Prof. dr hab. inż. Anna SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA

Politechnika Warszawska
Instytut Dróg i Mostów
Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa

tel.: (0-22) 825 60 78 fax. (0-22) 825 60 78
e-mail: A.Lewandowska@il.pw.edu.pl

Warszawa, 19 kwietnia 2016 roku

RECENZJA
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
MGR INŻ. MACIEJA OCHMAŃSKIEGO
PT. „ NUMERICAL ANALYSES OF THE EFFECTS OF TUNNEL CONSTRUCTION – ANALIZY NUMERYCZNE EFEKTÓW BUDOWY TUNELI"

1. Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Niniejszą recenzję opracowałam na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Pana Profesora Jana Ślusarka, wyrażoną w piśmie z dnia 5 kwietnia 2016 roku, nawiązującym do odpowiedniej uchwały Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, podjętej w dniu 16 marca 2016 roku.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Ochmańskiego pt. „Numerical analyses of the effects of tunnels construction", napisana w języku angielskim a której polski tytuł brzmi „Analizy numeryczne efektów budowy tuneli" przygotowana wspólnie pod kierunkiem dr hab. inż. Joanny Bzówki prof. P.ŚL i prof. Giuseppe Modoni. Rozprawa ta jest wynikiem współpracy Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej, Katedry Geotechniki i Dróg z Uniwersytetem Cassino i Południowego Lazio, Katedrą Inżynierii Lądowej i Mechanicznej.

Opiniowana praca jest ujęta w dwóch tomach – pierwszy z nich to właściwa rozprawa w języku angielskim o objętości 253 stron. Tom drugi to 39 stronnicowe streszczenie w języku polskim.

2. Analiza treści rozprawy i jej wstępna ocena.

Rozprawa doktorska poświęcona jest mało w kraju rozpoznanym zagadnieniom numerycznego modelowania procesu budowy tuneli metodami klasycznymi tzn. drążonymi bez naruszania podłoża nad stropem tunelu oraz wpływu tych prac na zmianę stanu

naprężenia w ośrodku gruntowym, na powierzchni terenu oraz w obudowie. Dlatego, bez wątpienia tematyka rozprawy jest nośna poznawczo i wpisuje się w aktualne problemy technik tunelowania stosowanych w Polsce w dużych projektach infrastrukturalnych (metro, głębokie tunele drogowe i kolejowe).

Podstawowym celem pracy jest ocena możliwości zaawansowanego modelowania numerycznego uwzględniającego poszczególne elementy technologiczne budowy tunelu w aspekcie efektywnego projektowania zarówno konstrukcji tunelu jak i oddziaływania na otoczenie.

Treść pracy jest ujęta w 7. rozdziałach, z których pierwsze cztery stanowią wprowadzenie i opis stanu wiedzy a kolejne trzy dotyczą badań własnych stanowiących podstawę do weryfikacji tezy pracy wraz z wnioskami i podsumowaniem. Ta część zajmuje ponad 2/3 treści rozprawy. Integralną część pracy stanowią dwa załączniki (A i B), w których podano opis matematyczny stosowanych w pracy modeli konstytutywnych podłoża (A) oraz procedurę w języku FORTRAN do modelowania iniekcji uszczelniającej ogon tarczy.

Układ pracy jest logiczny, a redakcja jak i poprawność języka zarówno w wersji angielskiej jak i polskiej nie wzbudzają zastrzeżeń. Tytuły kolejnych rozdziałów odpowiadają ich zawartości merytorycznej. Bibliografia obejmuje 279 pozycji, z czego większość to publikacje, w języku angielskim, pochodzące głównie z ostatnich 15 lat. Doktorant wykorzystał również, podane jako pozycje bibliograficzne, dokumenty i raporty Grup Roboczych Międzynarodowego Stowarzyszenia Budowy Tuneli i Przestrzeni Podziemnej, które na całym świecie, w tym i we Włoszech są uznawane za obowiązujące wytyczne. Uzupełnieniem są spisy rysunków, tablic, skrótów i symboli zamieszczone na początku pracy.

Rozdział 1. zawiera uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy i omawia krotko jej zawartość. Trzy kolejne rozdziały (2, 3 i 4) mają charakter *„state of the art reports"* i obejmują:

- Rozdział 2 - przegląd metod budowy tuneli wg klasyfikacji podanej przez ITA-AITES. Doktorant, swoje dalsze rozważania odnosi do metody konwencjonalnej (nazywanej często w kraju NATM) i metod zmechanizowanych. W metodzie konwencjonalnej opisuje kolejne fazy budowy przy założeniu robót tunelowych prowadzonych częściowym i pełnym przekrojem, a także sposoby wzmacniania podłoża w przodku tunelu, w tym iniekcję strumieniową. Odnośnie do metod zmechanizowanych wyróżnia klasyfikację tarcz zmechanizowanych wg Maidla i dalej szczegółowo opisuje konstrukcję, zasady tunelowania i zakres stosowania dwóch typów tarcz – EPB i SPB (wyrównywanych ciśnień gruntowych i zawiesinowa).

Rozdział ten zilustrowany jest własnymi zdjęciami Autora z jego pobytu naukowego we Włoszech.

- Rozdział 3. jest poświęcony oddziaływaniu robót tunelowych na podłoże i powierzchnię terenu w świetle badań doświadczalnych prowadzonych w laboratoriach (badania w wirówkach) i na rzeczywistych obiektach. Wyniki badań laboratoryjnych dotyczą głównie metody konwencjonalnej, a terenowych - metod zmechanizowanych. W pierwszym przypadku Autor powołuje się na rezultaty prac uznanych autorytetów takich jak Leca, Lunardi, Kamata i Mashimo oraz Hisatake i Ohno. W tym punkcie analizuje między innymi wyniki badań Russo i Modoniego oddziaływania tunelu budowanego metodą konwencjonalną z zastosowaniem sklepienia wstępnego wykonanego w technologii iniekcji strumieniowej „jet grouting" tzw. „*Umbrella Arch Method UAM*" czyli przypadku, który w dalszej części pracy jest modelowany numerycznie. Wpływ drążenia tunelu tarczą zmechanizowaną typu EPB i SPB opisywany jest na podstawie doświadczeń wysokiej klasy specjalistów z Holandii (Bakker, Bezuijen), Francji (Dias i Kastner), Tajlandii (Vince Suwansawat) , Turcji (Ocak) czy Chin.
- W rozdziale 4. Doktorant przedstawia i analizuje empiryczne, pół i w pełni analityczne, a na koniec numeryczne metody pozwalające na ocenę efektu drążenia tuneli. Efektem tym jest niecka osiadania na powierzchni terenu, która powstaje strefie przed przodkiem, na jego wysokości a także np. za ogonem tarczy. Podstawowe wartości jakie można określić korzystając z analizowanych przez doktoranta metod empirycznych to kształt i zasięg niecki osiadania. Autor cytuje zarówno równania kształtu wg Gaussa oraz Pecka i Schmidta z 1969 r jak i Celestino z 2000r. Parametr i_0 niezbędny do oceny zasięgu niecki osiadania ujęty jest w zestawieniu tabelarycznym – wartość wg najczęściej w praktyce wykorzystywanych formuł Pecka, Atkinsona, Clough, O'Reilly, Maira i innych. W tym miejscu Doktorant szczegółowo wyjaśnia pojęcie *Volume loss* V_L (strata objętości) i wpływ jej wielkości na maksymalne osiadania powierzchni terenu w obszarze niecki powstałej nad drążonym tunelem. Spośród metod pół i w pełni analitycznych Autor koncentruje się głównie na rozwiązaniach Verruijt'a i Booker'a oraz Gonzaleza i Sagaseta. W odniesieniu do oceny wartości sil wewnętrznych Doktorant przytacza metodę Duddeck'a bazującą na wartości tzw. *subgrade reaction modulus* - modułu reakcji podłoża. Metody numeryczne wymieniane przez Autora to metoda elementów skończonych MES, metoda różnic skończonych MRS, metoda elementów brzegowych

MEB i metoda elementów dyskretnych MED. W dalszej części pracy stosowana jest metoda elementów skończonych.

- Treść rozdziałów 5 i 6 stanowią własne rozważania Doktoranta, na które składają się analizy numeryczne dwóch tuneli – pierwszy przypadek (rozdział 5) to tunel kolejowy wykonywany metodą konwencjonalną ze sklepieniem wstępnym z kolumn w technologii iniekcji strumieniowej i z dodatkowym wzmocnieniem przodka prętami z włókna szklanego. Drugi, przedstawiony w rozdziale 6., tunel metra drążony tarczą typu EPB w złożonych warunkach hydrogeologicznych Bangkoku.

  Aby zrealizować założony cel pracy Doktorant opracował trzy modele numeryczne – dwa tunelu kolejowego w przestrzeni 2D i 3D i jeden trójwymiarowy tunelu metra. Wymiary modeli eliminowały wpływ warunków brzegowych w analizowanych przekrojach. Liczba elementów była na tyle duża, że Autor opracował dodatkową procedurę w języku programowania Python, która umożliwiła automatyzację tworzenia modelu. Do obliczeń wykorzystano jeden węzeł infrastruktury PL-GRID, ze względu na poziom skomplikowania obliczeń, wynikający z wielokrotnych symulacji złożonych elementów technologii drążenia obydwu typów tuneli i kilku modeli konstytutywnych podłoża. Analizę przeprowadzono stosując trzy wybrane modele konstytutywne podłoża. Pierwszy z nich, to typowy w obliczeniach geoinżynierskich i najprostszy ze względu na parametry, sprężysto-idealnie plastyczny model z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. Kolejne dwa – to modele hypoplastyczne von Wolffersdorffa z 1996 r dla piasków i Mašica z 2005 dla glin, oraz obydwa rozszerzone o koncepcję odkształceń międzyziarnowych Niemunisa i Herle nazwany w pracy jako model HYPO+ISC. Elementy konstrukcyjne tuneli tzn. beton natryskowy, siatkę stalową, obudowę stałą i żelbetową obudowę segmentową modelowano z użyciem modelu liniowo-sprężystego z funkcją uplastycznienia podobnie jak i sposób wzmocnienia podłoża – iniekcję strumieniową (model C-M), iniekcję uszczelniająca za ogonem tarczy, wzmocnienie przodka prętami z włókna szklanego. Sztywność materiałów scementowanych uzależniono od procesów hydratacji. Kalibracje modeli przeprowadzono z wykorzystaniem danych z literatury oraz symulacjami numerycznymi, a także na podstawie badań laboratoryjnych dla zakresu małych odkształceń. Stan naprężeń początkowych opisano współczynnikiem parcia spoczynkowego K_0 zdefiniowanym wzorem Jaky'ego dla piasków i Mayna i Kuhlawego dla gruntów spoistych.

W każdym z modeli odwzorowywano poszczególne etapy konstrukcyjne, uwzględniając elementy technologiczne i powtarzalność poszczególnych sekwencji budowy tunelu metodą konwencjonalną czy drążenia tarczą. Jednym z najtrudniejszych etapów w przypadku tunelu kolejowego było odpowiednie zamodelowanie realizacji wstępnego sklepienia formowanego z kolumn w technologii iniekcji strumieniowej a następnie drążenia tunelu i zakładania obudowy tymczasowej. W tunelu drążonym tarczą wyrównywanych ciśnień gruntowych równie trudna była symulacja i analiza geometrii tarczy, jej ciężaru, podparcia przodka oraz ciśnienia na przodku i w przenośniku ślimakowym, następnie montażu kolejnych pierścieni obudowy a także fazy iniekcji uszczelniającej pustkę za obudową segmentową, która powstaje po przejściu płaszcza i ogona tarczy.

Wynikiem analizy komputerowej i wielokrotnych symulacji kolejnych faz budowy były parametry opisujące długość, zasięg i kształt niecki oraz osiadania na powierzchni terenu a także wartości sił wewnętrznych (momentów zginających i sił poprzecznych) w obudowie tuneli – kolejowego i metra wyznaczone w przestrzeni 2D i 3D i różnych modeli konstytutywnych gruntu. Dane te porównano z wynikami rzeczywistych pomiarów prowadzonych podczas monitorowania obydwu inwestycji. To pozwoliło na udowodnienie tezy pracy i sformułowanie wniosków.

- wnioski końcowe potwierdzających osiągnięcie zamierzonego celu pracy oraz kierunki dalszych badań stanowią treść rozdziału 7.

3. Ocena rozprawy

Ocenę rozprawy należy rozpocząć od oceny tematu. Podjęte przez Autora szczegółowe i wymagające dużej biegłości informatycznej analizy numeryczne mają duże znaczenie poznawcze i jednocześnie bezpośrednie odniesienia praktyczne. Za szczególnie cenne w ocenianej rozprawie doktorskiej uznaję:

1. Wykonanie przez Doktoranta niezwykle złożonych modeli numerycznych, które bardzo wiernie odtwarzają kolejne sekwencje budowy tunelu metodą konwencjonalną i drążonego tarczą. Dlatego, Jego doświadczenia w pracy w środowisku MES 2D i 3D bez wątpienia będą wykorzystane z powodzeniem w praktyce.
2. Dobór zaawansowanych modeli konstytutywnych podłoża, a nie ograniczenie się do najbardziej typowego, najczęściej stosowanego ale i też obarczonego dużą niepewnością co do jakości wyników modelu Coulomba-Mohra.

3. Skalibrowanie mało znanego w kraju modelu von Wolffersdorffa oraz nieczęsto wykorzystywanego w analizach badawczych modelu Niemunisa i Herle,
4. Przeprowadzenie wielokrotnych i skomplikowanych symulacji numerycznych wymagających silnego narzędzia jakim jest PL-GRID.
5. Udowodnienie na podstawie wyników symulacji numerycznych i danych z rzeczywistych obiektów, że tego typu analizy są po pierwsze możliwe do przeprowadzenia, po drugie, że korzystając z zaawansowanych i skalibrowanych modeli konstytutywnych ośrodka gruntowego można uzyskać wartościowe wyniki porównywalne z pomierzonymi. Po trzecie wreszcie, Doktorant wykazał, że stosując metodę elementów skończonych można z sukcesem zamodelować trudne efekty technologiczne tunelowania metodą konwencjonalną i tarczową.
6. Wykazanie, że wyniki uzyskane z wykorzystaniem najprostszego do stosowania w praktyce inżynierskiej modelu podłoża Coulomba-Mohra są obarczone znacznym błędem.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że temat rozprawy jest dobrany trafnie i odpowiada zapotrzebowaniu praktyki inżynierskiej. Doktorant określił jasno tezę pracy oraz nakreślił przyjętą ścieżkę badawczą; wykazał się też dobrą znajomością stanu wiedzy w tematyce rozprawy oraz biegłością w stosowaniu skomplikowanych procedur informatycznych. Wykazał, że dokładne modelowanie numeryczne z wykorzystaniem zaawansowanych modeli gruntu pozwala na szczegółowy i kompletny opis mechanizmów, które powstają podczas drążenia tuneli metodami konwencjonalna i tarczową.

Reasumując, wyniki analiz oraz końcowe wnioski stanowią cenny przyczynek do stanu wiedzy nad modelowaniem numerycznym efektów budowy tuneli.

4. Uwagi szczegółowe

Do uwag szczegółowych zaliczam następujące stwierdzenia:

1. Proszę o wyjaśnienie dlaczego do wyznaczenia zmienności wartości modułu odkształcenia wraz z głębokością został przyjęty wzór 5.2
2. Jak wyniki symulacji numerycznych dla parametrów piasku z Hochstetten można odnieść do polskich osadów rzecznych np. piasków średnich i grubych o podobnych wartościach parametrów?

3. Czy wnioski z modelowania efektów drążenia tunelu metodą konwencjonalną i skutków tych efektów przedstawione w pracy mogą mieć również odniesienia do innych warunków geologicznych i geotechnicznych np. skał ?
4. Rozumiem, że symulacje tunelu drążonego tarczą EPB przeprowadzono dla sytuacji geotechnicznej Bangkoku ze względu na dostępność dużej liczby danych doświadczalnych. Jak wyniki tych symulacji można odnieść do warunków drążenia tarczą EPB tuneli metra np. pod Wisłą w osadach rzecznych i plioceńskich, a także do kontekstu geotechnicznego miast włoskich?
5. Czy wnioski końcowe pracy mówiące o efektach technologicznych tunelowania można przenieść na grunt krajowy w aspekcie planowanych w najbliższym czasie budowach tuneli komunikacyjnych na południu Polski najprawdopodobniej z zastosowaniem metody konwencjonalnej?

5. Wnioski

W podsumowaniu dorobku rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Ochmańskiego stwierdzam, że:

1) rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
2) przedstawia wyniki obszernej pracy badawczej o dużym znaczeniu praktycznym,
3) zawiera elementy własnej, samodzielnej twórczości naukowej,
4) wnosi znaczący postęp w ocenie oddziaływania robót tunelowych na podłoże i powierzchnię terenu prowadzonych metodami numerycznymi z uwzględnieniem zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntu i skomplikowanych procesów technologicznych,
5) Autor wykazał bardzo dobre przygotowanie i dojrzałość niezbędne do prowadzenia samodzielnych badań naukowych; na szczególne uznanie zasługuje biegłość w modelowaniu numerycznym warunków geotechnicznych jak i złożonych technik tunelowania, a także znajomość procedur informatycznych i oprogramowania.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Macieja Ochmańskiego pt. „Numerical analyses of the effects of tunnels construction" spełnia w całej rozciągłości 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. Wnoszę w związku z tym o jej dopuszczenie do publicznej obrony na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej.