

Dr hab. Jan Gaszyński, prof. PK
Instytut Geotechniki Politechniki Krakowskiej
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
tel: (0-12) 628-28-21

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Anny Juzwy**
pt: "Analiza współpracy grupy kolumn iniekcyjnych z podłożem gruntowym"

opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Budownictwa
Politechniki Śląskiej
z dnia 08.07.2015 r

1. Przedmiot i ogólna charakterystyka treści rozprawy

Zagadnienie współdziałania konstrukcji inżynierskich z gruntem należy do najważniejszych i najczęściej podejmowanych problemów geotechniki. Wynika to z oczywistych faktów: konieczności oparcia każdej budowli na podłożu gruntowym z jednej strony oraz odmienności struktury obiektu inżynierskiego i podłoża z drugiej. Zakres problematyki związanej z tymi zagadnieniami jest obszerny i różnorodny. Obejmuje między innymi kwestie konstrukcyjne, technologiczne oraz analizę ilościową stanów naprężenia i odkształcenia w obszarze współpracy konstrukcji z gruntem.

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Juzwy mieści się w ostatnim z wymienionych obszarów zagadnień. Przedmiotem jej są bowiem: badania eksperymentalne pojedynczej i grupy obciążonych osiowo kolumn iniekcyjnych, analiza wyników pomiarów ich osiadań oraz budowa modeli obliczeniowych opisujących współpracę tych kolumn z otaczającym je ośrodkiem gruntowym.

Zagadnienie to należy do ważnej grupy problemów konstrukcji inżynierskich zagłębionych w gruncie. Złożona struktura, jaką stanowią kolumny (pale) współpracujące z otaczającym je środowiskiem, stwarza znaczne trudności przy odwzorowywaniu ich rzeczywistego zachowania modelem teoretycznym. Przyczyną tego jest przede wszystkim, wspomniana już wcześniej, odmienność struktur materiałowych gruntu i konstrukcji w nim zagłębionych, wielowymiarowość problemu oraz duża liczba parametrów i zmiennych opisujących zagadnienie. Stanowi to o dużej atrakcyjności oraz walorach tak poznawczych, jak i aplikacyjnych podjętego zadania.

Wymienione argumenty w pełni uzasadniają trafny wybór podjętego problemu na rozprawę doktorską. Przyjęty w niej model obliczeniowy kolumny (pala) "jet-grouting" mieści się w ramach współczesnej mechaniki continuum, i uwzględnia współdziałanie ośrodków o różnej sztywności oraz ich fizycznej nieliniowości, mającej swe źródło głównie w plastycznym charakterze odkształceń (zwłaszcza w strefie kontaktowej)

Rozwiązanie tego zadania pozwala oczekiwać na stworzenie skutecznego narzędzia do rozwiązywania ważnych zadań geotechniki.

2. Zakres, cel i teza rozprawy

Celem opiniowanej rozprawy jest opracowanie modelu obliczeniowego (numerycznego) opisującego pracę, osiowo obciążonych, kolumn iniekcyjnych w ośrodku gruntowym. Zadanie to zostało zrealizowane w dwóch przypadkach: dla pojedynczej kolumny oraz do

grupy kolumn. Pozwoliło to analizować i oceniać ewentualne różnice pracy kolumny w tych przypadkach.

Tak zamierzony cel został osiągnięty poprzez wykonanie badań próbnego obciążenia kolumn na poligonie doświadczalnym, rejestracji ich osiadań, oraz opracowania zależności osiadanie – obciążenie dla opisanych wcześniej przypadków.

Teoretyczny, ilościowy opis zagadnienia współpracy kolumn z ośrodkiem gruntowym został wykonany w ramach racjonalnej mechaniki continuum dla złożonej struktury: konstrukcja – grunt.

Do wykonania obliczeń został wykorzystany specjalistyczny program Z_Soil, bazujący na metodzie elementów skończonych i umożliwiający wykorzystanie powszechnie używanych równań konstytutywnych dla różnych materiałów konstrukcyjnych, w tym gruntu.

Wzmocnione podłoże gruntowe, będące rzeczywistą strukturą składającą się z gruntu oraz zanurzonych w nim elementów konstrukcyjnych (kolumny iniekcyjne), zostało zamodelowane trójstrefowym modelem: grunt, kolumna oraz strefa kontaktowa. Ta ostatnia jest powszechnie stosowana w modelach obliczeniowych struktur złożonych z różnych materiałów konstrukcyjnych o znacznych różnicach wartości parametrów mechanicznych (w szczególności wytrzymałościowych).

Dla tak przyjętego zakresu badań została sformułowana przez Autorkę teza: „*Możliwe jest zbudowanie modelu numerycznego dla grupy kolumn iniekcyjnych, wzmacniających podłoże gruntowe, który będzie realistycznie opisywał zależność obciążenie-osiadanie kolumn*”.

Należy podkreślić, że wykazanie tak sformułowanej tezy wymaga wykonania różnorodnych badań i analiz, a co za tym idzie wiedzy i znacznych umiejętności z zakresu geotechniki oraz nauk związanych (geologia, fizyka, matematyka).

3. Charakterystyka rozprawy i uwagi krytyczne

Wyniki badań Autorki są przedstawione w pracy napisanej wg dobrego wzoru publikacji naukowych. 136 stron tekstu jest podzielone na 7, zwartych tematycznie, rozdziałów, prezentujących w logiczny sposób: cel, zakres, tezę, aktualny przegląd wiedzy na temat projektowania wzmocnienia podłoża przy użyciu kolumn iniekcyjnych, wyniki własnych badań polowych, opis modelu obliczeniowego, analizy numeryczne, dyskusję wyników i podsumowanie.

Tekst zasadniczy uzupełnia często cytowany wykaz publikacji naukowych (124), norm (5), innych dokumentów (6) oraz stron internetowych (8).

Kolejnym uzupełnieniem są kilkadziesiąt stron liczące załączniki zawierające: wyciąg z dokumentacji określającej warunki gruntowo-wodne podłoża na poletku doświadczalnym, metryki kolumn iniekcyjnych i szczegółowe zestawienie wyników próbnych obciążeń.

Rozprawę rozpoczyna **rozdział pierwszy**, w którym przedstawiony jest cel, zakres i sformułowana teza.

Rozdział drugi ma dwa główne wątki. Pierwszy z nich to omówienie jednej ze współczesnych technik wzmocniania podłoża gruntowego - technologii iniekcji strumieniowej. Tematyka ta, aczkolwiek związana z tematem pracy, nie znajduje się w jej głównym nurcie. Drugi wątek jest znacznie ważniejszy, bo związany z projektowaniem kolumn iniekcyjnych wzmacniających podłoże gruntowe. Omówienie wymiarowania tych kolumn w gruncie, wraz z weryfikacją ich nośności, na podstawie aktualnego stanu wiedzy zostało przedstawione w czytelny sposób, z powołaniem się na liczne krajowe i zagraniczne publikacje. Daty tych publikacji świadczą o znajomości aktualnej tematyki omawianej przez Autorkę.

W trzecim rozdziale został przedstawiony teoretyczny (fizyczny i numeryczny) model podłoża gruntowego. Składa się na to krótkie przypomnienie wiadomości o opisie stanów naprężeń i odkształceń, a także równań konstytutywnych dla gruntów, z akcentem na sprężysto-plastyczne ich właściwości. Nie jest jasny powód omawiania modelu *Hardening Soil-small Strain*, który nie został wykorzystany do dalszych wykonanych analiz numerycznych.

Warto w tym miejscu zaznaczyć, że analizy numeryczne zostały przeprowadzone dla wzmocnionego kolumnami podłoża. Odczuwalny jest więc brak informacji o modelu dla materiału kolumn iniekcyjnych. Jest o tym mowa w późniejszym rozdziale. Wydaje się jednak, że przyjęcie trójstrefowego modelu wzmocnionego podłoża wymaga równorzędnego traktowania jego fizycznych składników.

Rozdział czwarty zalicza się do najważniejszych w rozprawie, są w nim bowiem prezentowane wyniki badań własnych Autorki oraz ich analizy. Omówiono tu podłoże gruntowe poligonu doświadczalnego, konstrukcję stanowiska badawczego i program badań. Wyniki pomiarów zostały zestawione w tabelach, a ich wizualizacja na stosownych wykresach.

Istotą prowadzonych badań (próbnymi obciążeniami) było ustalenie związku pomiędzy siłą obciążającą kolumnę iniekcyjną (grupę kolumn iniekcyjnych) i wynikającym stąd osiadaniem kolumny (grupy kolumn iniekcyjnych).

Podłoże gruntowe zostało opisane na podstawie obszernych badań, których rezultatem było określenie jego budowy geologicznej oraz wartości parametrów geotechnicznych (zestawionych w tabelach) – stanowiących podstawę dla analiz i obliczeń numerycznych. Obszerną dokumentację wyników tych badań zawiera Załącznik 1. Tu niejasności:

- Str. 68; Wytrzymałość gruntu na ścinanie wyraża się faktycznie w wartościach naprężeń ale oznaczenie ich symbolami przyjmowanymi powszechnie dla kąta tarcia wewnętrznego i kohezji jest zaskakujące.
- W tekście przytoczono przekrój z niezrozumiałym opisem rzędnych warstw; czy rzeczywiście chodzi o: m.n.p.m.?

Podstawowymi elementami stanowiska badawczego są: kolumna (kolumny) wciskana(e), kolumny kotwiące, konstrukcja obciążająca (belki i siłowniki) oraz system pomiarowy przemieszczeń. Wszystkie wymienione elementy są w rozprawie szczegółowo opisane i pokazane na zdjęciach. Na schematach pokazane są przekroje ukazujące sposób ich połączenia. W każdym przypadku zostały wykonane cztery kolumny kotwiące, z którymi była związana stalowa rama systemu obciążenia. W przypadku obciążania pojedynczej kolumny główny dźwigar ramy został umieszczony nad nią, w osi symetrii przekroju poprzecznego kolumn kotwiących. W przypadku grupy 3 kolumn oś dźwigara przechodziła przez środek ciężkości trójkąta, w którego wierzchołkach umieszczone były wciskane kolumny.

O ile system obciążenia kolumny pojedynczej wydaje się być oczywisty, to dla grupy kolumn nasuwają się pytania:

- Czemu grupa 3 kolumn, a nie 4, bo wtedy łatwiej o symetrię? Może trudno byłoby przekazać odpowiednią wielkość obciążenia dla takiego układu?
- Co decydowało o przyjęciu rozstawu osiowego kolumn?
- Czy usytuowanie głównego dźwigara ramy obciążającej nad jedną z kolumn i w równej odległości pomiędzy pozostałymi nie byłoby właściwsze? Może to nie ma znaczenia?

Jeżeli nawet dla postawionych pytań są proste odpowiedzi, to warto pokusić się o jakiś komentarz.

Przedstawione w tabelach wyniki pomiarów osiadań kolumn nasuwają kolejne pytania:

- Skąd tak znaczne różnice osiadań pomiędzy poszczególnymi kolumnami w grupie? Czy nie ma to związku ze wspomnianą poprzednio geometrią systemu obciążenia?
- Czy średnie osiadanie grupy kolumn jest w takiej sytuacji reprezentatywne?

- Celowe byłoby oznaczyć numery kolumn na rys. 4.13. Może ich usytuowanie w stosunku do głównego dźwigara ramy ma jakieś znaczenie dla osiadań?

Rozdział piąty zawiera obszerne uzasadnienie, założenia oraz prezentację przyjętego do obliczeń modelu numerycznego. Jest nim model „trójstrefowy”, z powodzeniem stosowany do rozwiązywania zadań geotechniki.

Mechaniczne właściwości rzeczywistych składników opisuje sprężysto-idealnie plastyczny model Coulomba-Mohra z niestowarzyszonym prawem płynięcia.

Parametry dla modeli fizycznych zostały wyznaczone w odpowiednio zaprogramowanych badaniach laboratoryjnych i terenowych.

W **rozdziale szóstym** są zawarte wyniki obliczeń i ich analiza, wykonane dla przyjętego modelu wzmocnionego kolumnami podłoża gruntowego. Ten rozdział należy uznać za kluczowy, z punktu widzenia uzasadnienia tezy sformułowanej we wstępie rozprawy. Dla wszystkich stref materiałowych został przyjęty sztywno-plastyczny model Coulomba-Mohra z niestowarzyszonym prawem płynięcia.

Nasuwa się pytanie: z czego wynika to jednakowe spojrzenie na mechaniczne właściwości takich materiałów, jak grunt i tworzywo kolumny iniekcyjnej?

Istotnym elementem obliczeń jest przyjęcie parametrów niematerialnej strefy kontaktowej. Przyjęto tutaj dwa warianty. W pierwszym z nich wartości parametrów przyjęto równe $2/3$ wartości parametrów otaczającego ośrodka rzeczywistego, a w drugim równe $1/3$ wartości parametrów materiału kolumn iniekcyjnych. Takie podejście jest pewną formą analizy wrażliwości modelu. Dla drugiego wariantu przeprowadzono pełny zaplanowany zakres obliczeń.

Analogicznie jak w badaniach terenowych, zostały przeprowadzone obliczenia dla kolumny pojedynczej i grupy trzech kolumn. Ich średnice przyjęto równe 60cm i 80cm. W celu odzwierciedlenia pracy kolumn został zbudowany model kontinuum, stanowiący podobszar przestrzeni o ograniczonych wymiarach. Na płaszczyznach ograniczających założono spełnienie stosownych warunki równowagi.

Zestawienie wyników obliczeń i pomiarów rzeczywistych osiadań dla jednej kolumny wskazuje, przy wyraźnych różnicach wartości, na podobny kształt zależności osiadanie – siła wciskająca. Analogiczne stwierdzenie jest słuszne dla grupy kolumn. Widoczne jest też, że osiadanie grupy kolumn jest większe od osiadania kolumny pojedynczej. To spostrzeżenie jest ważne, bowiem przy rozwiązywaniu rzeczywistych zadań, projektuje się na ogół grupy kolumn, a obliczenia często są wykonywane dla kolumn pojedynczych.

