

Gdańsk, 14.01.2021

Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. instytutu
Instytut Budownictwa Wodnego PAN
80–328 Gdańsk–Oliwa
Kościerska 7
Email:waldek@ibwpan.gda.pl

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ mgr Marcina Witowskiego pt.:

„Ocena sztywności wybranych gruntów w zakresie małych odkształceń”

Promotor: Prof. dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska
Promotor pomocniczy: dr Stanisław Łukasik

1. Uwagi wstępne i charakterystyka pracy

Niniejszą recenzję wykonałem na zlecenie Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie (pismo nr DZ-04647R:170/EB/18 z dnia 9 listopada 2020r.).

Rozprawa doktorska mgr Marcina Witowskiego w ogólności poświęcona jest wyznaczeniu charakterystyk sztywności popiołu lotnego, jako reprezentanta gruntu antropogenicznego i porównaniu ich ze sztywnościami innych wybranych gruntów naturalnych w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w lokalne czujniki do pomiaru deformacji próbki, które zostały samodzielnie opracowane przez Autora.

Przedstawiona mi do oceny praca liczy ogółem 232 strony, w ramach których podstawowa część pracy została zawarta na 185 stronach, a pozostałe zajmuje załącznik ze szczegółowymi wynikami przeprowadzonych badań. W zasadniczej części pracy umieszczono 130 rysunków, 7 tabel oraz 177 pozycji literatury uzupełnionych o 6 norm i aktów prawnych oraz 2 raporty z badań. Dodatkowo, szczegółowe wyniki badań przedstawiono w załączniku na 288 rysunkach. Pracę podzielono na 8 rozdziałów, z których część ma kilka podrozdziałów. Pracę uzupełnia wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenia w języku polskim i angielskim zamieszczone na jej początku.

Pierwsze 3 z 8 rozdziałów stanowi wprowadzenie do tematu rozprawy i do zasadniczych wyników pracy Autora.

W pierwszym rozdziale Autor charakteryzuje podjęty przez niego problem badawczy. Przedstawia genezę pracy podając generalne podstawy zagadnienia związanego z wiarygodną oceną sztywności gruntu w szerokim zakresie odkształceń ze szczególnym uwzględnieniem odkształceń bardzo małych i małych (poniżej 1%). Znaczenie tego zakresu analizuje na tle wszechstronnego przeglądu literatury tematu. Zwraca przy tym uwagę na ważność tej tematyki, a zarazem ubogość dostępnych materiałów w przypadku popiołów lotnych, które stanowią główny materiał badawczy analizowany w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

W rozdziale drugim Autor przedstawia przyjęte przez niego cele i zakres pracy i postawioną tezę badawczą.

Z kolei w rozdziale trzecim Autor definiuje podstawowe pojęcia związane z teoretycznym opisem sztywności gruntu. Kolejno dokonuje szerokiego przeglądu metod pomiarowych, zarówno laboratoryjnych jak i stosowanych w warunkach *in situ*, nakierowanych na wyznaczenie parametrów służących do opisu zmienności sztywności materiału w funkcji odkształcenia. Zwraca przy tym szczególną uwagę na pomiar deformacji próbek w badaniach trójosiowych w kontekście wiarygodnego ich wyznaczenia w zakresie bardzo małych i małych odkształceń.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały od czwartego do ósmego, w których Autor przedstawił wyniki przeprowadzonych przez niego badań eksperymentalnych i sformułował wnioski końcowe.

W rozdziale czwartym Autor omawia podstawowe cechy badanych gruntów tj. podstawowego – popiołu lotnego oraz gruntów porównawczych – piasku kwarcowego i kaolinu podając ich charakterystyki fizyczne i chemiczne. Opisuje tutaj również aparaturę badawczą wykorzystaną do badań oraz zastosowane procedury i sposób interpretacji otrzymanych wyników badań. Szczególną uwagę poświęca opisowi zaproponowanego przez niego, nowego czujnika do lokalnego pomiaru deformacji (enkodera). w teście trójosiowego ściskania

Z kolei rozdział piąty został poświęcony szczegółowej analizie otrzymanych wyników badań prowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania dla różnych ścieżek naprężenia, którym poddano badane grunty (konsolidowane izotropowo i anizotropowo), obejmujących również obszar trójosiowego rozciągania. Dokonano przy tym porównania wyników otrzymanych dla popiołu lotnego i badanych gruntów naturalnych.

W następnym rozdziale, szóstym, dokonano analizy różnic w wyznaczonej wytrzymałości popiołu lotnego pobranego ze składowiska i formowanego zarówno na sucho jak i na mokro w laboratorium, przy pomocy zdjęć wykonanych mikroskopem elektronowym.

Ostatnie dwa rozdziały pracy, tj. rozdział siódmy i ósmy zawierają podsumowanie oraz wnioski końcowe.

2. Ogólna ocena pracy

2.1 Ocena aktualności tematyki

Analiza pracy rzeczywistej konstrukcji inżynierskiej z punktu widzenia jej współpracy z podłożem gruntowym, a szczególnie teoretyczna predykcja jego zachowania jest ciągle dużym wyzwaniem zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. W chwili obecnej dysponujemy już bardzo zaawansowanymi narzędziami w postaci skomplikowanych modeli pracy materiału wraz z odpowiednimi kodami numerycznymi, które powinny stanowić dobrą bazę umożliwiającą nam prawidłowe odtworzenie pracy takich konstrukcji w warunkach *in situ*, choć czasami nie zawsze skutecznie. Niemniej jednak z uwagi na specyfikę materiału, jakim jest ośrodek gruntowy ciągle borykamy się z problemem właściwego doboru parametrów wiarygodnie opisujących charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową. Grunt jako nietypowy materiał, utożsamiany z ciałem stałym w opisie mechaniki ośrodków ciągłych, wymyka się standardowemu podejściu przyjętemu w tym opisie. Jednym z powodów jest, charakterystyczna dla takiego materiału, znacząca nieliniowość zależności naprężeń od odkształceń, a ta ma podstawowe znaczenie dla wiarygodnej oceny podatności podłoża gruntowego na pochodzące od konstrukcji obciążenie. To z kolei determinuje możliwość właściwego oszacowania deformacji podłoża.

Sytuacja jeszcze bardziej się komplikuje, gdy mamy do czynienia z podłożem zbudowanym z materiału antropogenicznego będącego wynikiem eksploatacji kopalni, takiego jak np. odpady poflotacyjne będące produktem ubocznym produkcji miedzi, a szczególnie popioły lotne pochodzące ze spalania węgla. Z uwagi na swoje właściwości, materiały te nie są zbyt powszechnie wykorzystywane jako materiał budowlany, pozostaje natomiast istotny problem ich składowania, co ma zazwyczaj miejsce w nadpoziomowych składowiskach odpadów. Uwarunkowania środowiskowe powodują, że składowiska takie są zazwyczaj rozbudowywane metodą do środka i ku górze, co sprawia, że mamy do czynienia z obiektami ziemnymi o wysokości kilkudziesięciu metrów. Ocena zachowania się takiego obiektu oraz możliwość jego bezpiecznej nadbudowy wymaga dokładnego rozpoznania właściwości fizycznych i mechanicznych zgromadzonego wewnątrz materiału odpadowego, w tym jego charakterystyki sztywności. Powyższe stanowiło genezę pracy doktorskiej mgr Marcina Witowskiego.

Dlatego też należy jednoznacznie stwierdzić, że podjęta przez Doktoranta tematyka pracy jest jak najbardziej aktualna i ważna zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia, w szczególności w naszym kraju, gdyż badania przez niego prowadzone dotyczyły popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla brunatnego w największej na świecie elektrowni opalanej węglem brunatnym, gromadzonego w pobliskim składowisku odpadów o znacznej kubaturze.

2.2 Ocena pracy

Autor w swojej pracy podjął się zadania dokładnego i wszechstronnego zbadania charakterystyki sztywności nietypowego materiału gruntowego, jakim jest bez wątpienia popiół lotny oraz skonfrontowania otrzymanych wyników z analogicznymi wynikami otrzymanymi dla gruntów naturalnych. Badania te przeprowadził w aparacie trójosiowego ściskania wyposażonym w elementy piezoelektryczne oraz w zestawie czujników do lokalnego pomiaru odkształceń umożliwiającym wyznaczenie wielkości odkształceń badanych gruntów w pełnym ich zakresie od bardzo małych do małych i większych. Zastosowane czujniki do lokalnego pomiaru odkształceń to rozwiązanie własne Autora pracy. Stanowiły one istotny element w wiarygodnym w określaniu charakterystyki naprężenie-odkształcenie.

Przeprowadzone przez Autora badania realizowane były dla bardzo szerokiego zakresu ścieżek naprężenia umożliwiając wyznaczenie powierzchni granicznych w przestrzeni naprężeń dla różnych zakresów pracy materiału (liniowo sprężystego, nieliniowo sprężystego oraz wybitnie plastycznego) oraz dla różnych stanów początkowych. Na podstawie przyporządkowania granic tych powierzchni do wykresów zależności naprężenie-odkształcenie Autor identyfikował zakresy zmian sztywności w funkcji odkształcenia.

