały w ogóle wspomniane.

Rozdział 5 zawiera bardzo dokładną i przekonywującą analizę tunelu wydrążonego metodą konwencjonalną z wykorzystaniem sklepienia z kolumn iniekcyjnych, jako obudowy tymczasowej. Opis studium przypadku niewątpliwie wzbogaciłby się przez nałożenie rzeczywistego profilu podłoża gruntowego na przekrój tunelu. Ponadto, niektóre wykresy znormalizowanej sztywności oraz przemieszczeń nie są przekonujące i wymagają dyskusji. Zastosowanie coraz bardziej złożonych modeli konstytutywnych do opisu ośrodka gruntowego wpływa na przewidywania. Ze względu jednak na odmienną strukturę matematyczną użytych modeli oraz sens fizyczny istotnych parametrów tych modeli, powstaje problem doboru odpowiednich parametrów do przeprowadzenia sensownych porównań przez wybór odpowiedniego i reprezentatywnego poziomu odkształceń dla analizowanego zagadnienia brzegowego.

Oprócz sugestii dotyczących odniesień do pozycji literaturowych, warto by było, zarówno w rozdziale 5, jak i **6**, przeprowadzić analizy parametryczne wpływu dyskretyzacji MES (rozmiaru elementów oraz ich lokalnego zagęszczenia) na otrzymane wyniki. Pozwoliłoby to, na upewnienie się czy zastosowana siatka MES jest odpowiednia, bądź przeciwnie, zbyt rzadka/zagęszczona. W rozdziale tym, wyniki z analiz numerycznych są porównane jedynie z predykcjami bazującymi na wzorach empirycznych. Czytelnik musi się zastanawiać, czy niektóre wyniki, jak np. obliczona wartość straty objętości (V_L = 0.8%), choć z pewnością realistyczna, odnosi się w jakikolwiek sposób do obserwacji terenowych. Ponadto, duża liczba wyników oraz ich interpretacja wymaga dyskusji podczas publicznej obrony.

Wnioski końcowe przedstawione w **Rozdziale 7** mogłyby być bardziej ukierunkowane. Autor ostrzega, że: „czasami istnieje optymalny poziom dokładności (skomplikowania?) modelu obliczeniowego, po przekroczeniu którego dalsze zwiększanie złożoności staje się zbędne lub wręcz szkodliwe". Interesujące będzie przedyskutowanie czy poziom złożoności wprowadzony do analiz jest zbyt niski, adekwatny, czy zbyt wysoki, oraz w jakim zakresie. Ponadto należałoby poruszyć problem identyfikacji parametrów w odniesieniu do rzeczywistego rozpoznania podłoża gruntowego. Innym interesującym punktem do dyskusji może być to, na jakim etapie procesu

projektowania wymagana jest analiza, taka jak ta przedstawiona w rozprawie (a może jej celem jest tylko "zrozumienie" zjawisk fizycznych?).

5. Podsumowanie i wnioski

Praca stanowi ciekawe zastosowanie zaawansowanych narzędzi numerycznych do analizy właściwego i złożonego zagadnienia brzegowego z dziedziny geotechniki. Procedury numeryczne opracowane w ramach rozprawy są co najmniej na poziomie aktualnego stanu wiedzy, a w niektórych przypadkach stanowią jego rozwinięcie. Przekażę autorowi pracy szczegółową listę drobnych zmian, zawierających niewielkie korekty pisowni, małe nieścisłości oraz niewielkie ulepszenia od strony języka angielskiego. Niemniej, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że jakość, oryginalność i zakres tej pracy spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Potwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Macieja Ochmańskiego pt. „Numerical analyses of the effects of tunnels construction" spełnia wymagania zawarte w art.16 Ustawy z 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 z późniejszymi zmianami) wymagane do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo.

Podsumowując, wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie kandydata Pana Macieja Ochmańskiego do publicznej obrony jego pracy doktorskiej.

Z poważaniem

Giulia Viggiani

Tłumaczyła:

Dr inż. Magdalena Kowalska

MKowalska

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach