Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz
Katedra Geotechniki
Instytut Inżynierii Lądowej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Warszawa, 16.01.2021 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

pt. „*Ocena sztywności wybranych gruntów w zakresie małych odkształceń*" autorstwa mgra Marcina Witowskiego, opracowana na podstawie umowy o dzieło Nr GF-1131-0021/2020/UDHO. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska, a promotorem pomocniczym dr Stanisław Łukasik.

1. Tematyka rozprawy

Polska energetyka bazuje głównie na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego, zatem zmuszona jest do poszukiwania bezpiecznych dla środowiska technologii spalania, oczyszczania spalin oraz zagospodarowania odpadów paleniskowych. Popioły lotne pochodzące ze spalania węgla brunatnego charakteryzują się specyficznymi właściwościami fizycznymi, mechanicznymi i chemicznymi. Wzrost ilości popiołów lotnych wymusza podejmowanie badań pod kątem oceny możliwości ich wykorzystania.

Rozprawa doktorska mgra Marcina Witowskiego rozszerza obszar badań nad wykorzystaniem popiołu lotnego jako materiału konstrukcyjnego w budownictwie, co ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Doktorant podjął trudną tematykę oceny sztywności zawiesiny popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla brunatnego. Jako cel rozprawy przyjął ocenę możliwości zastosowania magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń pionowych i promieniowych w aparacie trójosiowym oraz określenie zmienności sztywności zawiesiny popiołu lotnego w zakresie bardzo małych i małych odkształceń w porównaniu z wybranymi gruntami naturalnymi. W wiodących ośrodkach naukowych prowadzone są intensywne prace nad doskonaleniem pomiarów przemieszczeń wykonywanych bezpośrednio na próbce oraz poszukiwania nowych rozwiązań rozszerzających dotychczasowe możliwości pomiarowe. Opracowany i wdrożony przez Doktoranta oryginalny czujnik do pomiarów przemieszczeń w badaniach trójosiowych wychodzi naprzeciw tym oczekiwaniom.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgra Marcina Witowskiego składa się z ośmiu rozdziałów, wykazu ważniejszych oznaczeń, zestawienia 177 pozycji literatury, w tym 146 obcojęzycznych, 1 aktu prawnego i 5 norm oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Całkowita objętość pracy wynosi 232 strony, w tym bez załącznika 185 stron. Rozprawa, poza tekstem drukowanym, zawiera 7 tabel i 130 rysunków. Rozprawa charakteryzuje się przejrzystym i dobrze skonstruowanym układem rozdziałów. Tematyka podrozdziałów nie jest zbyt szczegółowa i odpowiada strukturze i potrzebom pracy. Uwagi

dotyczące wykorzystanych terminów geotechnicznych i poprawności językowej zamieszczono w tabeli załączonej do recenzji.

Rozdział 1. stanowi wstęp, który zawiera kluczowe stwierdzenie o potrzebie lepszego poznania nieliniowej zależności sztywności od odkształcenia ośrodka gruntowego w zakresie bardzo małych i małych odkształceń. Doktorant zwrócił uwagę na rolę głównych czynników warunkujących odkształceniowe zachowanie się gruntów pod obciążeniem, dotychczasowe badania w tym zakresie przeprowadzone dla gruntów spoistych oraz modelowanie z wykorzystaniem zaawansowanych modeli konstytutywnych. Doktorant przedstawił koncepcję zaproponowaną przez prof. R. Jardine'a z Imperial College, wykorzystywaną w rozprawie, dotyczącą wydzielenia stref sztywności poprzez wyznaczenie trzech powierzchni granicznych. Jednakże stwierdzenie, że „drugą strefę charakteryzuje nieliniowa, ale odwracalna charakterystyka naprężenie-odkształcenie, której granicą jest powierzchnia Y_2" w porównaniu z rzeczywistym zachowaniem się gruntu wymaga komentarza. Zdaniem Doktoranta z dotychczasowych badań publikowanych przez autorów krajowych i zagranicznych wynika, że rozpoznanie charakterystyki naprężenie-odkształcenie popiołów lotnych, szczególnie składowanych w postaci wodnej zawiesiny w nadpoziomowych składowiskach, jest niedostateczne.