Badania te były głównie prowadzone na próbkach popiołu lotnego pobranych zarówno w postaci zeskalonej suspensji bezpośrednio ze składowiska, jak też formowanych na sucho i mokro w warunkach laboratoryjnych, a wyniki porównane z wynikami badań przeprowadzonych dla gruntów naturalnych w postaci piasku kwarcowego i kaolinu reprezentujących grunty niespoiste i ze spójnością.

Wykonane przez Autora prace badawcze w zakresie możliwości zastosowania magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń w aparacie trójosiowym do oceny sztywności wybranych gruntów prowadzone były w ramach 6 celów szczegółowych wymienionych przez Autora w drugim rozdziale pracy:

- implementacji enkodera liniowego jako napróbkowego czujnika przemieszczenia w aparacie trójosiowego ściskania,
- określenia charakterystyki naprężenie – odkształcenie suspensji popiołów lotnych w zakresie odkształceń od 0,001% do 5%,
- porównania charakterystyki sztywności popiołu lotnego do charakterystyk reprezentatywnego gruntu niespoistego i spoistego,
- określenia wpływu formowania próbek popiołu lotnego na jego sztywność,
- wyznaczenia zmienności charakterystyki naprężenie – odkształcenie badanych gruntów,
- określenia współczynnika Poissona suspensji popiołów lotnych na podstawie badań Bender Elements (pomiar prędkości fali poprzecznej V_s oraz podłużnej V_p).

Na tej podstawie starał się udowodnić postawioną we wstępie rozprawy podstawową tezę pracy mówiącą o tym, że zastosowanie czujników własnej konstrukcji (liniowych enkoderów magnetycznych) do pomiarów przemieszczeń w badaniu trójosiowego ściskania ma istotne zalety w ocenie sztywności gruntów w porównaniu z dotychczas stosowanymi rozwiązaniami.

Analiza recenzowanej pracy doktorskiej skłania do generalnego wniosku, że dla osiągnięcia celu pracy oraz udowodnienia jej tezy Autor opracował bardzo szczegółową i wyczerpującą metodykę badawczą oraz wszechstronną analizę otrzymanych wyników. Należy przy tym zauważyć, że praca ma wybitnie empiryczny charakter, co niekoniecznie umniejsza jej znaczenie i ocenę, aczkolwiek pozostaje pewien niedosyt związany z możliwością porównania otrzymanych wyników z predykcjami teoretycznymi.

Przyjęta metodyka badawcza była poprzedzona szeroką analizą stosowanych metod pomiarowych do wyznaczania charakterystyk sztywnościowych gruntów, którą Autor przedstawił w rozdziale trzecim pracy. Oparł się tutaj na ogólnie znanym wykresie poglądowym zakresu stosowalności różnej aparatury badawczej i metod pomiarowych do oceny sztywności gruntu w zależności od zakresu odkształceń, w jakim ten pomiar jest możliwy. Kolejne podrozdziały tego rozdziału to dobry opis poszczególnych metod pomiarowych oraz wykorzystanej do tego celu aparatury laboratoryjnej w postaci typowych urządzeń geotechnicznych jak aparat trójosiowego ściskania, kolumna rezonansowa, czy skrętny aparat postaciowy. Opis ten został uzupełniony o badania w warunkach *in situ* oparte głównie o badania penetracyjne sondami wciskanymi z końcówkami sejsmicznymi oraz o sejsmikę powierzchniową. Należy uznać, że Autor dołożył starań w szczegółowym opisie poszczególnych aparatów badawczych, a szczególnie oprzyrządowania do pomiaru odkształceń w ich pełnym zakresie występowania oraz odpowiadających jemu metod pomiarowych. Z racji przyjętego celu pracy, tym ostatnim poświęcona została szczególna uwaga, w ramach której Autor bardzo dokładnie omawia zasady działania, dostępnych obecnie na rynku, różnego typu czujników napróbkowych do pomiarów przemieszczeń, omawiając ich wady i zalety w odniesieniu do różnego rodzaju gruntów (spoiste, niespoiste, słabe, itd.). Stawia przy tym tezę, że omawiane wady tradycyjnie używanych czujników napróbkowych takich, jak czujniki wykorzystujące efekt Halla, czujniki zbliżeniowe, czy czujniki typu LVDT znikają przy zastosowaniu nowego typu czujników napróbkowych opartych na enkoderze liniowym będących efektem własnych poszukiwań w tej materii. Zgodnie z opinią Autora czujniki te charakteryzują się dobrą rozdzielczością, dużą dokładnością, dużym zasięgiem pomiaru, małą

masą, stabilnością w szerokim przedziale temperatur i ciśnień oraz łatwością implementacji w standardowej komorze trójosiowego ściskania.

Szczegółowy opis materiałów badawczych przyjętych do oceny sztywności, a w szczególności głównego „bohatera” – popiołu lotnego został zawarty w rozdziale czwartym pracy. Badany popiół lotny został pobrany ze składowiska popiołów przy kopalni odkrywkowej Bełchatów. Z racji swego pochodzenia oraz genezy jest to materiał bardzo drobny o złożonym składzie chemicznym. Stąd analiza jego struktury została poparta szeregiem mikrografii otrzymanych za pomocą mikroskopu elektronowego, które Autor dokładnie omawia. Istotną rolę w ocenie właściwości fizycznych i mechanicznych badanego popiołu odegrało ich porównanie z typowymi reprezentantami gruntów naturalnych tj. gruntu niespoistego w postaci piasku kwarcowego oraz spoistego – kaolinu. Z porównania tego wynika, iż pomimo że popiołowi bliżej jest do cech fizycznych, charakterystycznych dla gruntu niespoistego, to jednak poddany ścinaniu objawia zachowanie odpowiadające gruntowi spoistemu. Stąd, m, innymi, przyjęto, że jest to tzw. grunt przejściowy.

Kolejno, w tym samym rozdziale, Autor bardzo szczegółowo omawia metodykę prowadzenia badań w aparacie trójosiowego ściskania pod kątem wyznaczania sztywności różnego rodzaju gruntów w pełnym zakresie występowania odkształceń podając przy tym żelazne zasady, jakie muszą być spełnione, aby otrzymany wynik był w pełni wiarygodny. Problem ten omawia na przykładzie opisu aparatu stosowanego przez niego w badaniach, niestety nie podając producenta tego aparatu. Z tego opisu wynika, że aparat ten ma dość istotną wadę, jaką jest połączenie tłoka zakończonego komorą obciążeniową z próbką. Z mojego doświadczenia wynika, że może to mieć duże konsekwencje, do czego odniosę się bardziej szczegółowo w następnym paragrafie.

Sporo uwagi poświęca Autor opisowi nowego czujnika do pomiaru przemieszczeń zastosowanego w badaniach. Jest to niewątpliwie wartość dodana pracy. Jego zasada działania jest bardzo zbliżona do zasady działania czujników Halla, niemniej jednak z racji znacznie niższej ceny może on stanowić istotną konkurencję dla tych ostatnich. **Należy tutaj bezwzględnie docenić inwencję Doktoranta w poszukiwaniu nowych sposobów prowadzenia bardzo precyzyjnych pomiarów nakierowanych na postawiony przez siebie cel tj. zbadanie sztywności popiołów lotnych.**

Jest to tym bardziej istotne, że tak, jak pisze Autor, „implementacja enkoderów w badaniach trójosiowych wymagała opracowania wielu kluczowych elementów, począwszy od fizycznego połączenia układu scalonego z komputerem, poprzez stworzenie odpowiedniego systemu mocowania czujników na próbce, a skończywszy na napisaniu nowego oprogramowania umożliwiającego połączenie wszystkich elementów w sprawnie działające oprzyrządowanie laboratoryjne”. Wszystkie te elementy zostały szczegółowo opisane w pracy, a opisy uzupełnione o badania stabilności nowego czujnika w warunkach pełnego zakresu obciążeń oraz dokładną jego walidację poprzez porównanie z pracą czujnika LVDT przeprowadzoną zarówno dla gruntu naturalnego (niespoistego i spoistego), jak i dla materiałów typowych dla ciał stałych o znanych właściwościach odkształceniowych (nylon, poliuretan). Rozdział ten uzupełnia opis przyjętej procedury badawczej, sposobu formowania próbek oraz opisu fazy nasączania i konsolidacji, jak też sposobu obciążania próbek badanych materiałów.

Dla przejrzystości osiągnięcia zamierzonego celu Autor wydzielił pięć serii badawczych, z czego trzy dotyczyły badań popiołu lotnego (seria T1 – próbki popiołu

formowane na sucho, konsolidowane anizotropowo; seria T2 – próbki piasku formowane na sucho, konsolidowane anizotropowo; seria T3 - próbki popiołu pobrane ze składowiska (stwardniała suspensja), konsolidowane anizotropowo; seria T4 – próbki kaolinu formowane w konsolidometrze, konsolidowane izotropowo; seria T5 - próbki popiołu lotnego (suspensja) formowane na mokro w konsolidometrze i konsolidowane izotropowo). Rozdział ten kończy krótki opis przyjętego sposobu interpretacji otrzymanych wyników.

