

Prof. Alessandro FLORA
Dipartimento di Ingegneria Civile,
Edile e Ambientale
Via Claudio 21
80125 Napoli Italy

Neapol, 10 lutego 2017 r.



RECENZJA
pracy doktorskiej Lidii Wanik
pt. „Geometryczne i mechaniczne właściwości kolumn iniekcyjnych:
badania doświadczalne i przewidywanie”

1. Podstawa opracowania

Recenzję pracy doktorskiej Lidii WANIK pt. „Geometryczne i mechaniczne właściwości kolumn iniekcyjnych: badania doświadczalne i przewidywanie” (ang. *Geometrical and mechanical properties of jet grouting columns: experimental investigations and prediction*) opracowano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 14 grudnia 2016 r. zgodnie z decyzją Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej.

2. Ogólna charakterystyka pracy doktorskiej

Praca doktorska ma ambitny cel zrozumienia technologii iniekcji strumieniowej poprzez skupienie się na mechanizmie iniekcji strumieniowej i wiarygodności empirycznych metod przewidywania średnicy kolumn, dodając również nowe informacje pochodzące z badań in situ i badań laboratoryjnych. Temat pracy jest niezwykle interesujący, ponieważ technologia iniekcji strumieniowej (ang. *jet grouting*) jest obecnie jedną z najpopularniejszych metod wzmacniania podłoża gruntowego, wykorzystywaną w wielu różnych zastosowaniach. Literatura na ten temat rozwinęła się stosunkowo niedawno, powiedzmy w ostatnich dwudziestu latach, ale nadal istnieje potrzeba posiadania szczegółowej wiedzy zarówno na temat mechanizmu iniekcji strumieniowej, jak i dobrej jakości danych eksperymentalnych. W szczególności te ostatnie aspekty mają ogromne znaczenie, ponieważ w większości takie dane należą do firm, które nie chcą dzielić się informacjami. W związku z powyższym, temat pracy jest bardzo interesujący zarówno dla środowiska akademickiego, jak i praktyków, i wart podejmowania.

2.1 Aktualny stan wiedzy w zakresie pracy doktorskiej

Technologie wzmocnienia słabego podłoża stały się tematem szczegółowych badań stosunkowo niedawno, w porównaniu do tradycyjnych technologii, jak np. pali. Ponieważ ich udział na rynku budowlanym stale rośnie, występuje coraz silniejsze zapotrzebowanie na poprawę wiedzy i metod projektowych najbardziej popularnych technologii wzmocnienia słabego podłoża, jak *jet grouting*. Problem polega na tym, iż często projektowanie oparte jest na uproszonych zasadach, ponieważ wielu operatorów i inżynierów nie w pełni rozumie jak kolumny są tworzone i jakie są ich prawdziwe cechy. Na etapie projektowym, zakłada się wykonanie idealnie pionowych (lub poziomych) kolumn iniekcyjnych, których właściwości mechaniczne są tylko zgrubnie oszacowywane. Niepewności są ukryte w obliczeniach, posiadających marginesy bezpieczeństwa znacznie wyższe, niż te w innych bardziej konwencjonalnych technologiach. To nie jest tylko pesymistyczny punkt widzenia środowiska akademickiego. Wynika to z codziennego doświadczenia, jak również z mojego osobistego uczestnictwa w wielu konferencjach. Wiele razy podawane są tylko ogólnikowe informacje z rozwiązaniem końcowym, bez informacji szczegółowych. Nawet w książkach, w większości przypadków technologia iniekcji strumieniowej jest przedstawiana w sposób jakościowy, pośrednio zakładając, że kolumny mogą być uznane i zaprojektowane jak pale lub sztywne elementy. W większości, geometria i właściwości mechaniczne kolumn iniekcyjnych są zgadywane. Wyobraźmy sobie, jak trudno byłoby zaprojektować fundament palowy nie znając średnicy pali i właściwości materiału.

Dlatego istnieje pilna potrzeba zwiększenia wiedzy na temat procesu iniekcji strumieniowej. Bardzo poszukiwane są informacje (znów, dostępne dla firm, ale nie dla środowiska akademickiego i praktyków), dotyczące prób wysokociśnieniowych, ponieważ są one coraz bardziej popularne, podczas gdy formuły empiryczne do przewidywania średnicy kolumn zostały skalibrowane na podstawie danych eksperymentalnych dla mniejszych energii.