Czy w tej sytuacji nie jest właściwy jakiś komentarz?

Rozdział kończą uwagi o możliwościach lepszego opisu zaawansowanymi modelami teoretycznymi rzeczywistej pracy kolumn w podłożu gruntowym. Ten kierunek wydaje się mieć szansę powodzenia, w świetle wskazanych przez Autorkę publikacji.

W **siódmym rozdziale** zostało dokonane podsumowanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeniowych zakończone słusznym stwierdzeniem, że cel pracy został osiągnięty i teza uzasadniona.

4. Podsumowanie i ocena rozprawy

Opiniowana praca ma poprawny układ - zawarty w niej materiał jest podzielony na jednorodne tematycznie rozdziały. Po dokonaniu wprowadzenia, przedstawiona jest teza pracy.

Omówiona przez Autorkę problematyka jest obszerna i różnorodna. Jest to odzwierciedleniem specyfiki rozważanego zagadnienia, którego cechą szczególną jest współpraca konstrukcji zagłębionej w podłożu gruntowym z ośrodkiem ją otaczającym.

Osobną trudność stanowi problem kontaktowy na granicy konstrukcja - grunt, któremu poświęcono w pracy sporo uwagi.

Układ pracy i sposób prezentacji (zdjęcia, tabele, wykresy i t.p.), jest nienaganny. Praca jest przygotowana niezwykle starannie i trudno dopatrzeć się w niej błędów redakcyjnych. Kilka dyskusyjnych sformułowań użytych w pracy oraz drobne usterki nie wpływają na obniżenie jej wartości.

Zamieszczone w opinii uwagi krytyczne oraz wątpliwości nie podważają wartości podstawowych elementów pracy, jakimi są: poprawnie postawione zadanie, właściwie dobrane metody jego rozwiązania oraz uzyskanie wyników świadczących o uzasadnieniu postawionej tezy.

Prezentacja modelu o trójstrefowej strukturze, przyjętego do opisu współpracy kolumny iniekcyjno-strumieniowego z otaczającym ją ośrodkiem gruntowym, jest poparta przekonującymi argumentami, dobrze uzasadnionymi merytorycznie i ma oparcie w cytowanej literaturze.

Rozwiązując postawione sobie zadanie, Autorka nie popełniła poważnych błędów merytorycznych, tak więc przedstawione w pracy rezultaty uzasadniają stwierdzenie, że teza sformułowana we wstępie została wykazana.

Przebyta przez Autorkę droga budowy modelu, obejmująca: przyjęcie koncepcji i matematycznego opisu, kalibrację, weryfikację i analizę wrażliwości, świadczy o Jej wszechstronnym przygotowaniu do pracy badawczej. Z jednej strony podejmuje i rozwiązuje skutecznie złożone zadania brzegowe mechaniki continuum, a z drugiej programuje i realizuje obszerne badania eksperymentalne (laboratoryjne i terenowe w skali 1:1). Tak sformułowany i zrealizowany program wyróżnia się kompleksowym podejściem i ma cechy dobrej pracy naukowo badawczej.

Przyjęty do opisu zadania model trójstrefowy (trzech współpracujących ze sobą materiałów) różni się od propozycji obliczeniowych, będących adaptacją półempirycznych wzorów, używanych do obliczania nośności i osiadania kolumn. W odniesieniu do tego, podejście w ramach mechaniki continuum dla sformułowanego rozwiązania jest oryginalnym osiągnięciem Autorki.

Warto podkreślić, że do opisu zachowania się materiału każdej ze stref, został użyty prosty model konstytutywny - prawo Coulomba-Mohra z niestowarzyszonym prawem płynięcia. Daje to możliwość posługiwania się parametrami o powszechnie i dobrze znanym sensie fizycznym.

Niezależnie od dużej wartości wyników uzyskanych przez mgr inż. Annę Juzwę w opiniowanej pracy, na uwagę zasługuje Jej aktywna postawa w środowisku geotechnicznym. Wyraża się to publikacjami oraz prezentowaniem własnych prac na konferencjach i sympozjach naukowych. (11 pozycji zamieszczonych w spisie literatury).

4. Wniosek końcowy

Podsumowując ocenę, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Anny Juzwy pt: "Analiza współpracy grupy kolumn iniekcyjnych z podłożem gruntowym" stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, w szczególności art. 13 tej Ustawy, oraz w §6, ust. 4, Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011r. Wnioskuje zatem o jej przyjęcie przez Radę Wydziału i dopuszczenie do obrony.

Kraków, 26.08.2015 r