W r*ozdziale 2.* Doktorant bardzo jasno przedstawił tezę badawczą, cel i zakres pracy oraz kierunki podjętych badań. Przyjął tezę, że zastosowanie czujników własnej konstrukcji (enkoderów liniowych) do pomiarów przemieszczeń w badaniu trójosiowym ma istotne zalety w ocenie sztywności gruntów w porównaniu z dotychczas stosowanymi rozwiązaniami. Zdaniem Doktoranta główna zaleta nowego czujnika własnej konstrukcji polega na szerszym zakresie jego stosowania. Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń w aparacie trójosiowym oraz określenie zmienności sztywności zawiesiny popiołów lotnych w zakresie bardzo małych i małych odkształceń, w porównaniu z wybranymi gruntami naturalnymi.

W przeglądzie literatury (*rozdział 3.*) Doktorant przedstawił dotychczasowy stan wiedzy na temat pomiaru sztywności gruntu. Podano w nim definicje używanych parametrów opisujących odkształcalność gruntu jednakże, zamieszczone równania (1), (3) i (5) wymagają dodatkowego wyjaśnienia. Przedstawiono przegląd metod pomiarowych wyznaczania parametrów charakteryzujących sztywność gruntu. Zakres stosowania metod pomiarowych pokazano na wykresie zależności modułu sztywności gruntu od odkształcenia. W ramach badań polowych krótko scharakteryzowano badania *in situ* obejmujące sejsmiczne sondowania statyczne SCPT i sejsmiczne sondowania dylatometryczne SDMT, badania typu down-hole i cross-hole oraz badania SASW i CSWS. Należy podkreślić, że w przypadku sejsmicznego sondowania statycznego SCPT już od ponad dwudziestu lat stosowne jest również w Polsce wyposażenie wykorzystujące dwa geofony wbudowane w żerdź w odległości 1 m.

W ramach badań laboratoryjnych krótko scharakteryzowano badania trójosiowe, badania w cylindrycznym aparacie skrętnym, badania w kolumnie rezonansowej oraz laboratoryjne

techniki wykorzystujące pomiar fal akustycznych. Przeanalizowano modyfikacje komory aparatu trójosiowego do badań w zakresie małych odkształceń zwracając większą uwagę na dotychczas stosowane napróbkowe czujniki przemieszczeń. Szczegółowo przedstawiono zalety i wady najczęściej stosowanych w geotechnicznej praktyce laboratoryjnej lokalnych czujników przemieszczenia typu LVDT oraz czujników wykorzystujących efekt Halla. W podsumowaniu rozdziału stwierdzono, że udoskonalenie metody badań zawiesiny popiołu lotnego można uzyskać poprzez zastosowanie nowego przetwornika przemieszczeń wykorzystującego enkoder liniowy, który będzie charakteryzował się zadawalającą rozdzielczością, dużą dokładnością, dużym zasięgiem pomiaru, małą masą, stabilnością w szerokim przedziale temperatur i ciśnień oraz łatwością implementacji w komorze aparatu trójosiowego.

Rozdział 4. zawiera ogólną charakterystykę badanego popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla brunatnego wydobywanego w kopalni odkrywkowej Bełchatów. Odpady spalania, których głównym składnikiem są popioły lotne transportowane są metodą hydrauliczną do mokrego składowiska Bagno-Lubień. Wewnętrzna struktura popiołu lotnego przedstawiona za pomocą zdjęć w mikroskopie elektronowym wskazuje, że większe ziarna występujące w popiele są mocno porowate, o budowie pumeksowej. Charakterystyka właściwości chemicznych popiołu lotnego obejmuje jego skład chemiczny z różnych okresów uzyskania w porównaniu do danych z literatury. Dokonana ocena popiołu lotnego pod względem dopuszczalnych zawartości pierwiastków śladowych wskazuje, że mieszczą się one w zakresie wartości dopuszczalnych dla gruntów grupy II, z wyjątkiem zawartości kadmu.