2.2 Struktura pracy doktorskiej

Praca doktorska składa się z:

- **Rozdział 1** (wstęp): rozdział krótko przedstawia cel, zakres i tezę pracy, jak również charakteryzuje poszczególne rozdziały,

- **Rozdział 2** (proces iniekcji strumieniowej): rozdział rozpoczyna się krótkim wprowadzeniem dotyczącym technologii i zakresu jej zastosowania. Następnie, skupia się na opisie i analizie strumienia iniektu, uwzględniając hydrodynamiczne mechanizmy zachodzące podczas procesu iniekcji. Podaje również przykłady z literatury dotyczące próby odwzorowania wysokociśnieniowej iniekcji.

- **Rozdział 3** (modelowanie numeryczne iniekcji strumieniowej): przedstawia wyniki analiz numerycznych odwzorowania procesu iniekcji strumieniowej wykorzystując program Fluent z pakietu Ansys. Analizy przeprowadzono na podstawie kalibracji danych doświadczalnych, a następnie przedstawiając wpływ poszczególnych parametrów na wyniki. Rezultaty analiz są również porównane z formułami analitycznymi opisującymi proces iniekcji strumieniowej. Zastosowanie analiz numerycznych pozwoliło na zbadanie wpływu wprowadzenia dodatkowego medium (sprężonego powietrza) na efektywność strumienia iniektu, co nie jest możliwe przy wykorzystaniu wzorów analitycznych.

- **Rozdział 4** (charakterystyka geometryczna i mechaniczna iniekcji strumieniowej): rozdział ten poświęcony jest analizie wyników literaturowych dotyczących geometrycznych i mechanicznych właściwości kolumn iniekcyjnych. Przedstawia również istniejące metody analityczne szacowania średnic kolumn iniekcyjnych.

- **Rozdział 5** (charakterystyka poletka doświadczalnego w Bojszowach Nowych): przedstawiono charakterystykę poletka doświadczalnego w Bojszowach Nowych: warunki gruntowo-wodne oraz parametry technologiczne iniekcji strumieniowej zastosowane do 16 wykonanych kolumn (8 wykonanych systemem pojedynczym i 8 wykonanych systemem podwójnym).

- **Rozdział 6** (charakterystyka geometryczna kolumn iniekcyjnych w Bojszowach Nowych): rozdział przedstawia wyniki pomiarów odsłoniętych kolumn iniekcyjnych wykonanych na poletku doświadczalnym w Bojszowach Nowych. Wartości pomierzonych średnic kolumn na różnych głębokościach są porównane z wartościami przewidywanymi, obliczonymi na podstawie metod opisanych w rozdziale 4. Na podstawie tego porównania, przedstawiono również nową kalibrację parametrów wykorzystanych do obliczania średnicy kolumn według opisanych metod.

- **Rozdział 7** (charakterystyka mechaniczna kolumn iniekcyjnych w Bojszowach Nowych): rozdział przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych tworzywa gruntowo-cementowego

- **Rozdział 2** (proces iniekcji strumieniowej): rozdział rozpoczyna się krótkim wprowadzeniem dotyczącym technologii i zakresu jej zastosowania. Następnie, skupia się na opisie i analizie strumienia iniektu, uwzględniając hydrodynamiczne mechanizmy zachodzące podczas procesu iniekcji. Podaje również przykłady z literatury dotyczące próby odwzorowania wysokociśnieniowej iniekcji.

- **Rozdział 3** (modelowanie numeryczne iniekcji strumieniowej): przedstawia wyniki analiz numerycznych odwzorowania procesu iniekcji strumieniowej wykorzystując program Fluent z pakietu Ansys. Analizy przeprowadzono na podstawie kalibracji danych doświadczalnych, a następnie przedstawiając wpływ poszczególnych parametrów na wyniki. Rezultaty analiz są również porównane z formułami analitycznymi opisującymi proces iniekcji strumieniowej. Zastosowanie analiz numerycznych pozwoliło na zbadanie wpływu wprowadzenia dodatkowego medium (sprężonego powietrza) na efektywność strumienia iniektu, co nie jest możliwe przy wykorzystaniu wzorów analitycznych.

- **Rozdział 4** (charakterystyka geometryczna i mechaniczna iniekcji strumieniowej): rozdział ten poświęcony jest analizie wyników literaturowych dotyczących geometrycznych i mechanicznych właściwości kolumn iniekcyjnych. Przedstawia również istniejące metody analityczne szacowania średnic kolumn iniekcyjnych.

- **Rozdział 5** (charakterystyka poletka doświadczalnego w Bojszowach Nowych): przedstawiono charakterystykę poletka doświadczalnego w Bojszowach Nowych: warunki gruntowo-wodne oraz parametry technologiczne iniekcji strumieniowej zastosowane do 16 wykonanych kolumn (8 wykonanych systemem pojedynczym i 8 wykonanych systemem podwójnym).

- **Rozdział 6** (charakterystyka geometryczna kolumn iniekcyjnych w Bojszowach Nowych): rozdział przedstawia wyniki pomiarów odsłoniętych kolumn iniekcyjnych wykonanych na poletku doświadczalnym w Bojszowach Nowych. Wartości pomierzonych średnic kolumn na różnych głębokościach są porównane z wartościami przewidywanymi, obliczonymi na podstawie metod opisanych w rozdziale 4. Na podstawie tego porównania, przedstawiono również nową kalibrację parametrów wykorzystanych do obliczania średnicy kolumn według opisanych metod.

- **Rozdział 7** (charakterystyka mechaniczna kolumn iniekcyjnych w Bojszowach Nowych): rozdział przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych tworzywa gruntowo-cementowego

(wytrzymałości na jednoosiowe i trójosiowe ściskanie) oraz urobku (wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie). Następnie skupiono się na analizie mineralogicznej materiału kolumn i przedstawiono możliwe wyjaśnienie różnicy wytrzymałości pomiędzy materiałem kolumn wykonanych systemem pojedynczym i podwójnym.

- **Rozdział 8** (wnioski i rekomendacje do dalszych badań): rozdział krótko podsumowuje uzyskane wyniki i podkreśla dalsze perspektywy badań nad technologią iniekcji strumieniowej.

3. Ocena pracy doktorskiej

Niektóre z przedstawionych wyników w pracy doktorskiej są bardzo wartościowe, o czym świadczy fakt, iż powstały na ich podstawie artykuły do czasopism naukowych i artykuły konferencyjne.

Układ pracy i jakość rysunków jest doskonała, znajomość języka angielskiego jest dobra.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusja

Cele deklarowane we wstępie pracy wydają się szersze, aniżeli przedstawione wyniki, a więc wydaje się, że nie zostały w pełni zrealizowane.

Rozdział 2, dotyczący mechanizmu iniekcji strumieniowej, przedstawia informacje literaturowe związane z technologią iniekcji strumieniowej oraz mechanizmem iniekcji strumieniowej. Pomimo, iż technologia iniekcji strumieniowej jest dobrze przedstawiona, duża liczba innowacji opisywanych w literaturze, dostępnych na rynku, całkowicie została zignorowana. Mechanizm iniekcji strumieniowej nie jest szeroko opisany, ogranicza się tylko do podstawowych korelacji dotyczących omawianych zmiennych. Nie wzięto pod uwagę informacji dostępnych w literaturze na temat wpływu sprężonego powietrza, co nie jest w pełni zgodne z faktem, iż część analiz numerycznych przedstawionych w rozdziale 3 przedstawia pozytywny efekt.