Należy uznać, że również i w tym rozdziale Autor dołożył starań, aby bardzo przejrzysto i w logicznie poukładany sposób przedstawić procedurę prowadzonych przez siebie badań, aby osiągnąć zamierzony cel. Niewątpliwie mankamentem jest błąd, który pojawił się we wzorze nr 20 opisującym sposób oszacowania zmian odkształceń objętościowych wyznaczonych na podstawie lokalnych pomiarów przemieszczeń za pomocą czujników napróbkowych. Do tego również odniosę się bardziej szczegółowo w kolejnym paragrafie.

Najistotniejszym rozdziałem pracy jest rozdział piąty, gdzie Autor przedstawia zinterpretowane wyniki wszystkich, zaplanowanych w programie badań, eksperymentów przeprowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania. Rozdział ten jest również najobszerniejszy. W rozdziale tym Autor przedstawia wyniki przeprowadzonej przez siebie serii doświadczeń dla trzech rodzajów gruntów w postaci charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych zgodnie z propozycją Jardine'a tj. dewiator naprężenia-odkształcenie postaciowe oraz efektywny aksjator naprężenia- odkształcenie objętościowe, jak też ich kombinacji dla wybranych przez siebie ścieżek naprężenia (10 dla próbek konsolidowanych anizotropowo i 8 dla konsolidowanych izotropowo). Ścieżki te pokrywały całą przestrzeń naprężeń reprezentując różne postacie obciążenia i odciążenia badanej próbki takie jak: czyste ścinanie w fazie obciążenia (ścieżka +q), czyste ścinanie w fazie odciążenia (ścieżka -q), izotropowe obciążenie i odciążenie przy stałym dewiatorze (ścieżki $\pm p$) oraz ścieżki pośrednie ze zwiększającymi się równocześnie i odpowiednio zmniejszającymi się dewiatorem i aksjatorem (ścieżki +j i +v oraz -j i -v) jak też kombinacje przeciwstawnych kierunków dwóch niezmienników ($\Delta q > 0$ i $\Delta p' < 0$ – ścieżka -h oraz $\Delta q < 0$ i $\Delta p' > 0$ – ścieżka +h). Przy okazji mam do Doktoranta pytanie, czy wg niego ścieżki +q, -h i -p powinny być traktowane jako odciążenie, czy obciążenie?

Niezależnie, dla przypadku konsolidacji izotropowej, której poddawane były próbki popiołu lotnego formowane na mokro oraz kaolinu ścieżki, naprężenia reprezentowały zarówno trójosiowe ściskanie jak i rozciąganie.

Kolejno, na podstawie bardzo dokładnej analizy otrzymanych wyników przedstawianych w różnych skalach: od bardzo małej do dużej oraz przyjętej metody interpretacji Autor wyznaczył granice stref: liniowo-sprężystej, nieliniowo-sprężystej i plastycznej, co kolejno umożliwiło mu wyznaczenie odpowiadających im powierzchni granicznych w przestrzeni naprężeń wyrażonej w postaci niezmienniczej. Następnie Autor dokonuje bardzo szczegółowej analizy powierzchni i kształtu poszczególnych stref konfrontując je pomiędzy poszczególnymi badanymi gruntami.

Należy tutaj docenić i podkreślić dużą staranność Doktoranta zarówno w czasie prowadzenia pomiarów jak też, a może szczególnie, w opracowaniu i interpretacji otrzymanych wyników. Otrzymane w skutek tego powierzchnie graniczne stanowią bardzo cenny materiał badawczy i należy żałować, że Autor nie pokusił się o próbę skonfrontowania otrzymanych wyników z predykcjami teoretycznymi z wykorzystaniem popularnych modeli gruntowych.

Należy również zwrócić przy tym uwagę, że przyjęty sposób interpretacyjny zmierzający do wyznaczania granic tych stref, szczególnie strefy drugiej, częściowo trzeciej, nie jest do końca przekonujący.

W kolejnym podrozdziale Autor dokonuje już właściwej interpretacji wyników przeprowadzonych doświadczeń zmierzającej do celu pracy tj. analizy krzywych naprężenie-odkształcenie zmierzającej do wyznaczenia sztywności badanych gruntów w całym jej zakresie. Tutaj również dla lepszego zobrazowania wyników, a przede wszystkim dokładniejszej ich interpretacji, wykorzystywane są różne skale odkształceń, zmierzając do dokładnego wyznaczenia charakterystyk sztywności w bardzo małym ich zakresie. To z kolei było podstawą do wyznaczenia wartości siecznych modułów odkształcenia, by w rezultacie dojść do typowych krzywych przedstawiających degradację uśrednionego modułu ścinania w funkcji odkształcenia postaciowego. Tu również należy pochwalić Autora za niezwykle staranność w analizie i opracowaniu wyników końcowych oraz ich bardzo szczegółową analizę.