W ramach charakterystyki właściwości fizycznych popiołów lotnych przedstawiono ich uziarnienie, gęstość właściwą, wskaźnik różnoziarnistości, maksymalny i minimalny wskaźnik porowatości. Jednakże, wykres uziarnienia badanego popiołu lotnego przedstawiony na rysunku 17 wymaga dodatkowego komentarza oraz uzupełnienia umożliwiającego określenie zawartości poszczególnych frakcji, również średnic zastępczych d_{10}, d_{30} i d_{60} do obliczenia wskaźnika krzywizny. Wartość gęstości właściwej szkieletu gruntowego wynosząca 2,65 Mg/m^3 podana w tabeli 3 wymaga dodatkowego komentarza biorąc pod uwagę wcześniej zamieszczoną informację, że większe ziarna występujące w popiele są mocno porowate, o budowie pumeksowej. Wykres uziarnienia badanego piasku przedstawiony na rysunku 19 wymaga uzupełnienia podziału na poszczególne frakcje (w celu ujednolicenia rysunków z wykresami uziarnienia) oraz określenia średnic zastępczych d_{10}, d_{30} i d_{60} do obliczenia wskaźnika krzywizny. Wykres uziarnienia badanego kaolinu przedstawiony na rysunku 21 wymaga uzupełnienia umożliwiającego określenie zawartości poszczególnych frakcji. Ponadto, wymaga wyjaśnienia powiązanie pomiędzy obwiedniami zniszczenia przedstawionymi w układzie $q–p'$ na rysunku 22, a wartościami parametrów wytrzymałościowych φ' i c' zestawionymi w tabeli 6.

W ramach badań własnych sztywności gruntów w aparacie trójosiowym przedstawiono wymagania i szczegółowy opis stanowiska badawczego. Przy czym stwierdzenie, że aparat trójosiowy musi umożliwić badania dowolnej ścieżki w przestrzeni q-p' wymaga dodatkowego wyjaśnienia. Szczególną uwagę poświęcono charakterystyce nowego czujnika

przemieszczeń pod kątem spełnienia wcześniej wspomnianych wymagań, który porównano z dotychczasowymi czujnikami w tabeli 7. Implementacja enkoderów w badaniach trójosiowych wymagała od Doktoranta pokonania wielu problemów związanych z połączeniem układu scalonego z komputerem, opracowania systemu mocowania czujników na próbce oraz opracowania oprogramowania umożliwiającego połączenie elementów w sprawnie działające oprzyrządowanie laboratoryjne. Zastosowany interfejs umożliwia również odczyt temperatury układu, co pozwala na kompensację fluktuacji temperatury. Wyniki sprawdzenia dokładności pomiaru przemieszczenia nowym czujnikiem wskazują, że przy zasięgu przemieszczeń do 3 mm maksymalna wartość błędu wynosi do 0,005 mm, natomiast przy zasięgu przemieszczeń do 5 mm wynosi do 0,007 mm. Uzyskane przez Doktoranta doświadczenie pozwoliło na wprowadzenie udoskonalonej wersji mocowania enkoderów na próbce. Przeprowadzone testy wskazują, że system kompensacji temperatury dobrze sprawdza się w warunkach podwyższonej oraz obniżonej temperatury. Stwierdzono również dużą stabilność pomiaru przemieszczeń przy różnych wartościach ciśnienia wody w komorze. Walidacja nowego czujnika przeprowadzona na podstawie porównania z pomiarami przeprowadzonymi napróbkowymi czujnikami LVDT na próbkach piasku wskazuje dobrą zgodność w pełnym zakresie odkształceń. Sprawdzenie skuteczności działania systemu przeprowadzono również na próbkach poliuretanu i nylonu charakteryzujących się stałą wartością modułu odkształcenia w szerokim zakresie odkształcenia. Badania przeprowadzone na próbkach kaolinu potwierdziły duże możliwości nowych czujników w przypadku pomiaru przemieszczeń promieniowych.

Badania porównawcze popiołu lotnego i piasku przeprowadzono na próbkach formowanych na sucho. Jednakże dane dotyczące uzyskanych wskaźników porowatości e i stopnia zagęszczenia I_D zamieszczone w rozprawie wymagają komentarza. Badania porównawcze popiołu lotnego i kaolinu przeprowadzono na próbkach formowanych w komorze konsolidacyjnej z zawiesiny. Próbki popiołu lotnego poddano konsolidacji izotropowej i anizotropowej, piasku konsolidacji anizotropowej, natomiast kaolinu konsolidacji izotropowej. Badania sztywności gruntu w przestrzeni $q–p'$ w płaszczyźnie $\sigma'_2 = \sigma'_3$ dla próbek konsolidowanych anizotropowo przeprowadzono wzdłuż wybranych 10 ścieżek naprężenia, natomiast dla próbek konsolidowanych izotropowo przeprowadzono wzdłuż wybranych 8 ścieżek naprężenia. Ścieżki naprężenia obejmowały obciążenie przy danym stosunku q do p' przy ściskaniu oraz przy wydłużaniu.

W r*ozdziale 5.* przedstawiono analizę wyników badań własnych popiołu lotnego w porównaniu do gruntów naturalnych przeprowadzoną zgodnie z koncepcją zaproponowaną przez prof. R. Jardine'a. Wyniki badań przedstawiono w formie serii wykresów $\Delta q–\Delta\varepsilon_s$ i $\Delta q–\Delta\varepsilon_v$ w kilku skalach w celu umożliwienia wyznaczenia punktów charakteryzujących położenie granicznych powierzchni uplastycznienia Y_1, Y_2 i Y_3. Wykorzystując ścieżki naprężenia w układzie $q–p'$ z naniesionymi charakterystycznymi punktami wyznaczono położenie granicznych powierzchni uplastycznienia Y_1, Y_2 i Y_3 dla popiołu lotnego, piasku i kaolinu. W przypadku popiołu lotnego konsolidowanego anizotropowo powierzchnie graniczne Y_1 i Y_2 mają kształt wrzecionowaty, rozciągnięty w strefę ściskania i rozciągania oraz są

nachylone zgodnie z linią konsolidacji K_0. Analizując wyniki badań stwierdzono, że gdy naprężenie osiągnie punkt znajdujący się na granicy stref Y_1 i Y_2 występują zachowania przejściowe między sprężystością a plastycznością co wymaga wyjaśnienia. Ponadto, wskazane jest przedstawienie na rysunku porównania powierzchni granicznych Y_3 uzyskanych dla badanych gruntów, które zostało opisane w tekście.

Przebieg charakterystyk naprężenie-odkształcenie przy zbadanych ścieżkach naprężenia przedstawiono w serii wykresów $\Delta q–\varepsilon_s$ i $G_{sec}–\varepsilon_s$ oraz przy braku zmiany dewiatora naprężenia w postaci $\Delta p'–\varepsilon_v$ i $K_{sec}–\varepsilon_v$. Zależność pomiędzy siecznym modułem odkształcenia postaciowego a odkształceniem postaciowym wskazuje na większe wartości modułu uzyskane dla popiołu lotnego niż dla piasku, również w przypadku zawiesiny pobranej ze składowiska. Wartości modułów są większe dla ścieżek przy q malejącym w porównaniu do wartości modułów przy q rosnącym. W zakresie odkształceń do 0,1% wartości siecznych modułów odkształcenia postaciowego zmniejszają się o jeden a nawet dwa rzędy wielkości. Wartość modułu ścinania zależy od wartości kąta obrotu ścieżki obciążenia. Przy czym przedstawione na rysunku 75 zmniejszenie modułu ścinania popiołu pobranego ze składowiska w porównaniu do rysunku 76 wymaga dodatkowego komentarza. W przypadku popiołu lotnego zagęszczanego na sucho, konsolidowanego anizotropowo, granice Y_1 rozciągają się do 0,008% odkształcenia postaciowego, granice Y_2 rozciągają się do 0,025%, natomiast granice Y_3 rozciągają się do 0,06%. W przypadku popiołu lotnego pobranego ze składowiska, granice Y_1 rozciągają się do 0,007% odkształcenia postaciowego, granice Y_2 rozciągają się do 0,02%, natomiast granice Y_3 rozciągają się nawet powyżej 0,1%. W przypadku popiołu lotnego formowanego na mokro, konsolidowanego izotropowo, granice Y_1 rozciągają się do 0,01% odkształcenia postaciowego, granice Y_2 rozciągają się do 0,016%, natomiast granice Y_3 rozciągają się do 0,02%.

Zależność pomiędzy siecznym modułem odkształcenia objętościowego a odkształceniem objętościowym wskazuje na większe wartości modułu uzyskane dla popiołu lotnego niż dla piasku. Wartości modułów odkształcenia objętościowego są większe dla ścieżek przy p' rosnącym w porównaniu do wartości modułów przy p' malejącym. Wartość modułu odkształcenia objętościowego zależy od wartości kąta obrotu ścieżki obciążenia. W przypadku popiołu lotnego zagęszczanego na sucho, konsolidowanego anizotropowo, granice Y_1 rozciągają się do 0,003% odkształcenia objętościowego, granice Y_2 rozciągają się do 0,004%, natomiast granice Y_3 rozciągają się do 0,012%. W przypadku popiołu lotnego pobranego ze składowiska, granice Y_1 rozciągają się do 0,015% odkształcenia objętościowego, granice Y_2 rozciągają się do 0,06%, natomiast granice Y_3 rozciągają się nawet powyżej 0,1%. W przypadku popiołu lotnego formowanego na mokro, konsolidowanego izotropowo, granice Y_1 rozciągają się do 0,006% odkształcenia objętościowego, granice Y_2 rozciągają się do 0,01%, natomiast granice Y_3 rozciągają się od 0,015%.

Dodatkowo na powierzchni uplastycznienia Y_2 i Y_3 pokazano wektory wskazujące kierunek rozwoju danej powierzchni na podstawie przyrostu odkształceń postaciowych $\Delta\varepsilon_s$ i przyrostu odkształceń objętościowych $\Delta\varepsilon_v$. Przy czym przedstawiona na rysunku 101 analiza

graficzna przyrostu odkształceń oraz zamieszczone w tekście stwierdzenia wymagają dodatkowego komentarza.

Na podstawie uzyskanych wyników badań przedstawiono kontury odkształceń postaciowych, objętościowych oraz połączonych wartości tych odkształceń. W przypadku popiołu lotnego zagęszczanego na sucho oraz pobranego ze składowiska uzyskano maksymalne odkształcenia postaciowe i odkształcenia objętościowe na poziomie 0,1%, natomiast popiołu lotnego formowanego na mokro na poziomie 0,5%. Na podstawie analizy wykresów przedstawiających połączone odkształcenia postaciowe i objętościowe oceniono przebieg zmniejszenia sztywności badanego gruntu w przestrzeni $q–p'$.

Na podstawie pomiaru prędkości fal poprzecznych zostały wyznaczone maksymalne wartości modułu ścinania. Wskazane jest porównanie uzyskanych wartości początkowego modułu ścinania G_0 na wykresach przedstawiających zmniejszenie modułu ścinania w postaci zależności $G_{sec}–\varepsilon_s$, co pozwala zweryfikować przebieg zależności w zakresie bardzo małych odkształceń. Na podstawie pomiaru prędkości fal poprzecznych i podłużnych zostały wyznaczone wartości współczynnika Poissona v.

W r*ozdziale 6.* przedstawiono wyniki badań struktury próbek popiołu lotnego wskazujące na istotne różnice w przebiegu procesu hydratacji popiołu lotnego zagęszczanego na sucho, formowanego na mokro oraz pobranego ze składowiska. Zmiany zachodzące w strukturze próbek popiołu lotnego są główną przyczyną wcześniej wspomnianych różnic wielkości i przebiegu zmiany sztywności popiołu lotnego.

W *rozdziale 7.* podano podsumowanie i wnioski szczegółowe, a w *rozdziale 8* wnioski końcowe z uzyskanych przez Doktoranta wyników badań i analiz oraz kierunki dalszych badań.