Analizy numeryczne przedstawione w rozdziale 3 są bardzo interesujące, ponieważ dają wgląd „w głąb” mechanizmu iniekcji strumieniowej, pokazują wpływ gęstości i lepkości w szerokim zakresie liczby Reynoldsa. Porównując analizy numeryczne i formuły analityczne zaproponowano nową i ciekawą zależność pomiędzy parametrem hydrodynamicznym A i liczbą Reynoldsa Re , umożliwiając w ten sposób zaadaptowanie teorii Hinza do analiz

iniekcji strumieniowej. Wpływ otoczki ze sprężonego powietrza jest analizowany w tym rozdziale poprzez interesujące symulacje numeryczne. Mogłyby one mieć szerszą analizę, ponieważ jest to niezwykle ważny aspekt technologiczny. Patrząc na wyniki, pozytywny wpływ powietrza wydaje się być przeszacowany dla dużych prędkości strumienia powietrza. Bardzo mała liczba informacji na ten temat (np. Sondermann 2011, warsztaty w Paryżu) wskazuje, że przy małych prędkościach strumienia powietrza, zwiększenie jego prędkości zwiększa efektywność. Powyżej prędkości 150-200 m/s dalsze zwiększanie prędkości wydaje się być nieefektywne, a wartość 150 m/s może być uznana za wartość optymalną dla typowych początkowych prędkości iniektu.

Przegląd literaturowy w rozdziale 4 dotyczący geometrycznych i mechanicznych właściwości kolumn iniekcyjnych, jak również istniejących metod przewidywania średnicy kolumn, jest wyczerpujący, jasno i dobrze podsumowuje dostępne dane literaturowe.

Rozdziały 5, 6 i 7 są rdzenną częścią pracy, przedstawiają wyniki badań terenowych i laboratoryjnych.

Wszystkie informacje dotyczące eksperymentalnej części pracy są podane w rozdziale 5. Byłoby pożądane stosowanie dysz o większej średnicy i energii w celu posiadania nowych danych eksperymentalnych, na chwilę obecną niedostępnych w literaturze. W każdym razie, w pracy doktorskiej zbadano wystarczający zakres różnorodności parametrów technologicznych.

Pomiary średnic kolumn i ich przewidywanie przedstawione w rozdziale 6 wskazują na solidne podstawy obu metod. Dyskusja i powtórna kalibracja przedstawiona w rozdziale jest interesująca i użyteczna, i potwierdza niedoszacowanie w przewidywaniu średnic kolumn iniekcyjnych. Ponieważ jest to szczególnie prawdziwe w odniesieniu do wysokich energii i praca ta nie odnosi się do tego zakresu, pytanie czy te metody mogą być stosowane w tym zakresie wydaje się nadal otwarte.

Rozdział 7 podsumowuje wszystkie wyniki eksperymentalne wykonane w laboratorium. Wyniki potwierdzają, to co jest znane w literaturze, bez dodawania nowych dowodów z mechanicznego punktu widzenia. Bardzo interesująca jest analiza mineralogiczna, która wykazuje mniejszą ilość cementu pochodzącą z próbek wykonanych systemem podwójnym. Technologia jest bardziej efektywna pod względem średnicy, ale wprowadza szereg różnic w zakresie mikroskali, które są przedstawione poprzez analizy mineralogiczne.

Rozdział 8 podsumowuje wyniki badań i nakreśla perspektywy dalszych badań.

5. Podsumowanie i wnioski

Praca skupia się na trudnym temacie wglądu „w głąb” mechanizmu iniekcji strumieniowej i interpretacji nowych danych doświadczalnych. Analizy numeryczne nie przedstawiają nowych wyników, jednakże bardzo interesująca jest kalibracja parametrów hydrodynamicznych, które mogą zostać użyte w empirycznych metodach przewidywania średnicy kolumn. Główna zaleta pracy skupia się na wykonaniu dobrej jakości danych eksperymentalnych, zarówno in situ, jak i w warunkach laboratoryjnych, które stanowią bardzo ważny wkład w rozwoju technologii iniekcji strumieniowej i w konsekwencji metod przewidywania średnicy kolumn.

Na podstawie powyższych wniosków, potwierdzam iż praca mgr inż. Lidii Wanik pt. „Geometryczne i mechaniczne właściwości kolumn iniekcyjnych: badania doświadczalne i przewidywanie” (ang. „*Geometrical and mechanical properties of jet grouting columns: experimental investigations and prediction*”) spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, ze zm. w Dz. U. z 2005 r. Nr 164, poz. 1365 oraz w Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455) o stopniach Naukowych i Tytule Naukowym w zakresie Sztuki.

Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Lidii WANIK do publicznej obrony.

Z poważaniem,

Alessandro Flora

TKUMACZENIE: dr inż. Magdalena KOWALSKA