Należy przy tym zauważyć, że w przypadku popiołu lotnego, dla największej skali odpowiadającej bardzo małym odkształceniom rzędu 10^{-5} , wykresy naprężenie - odkształcenie reprezentowane są przez dość szerokie pasma, czego nie obserwuje się w przypadku piasku, w mniejszym stopniu kaolinu. To z kolei rzutuje na bardzo duże rozrzuty wyznaczonego na tej podstawie modułu siecznego (Rys. 71, 73, 73 czy 86). Powstaje naturalne pytanie, co jest przyczyną tak dużego rozrzutu.

Stąd, do ostatecznego wyznaczenia wartości modułu siecznego w zakresie małych odkształceń Autor wykorzystuje proces uśredniania wartości modułów dla danej ścieżki naprężenia i danego odkształcenia otrzymując wynik końcowy w postaci degradacji sztywności w funkcji odkształcenia reprezentowanej przez pojedynczą linię. Nie jest przy tym do końca jasne jaka jest to forma uśredniania.

Na otrzymane wykresy Autor naniósł punkty reprezentujące granice stref reprezentowanych przez trzy powierzchnie graniczne w przestrzeni naprężeń i ponownie dokonał wszechstronnej analizy lokalizacji tych stref zarówno z punktu widzenia różnych sposobów obciążania badanych materiałów jak też i różnic pomiędzy nimi. Zastanawiającym jest dość duży rozrzut punktów reprezentujących granicę pierwszej strefy – czysto sprężystej, w przypadku popiołu lotnego. Chciałbym, aby Autor skomentował ten rozrzut.

Podobne zabiegi jak w przypadku modułu ścinania zostały zastosowane do wyznaczenia modułu odkształcalności objętościowej na podstawie interpretacji zależności średnie ciśnienie efektywne – odkształcenie objętościowe.

W kolejnych dwóch podrozdziałach Autor przedstawia układ wektorów odpowiadających przyrostom odkształcenia postaciowego i objętościowego oraz kontury tych niezmienników odkształcenia jak też odkształcenia łącznego reprezentowanego przez moduł wektora naniesione na przestrzeń naprężeń. Z opisu rysunków od 107 do 121, na których Autor prezentuje te układy dla pięciu rodzajów badanych próbek wynika, że są to obwiednie odkształceń naniesione na przestrzeń naprężeń. Z uwagi na to, że taka forma prezentacji nie jest do końca jasna będę prosił Autora o jej dokładne wyjaśnienie.

Uzupełnieniem tego rozdziału jest analiza wartości prędkości rozchodzenia się fali poprzecznej w badanych próbkach gruntów i wyznaczonego na tej podstawie maksymalnego modułu ścinania zwanego też początkowym (G_0). Dodatkowo wartości prędkości rozchodzenia się fali podłużnej posłużyły Autorowi do wyznaczenia współczynnika Poissona dla badanych gruntów, konfrontując go również z wartościami tego współczynnika dla innych gruntów głównie pochodzenia lodowcowego zaczerpniętymi z literatury.

Dodatkowo, w kolejnym rozdziale, na bazie analizy obrazów z mikroskopu elektronowego Autor próbuje znaleźć przyczynę różnic w wartościach wytrzymałości i sztywności badanych próbek popiołu lotnego w zależności od sposobu ich formowania i przygotowywania wysuwając wniosek, że różnica ta jest spowodowana obecnością wody.

Pracę kończy podsumowanie analizy wyników przeprowadzonych badań i wnioski końcowe dowodzące postawionej w pracy tezie.

Podsumowując należy stwierdzić, że przyjęte w pracy cele główne to jest ocena możliwości zastosowania magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń w aparacie trójosiowego ściskania, a także określenie zakresu zmienności sztywności suspensji popiołów lotnych w zakresie bardzo małych i małych odkształceń, w porównaniu z wybranymi gruntami naturalnymi oraz założone cele szczegółowe zostały przez Doktoranta w pełni zrealizowane, a wynikające z nich teza pracy, udowodniona.