3. Uwagi ogólne i szczegółowe

Analiza rozprawy doktorskiej nasunęła mi następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne, które powinny być wyjaśnione lub skomentowane podczas publicznej obrony pracy:

- w pracy przytoczono wybrane czynniki warunkujące sztywność gruntu co wymaga dodatkowego komentarza,
- stwierdzenie, że „drugą strefę charakteryzuje nieliniowa, ale odwracalna charakterystyka naprężenie-odkształcenie, której granicą jest powierzchnia Y_2” w porównaniu z rzeczywistym zachowaniem się gruntu wymaga komentarza,
- definicje parametrów opisujących odkształcalność gruntu podane w postaci równań (1), (3) i (5) wymagają dodatkowego wyjaśnienia,
- wykres uziarnienia badanego popiołu lotnego przedstawiony na rysunku 17 wymaga dodatkowego komentarza oraz uzupełnienia umożliwiającego określenie zawartości poszczególnych frakcji, również średnic zastępczych d_{10}, d_{30} i d_{60} do obliczenia wskaźnika krzywizny. Wykres uziarnienia badanego piasku przedstawiony na rysunku 19

wymaga uzupełnienia podziału na poszczególne frakcje oraz określenia średnic zastępczych d_{10}, d_{30} i d_{60} do obliczenia wskaźnika krzywizny. Wykres uziarnienia badanego kaolinu przedstawiony na rysunku 21 wymaga uzupełnienia umożliwiającego określenie zawartości poszczególnych frakcji,

- wartość gęstości właściwej szkieletu gruntowego wynosząca 2,65 Mg/m^3 podana w tabeli 3 wymaga dodatkowego komentarza, biorąc pod uwagę wcześniej zamieszczoną informację, że większe ziarna występujące w popiele są mocno porowate, o budowie pumeksowej,
- wymaga wyjaśnienia powiązanie pomiędzy obwiedniami zniszczenia przedstawionymi w układzie $q–p'$ na rysunku 22, a wartościami parametrów wytrzymałościowych φ' i c' zestawionych w tabeli 6,
- stwierdzenie, że aparat trójosiowy musi umożliwić badania dowolnej ścieżki w przestrzeni $q–p'$ wymaga dodatkowego wyjaśnienia,
- dane dotyczące uzyskanych wskaźników porowatości e i stopnia zagęszczenia I_D popiołu lotnego formowanych na sucho i piasku zamieszczone w rozprawie wymagają komentarza. Co było podstawą do przyjęcia w badaniach tak małej wartości stopnia zagęszczenia I_D?
- dla jakich gruntów jest możliwy współczynnik parcia gruntu w spoczynku $K_0 = 0{,}2$?
- stwierdzenie, że gdy naprężenie osiągnie punkt znajdujący się na granicy stref Y_1 i Y_2 występują zachowania przejściowe między sprężystością a plastycznością wymaga wyjaśnienia,
- wskazane jest przedstawienie na rysunku porównania powierzchni granicznych Y_3 uzyskanych dla badanych gruntów, które zostało opisane w tekście,
- czy podjęto próbę wyznaczenia punktów charakteryzujących położenie granicznych powierzchni uplastycznienia Y_1, Y_2 i Y_3 nie na podstawie przyrostów ale prędkości?
- wyniki badań wskazują większe wartości modułu odkształcenia postaciowego i modułu odkształcenia objętościowego dla popiołu lotnego niż dla piasku. Czy podobnej relacji należy spodziewać się w przypadku stanu bardziej zagęszczonego tych gruntów?
- przedstawiona na rysunku 101 analiza graficzna przyrostu odkształceń w postaci przyrostu odkształceń postaciowych $\Delta\varepsilon_s$ i przyrostu odkształceń objętościowych $\Delta\varepsilon_v$ oraz zamieszczone w tekście stwierdzenia wymagają dodatkowego komentarza,
- wskazane jest porównanie uzyskanych wartości początkowego modułu ścinania G_0 na wykresach przedstawiających zmniejszenie modułu ścinania w postaci zależności $G_{sec}–\varepsilon_s$, co pozwala na weryfikację przebiegu zależności w zakresie bardzo małych odkształceń,
- czym należy tłumaczyć, że graniczna powierzchnia uplastycznienia Y_1 jest większa dla popiołu lotnego niż dla piasku? Czy podobnej tendencji można się spodziewać gdy grunty będą bardziej zagęszczone?