Jeśli chodzi o oryginalny wkład pracy Doktoranta, to jest on głównie związany z opracowaniem nowego typu czujników napróbkowych opartych na enkoderze magnetycznym do lokalnego pomiaru małych odkształceń w badaniu trójosiowym. Zgodnie z informacją zawartą w pracy czujniki te zostały przez Autora opatentowane jako własność intelektualna oraz były przedmiotem pracy opublikowanej w renomowanym czasopiśmie Geotechnical Testing Journal ACSE, poświęconym dokładnie takiego rodzaju innowacjom. Czujniki te wraz i z ich szczegółową implementacją i przetestowaniem pracy dla różnych rodzajów gruntów, a w szczególności, tak słabego gruntu antropogenicznego, jakim jest popiół lotny stanowi niewątpliwie dużą wartość przedstawionej mi do recenzji pracy. Trzeba jednak przy tym pamiętać, że czujniki enkoderowe działają w bardzo podobny sposób jak popularne, dostępne komercyjnie, czujniki wykorzystujące efekt Halla. Nie umniejsza to jednak oryginalnego wkładu Autora w rozwój metod i urządzeń pomiarowych w laboratoryjnych badaniach geotechnicznych.

Drugim elementem oryginalnym wg mnie jest wszechstronne zbadanie charakterystyki sztywności popiołów lotnych w pełnym zakresie odkształceń oraz formie ich występowania i porównanie jej z charakterystykami sztywnościowymi typowych gruntów naturalnych.

3. Uwagi krytyczne

Jak już wcześniej pisałem praca jest wybitnie empiryczna, choć z bardzo wszechstronnym i kompleksowym programem badań oraz taką samą analizą otrzymanych wyników. Tak więc pod względem metodologicznym i sposobem jej implementacji, nie budzi zastrzeżeń. W tekście pracy Autor nie ustrzegł się mniejszych lub większych błędów opisowych, ale nie one stanowią największy ładunek krytyczny. Z tego ostatniego wymienilibym dwa główne, które mogą rzutować zarówno na otrzymane wyniki doświadczeń, które, co by nie powiedzieć, stanowią podstawowy element pracy, jak i wyciągnięte na ich wnioski końcowe.

Pierwsza uwaga krytyczna dotyczy sposobu obciążania badanych próbek w komorze aparatu trójosiowego, który Autor pracy wykorzystywał w przeprowadzonych badaniach. Zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale 4 zastosowane rozwiązanie nie pozwala na pełną kontrolę osiowości przyłożonego obciążenia pionowego z próbki. Jest to dość istotna wada, która szczególnie ujawnia

się w przypadku badania gruntów niespoistych i słabych, co ma niezwykle istotny wpływ na reakcję próbki, szczególnie w początkowym etapie obciążenia, odpowiadającemu zakresowi bardzo małych odkształceń. Niewątpliwie sytuację poprawia zastosowane przez Autora połączenie z możliwością zadawania podciśnienia w celu zapewnienia lepszego przylegania czujnika siły do górnej kopułki zamykającej próbkę od góry, ale niestety nie eliminuje ono całkowicie tej wady. Z mojego doświadczenia wynika, że jedynie sztywne połączenia tłoka z komorą obciążeniową z tłoczyskiem zamykającym próbkę od góry pozwala na zapewnienie dostatecznej osiowości przyłożonego obciążenia pionowego, co jest możliwe w przypadku aparatów trójosiowych z wewnętrznymi prętami. Przy braku osiowości mamy do czynienia z obciążeniem mimośrodowym powodującym wystąpienie niejednorodnych odkształceń zarówno osiowych jak i radialnych co skutkuje tym, że jedna strona próbki będzie ulegać ścisaniu, a druga rozciąganiu bardzo zniekształcając otrzymane wyniki. Wątpliwości mogły być rozwiane, gdyby Autor przedstawił niezależny pomiar uzyskany w danym badaniu z dwóch przeciwległych czujników osiowych, gdzie wielkość potencjalnych różnic pomierzonych przemieszczeń próbki mogłaby potwierdzić osiowy lub mimośrodkowy charakter obciążenia. Mam więc w tym miejscu pytanie, jakie zabiegi, czy w ogóle, zastosował Autor, aby zapewnić maksymalną osiowość zadawanego obciążenia pionowego i czy problem ten był niezależnie badany i analizowany.

Druga uwaga krytyczna dotyczy równania 20, na podstawie które Autor wyznacza odkształceniowi objętościowe wykorzystując składowe odkształcenia pionowego i bocznego. W podanej przez Autora postaci wzór jest błędny. Odkształcenie objętościowe, które jest pierwszym niezmiennikiem tensora odkształcenia jest sumą odkształceń głównych, a nie jedną trzecią tej sumy, jak podaje Autor. Dla stanu osiowo symetrycznego jaki mamy w klasycznym aparacie trójosiowego ścisania odkształcenia poziome są identyczne, stąd ich dwukrotna wartość. Zachodzi więc pytanie, czy jest to błąd drukarski, czy jednak wzór ten posłużył Autorowi do wyznaczania odkształceń objętościowych. Jeśli tak to wyznaczone na tej podstawie charakterystyki modułu odkształcenia są błędne. Bardzo proszę o skomentowanie tej kwestii.

Ostatnia krytyczna uwaga, choć już mniejszego kalibru, dotyczy samego sformułowania podstawowego celu pracy, gdzie Autor na pierwszym miejscu stawia cytuję „możliwości zastosowania magnetycznych przetworników położenia liniowego do pomiaru przemieszczeń przy małych odkształceniach w warunkach trójosiowych, jako alternatywnego do niektórych metod stosowanych w laboratoriach geotechnicznych”, natomiast na drugim wyznaczenie zakresu sztywności popiołu lotnego w pełnym zakresie odkształceń i porównaniu go z wybranymi gruntami naturalnymi. Na tej podstawie formułuje też tezę pracy. Wydaje się, że bardziej zasadnym było odwrócenie tych celów tzn. celem podstawowym powinno być badanie sztywności popiołów lotnych, a zastosowanie nowych czujników do pomiaru przemieszczeń przy małych odkształceniach jedynie skutecznym narzędziem umożliwiającym realizację tego celu. Zmianie powinna też w takim przypadku ulec teza pracy.

4. Uwagi natury redakcyjnej, drobne uchybienia

Praca jest napisana poprawnym pod względem stylistycznym językiem, komunikatywnym, dobrze przekazującym uporządkowane myśli Autora, który sprawnie porusza się w realizowanej tematyce. Jak pisałem wyżej Autor nie ustrzegł

się błędów stylistycznych, choć nie ma ich zbyt wiele. Poniżej wylistowałem drobne uchybienia językowe. Więcej uwag szczegółowych, w formie komentarzy merytorycznych, zamieściłem w tekście pracy.

- Str. 17 – jest „na nadpoziomowych składowiskach, powinno być „ w nadpoziomowych składowiskach” .
- Str. 21 – jest „w rozdziale szóstym i siódmym dokonano podsumowania”, powinno być „w rozdziale siódmym i ósmym dokonano podsumowania”.
- Str. 26 – jest „w małym zakresie odkształceń”, powinno być „w zakresie małych odkształceń”.
- Str. 62 – zdanie pod rys. 25 zaczyna się od kropki.
- Str. 72 – Rys 34 – czujnik LVDT nie jest czujnikiem lokalnym.
- Str. 72 – nie znam techniki suchego usypywania przy użyciu podciśnienia.
- Str. 76 – dziesięć rzędów wielkości to jest 10^{10} , a tu chodzi o zdecydowanie o rząd wielkości pomiędzy modułem Younga poliuretanu i nylonu.
- Str. 81 – jest „ściśle określonej prędkości przyrostu naprężenia”, powinno być „ściśle określonej prędkości naprężenia”, prędkość przyrostu to już przyspieszenie.
- Str. 81 – pojęcie parametru stanu w teorii stanu ustalonego deformacji ma ściśle określoną definicję, czy o taki parametr stanu Autorowi chodziło?
- Str. 94 – nie ma pojęcia dyssypacji wody, jest pojęcie dyssypacji ciśnienia, energii.
- Str. 169 – jest „prześciowe”, powinno być „prześciowej”.

Wszystkie cytowane pozycje literatury znajdują się w jej spisie. Należy podkreślić jej bogactwo i różnorodność oraz stosunkowo dużą liczbę cytowanych prac doktorskich z dotyczących analizowanego zagadnienia.

5. Wniosek końcowy

Mgr Marcin Witowski przedstawił jako rozprawę doktorską pracę zawierającą oryginalne wyniki i poszerzającą wiedzę na temat charakterystyk sztywnościowych popiołów lotnych wykorzystując do tego celu własnej konstrukcji czujniki do lokalnego pomiaru przemieszczeń w próbie trójosiowego ściskania. Lektura pracy wskazuje na bardzo dobre predyspozycje Autora w zakresie wykonywania samodzielnych prac naukowych o charakterze przede wszystkim eksperymentalnym. Wyniki przedstawione w rozprawie są bardzo interesujące zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

Wobec powyższego stwierdzam, że **recenzowana rozprawa doktorska mgr Marcina Witowskiego spełnia w pełni wymogi stawiane pracom doktorskim** w myśl Ustawy 595 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami).

Rozprawa stanowi oryginalną propozycję rozwiązania i rozwinięcia problemu naukowego oraz wykazuje dostateczny poziom wiedzy kandydata w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Tym samym wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Waldemar Świdziński