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne nie pomniejszają przedstawionych w recenzji własnych i oryginalnych osiągnięć Doktoranta.

Drobne poprawki w tekście, tabelkach i na rysunkach zostały zaznaczone w recenzowanym egzemplarzu i zestawione w załączonej tabeli oraz przekazane Doktorantowi w celu umożliwienia dokonania niezbędnych korekt przed przekazaniem części pracy do druku.

4. Ocena osiągnięć zawartych w rozprawie

Rozprawa ma charakter doświadczalno-analityczny. Mgr Marcin Witowski podjął się zbadania i oceny możliwości zastosowania magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń w aparacie trójosiowym oraz określenie zmienności sztywności zawiesiny popiołu lotnego w zakresie bardzo małych i małych odkształceń w porównaniu z wybranymi gruntami naturalnymi. Dla zrealizowania założonego celu rozprawy Doktorant wykonał obszerne i bardzo dobrze udokumentowane nowoczesne badania laboratoryjne. Bogaty materiał doświadczalny umożliwił Doktorantowi wykazanie, że opracowane nowe magnetyczne przetworniki (enkodery) zapewniają określenie zmienności sztywności zawiesiny popiołu lotnego w dużym zakresie odkształceń.

Za najważniejsze elementy oryginalne, stanowiące własny dorobek naukowy Doktoranta należy uznać:

- opracowanie i wdrożenie nowych magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do napróbkowego pomiaru przemieszczeń pionowych i promieniowych w aparacie trójosiowym, przy zachowaniu stałej wartości rozdzielczości i dokładności w całym zakresie pomiarowym,
- analiza mechanizmu uplastycznienia z której wynika, że popioły lotne poddane konsolidacji anizotropowej wykazują graniczne powierzchnie uplastycznienia o kształcie wydłużonym wzdłuż linii K_0,
- wykazanie, że kształt i wielkość granicznej powierzchni uplastycznienia Y_1 badanych popiołów lotnych jest zdecydowanie większa od powierzchni wyznaczonej dla piasku,
- analiza przebiegu odkształceń postaciowych i objętościowych z której wynika, że popioły lotne wykazują kształt konturów i odległości pomiędzy nimi odmienny od badanych gruntów wzorcowych,
- wykazanie, że charakterystyki sztywności badanych popiołów lotnych zmieniają się w zależności od sposobu formowania próbek. Wartości parametrów opisujących sztywność próbek formowanych na sucho są większe niż w przypadku próbek formowanych na mokro,
- wykazanie, że badane popioły lotne niezależnie od sposobu formowania przy analizowanym stopniu zagęszczenia wykazują większe wartości modułu ścinania G_{sec}

i modułu odkształcenia objętościowego K_{sec} w porównaniu z badanymi gruntami wzorcowymi.

Należy podkreślić, że założony przez Doktoranta naukowy cel rozprawy został osiągnięty, a postawiona teza udowodniona. Przedstawione w pracy wnioski końcowe są w pełni udokumentowane i stanowią własny i oryginalny wkład Doktoranta w poznanie i ocenę możliwości zastosowania magnetycznych przetworników (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń w aparacie trójosiowym oraz określenie zmienności sztywności zawiesiny popiołu lotnego pod obciążeniem do projektowania zagospodarowania mokrych składowisk odpadów paleniskowych pochodzących ze spalania węgla brunatnego.

5. Wniosek końcowy

Mgr Marcin Witowski przedłożył do oceny rozprawę doktorską opracowaną na podstawie nowoczesnych, bardzo dobrze zaprogramowanych i obszernych badań laboratoryjnych służących ocenie możliwości zastosowania magnetycznych przetworników (enkoderów) do pomiaru przemieszczeń w aparacie trójosiowym oraz określenie zmienności sztywności zawiesiny popiołu lotnego pod obciążeniem. Recenzowana praca wniosła oryginalne elementy poznawcze w dyscyplinie „budownictwo" wskazane w recenzji rozprawy. Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązanie problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuję zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra Marcina Witowskiego pt. „*Ocena sztywności wybranych gruntów w zakresie małych odkształceń*" do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę opracowanie i wdrożenie nowych magnetycznych przetworników położenia liniowego (enkoderów) do napróbkowego pomiaru przemieszczeń pionowych i promieniowych w aparacie trójosiowym oraz wnikliwą analizę i znaczenie naukowe i wdrożeniowe uzyskanych wyników badań, które spotkały się z dużym uznaniem po opublikowaniu artykułu w czasopiśmie *Geotechnical Testing Journal*, składam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz

Uwagi redakcyjne

do rozprawy doktorskiej mgra Marcina Witowskiego pt.
„Ocena sztywności wybranych gruntów w zakresie małych odkształceń”

Strona	Jest	Powinno być
w całej pracy	suspensji popiołów lotnych	zawiesiny popiołów lotnych
w całej pracy	suspensji popiołowej	zawiesiny popiołowej
w całej pracy	stwardniałej suspensji popiołowej	stwardniałej zawiesiny popiołowej
w całej pracy	suspensji	zawiesiny
w całej pracy	degradacja modułu ścinania	zmniejszenie modułu ścinania
w całej pracy	degradacja modułu odkształcenia objętościowego	zmniejszenie modułu odkształcenia objętościowego
w całej pracy	degradacja sztywności	zmniejszenie sztywności
w całej pracy	niska, wysoka, niższe, wyższe, najniższa, najwyższa itd.	mała, duża, mniejsze, większe, najmniejsza, największa itd.
w całej pracy	redukcja sztywności	zmniejszenie sztywności
w całej pracy	spadek wartości modułu	zmniejszenie wartości modułu
w całej pracy	spadek sztywności	zmniejszenie sztywności
str. 7	SMALL STRAINS STIFFNESS ASSESSMENT OF SELECTED SOILS	ASSESSMENT OF SMALL STRAINS STIFFNESS OF SELECTED SOILS
str. 7	triaxial apparatus of compression	triaxial apparatus
str. 24	Rys. 4	W podpisie rys. 4 brak jest opisu oznaczenia E_{max}
str. 26	dowiódł, że	wykazał, że
str. 31	Rys. 7 – Idea cyklicznego	Rys. 7 – Idea cylindrycznego
str. 72	stopień zagęszczenia I_D wyniósł 0,85	???
str. 76	o co najmniej dziesięć rzędów wielkości	???
str. 91	wartości oscylują w przedziale 0,20-	???
str. 94	dyssypację wody z gruntu	odpływ wody z gruntu
str. 95	obserwowano dyssypację nadmiernego ciśnienia wody	obserwowano rozpraszanie nadwyżki ciśnienia wody w porach
str. 98	prędkość fali ścinającej	prędkość fali poprzecznej
str. 98	prędkość fali ciśnieniowej	prędkość fali podłużnej
str. 100	serii wykresów Δq-$\Delta\varepsilon_s$ i $\Delta p'$-$\Delta\varepsilon_v$ w charakterystyce Δq-ε_s	serii wykresów Δq-$\Delta\varepsilon_s$ i Δq-$\Delta\varepsilon_v$ w charakterystyce Δq-$\Delta\varepsilon_s$
str. 108	Wertykalnie zasięg stref	Pionowo zasięg stref
str. 134	spadek wartości	zmniejszenie wartości
str. 134	w małym zakresie odkształceń	w zakresie małych odkształceń
str. 152	fal poprzecznych i podłużnych zostały	fal poprzecznych zostały
str. 152	zbadanych według wzoru 23	obliczony według wzoru 23
str. 153	poddanych odziaływaniu pokrywy lodowcowej	poddanych oddziaływaniu pokrywy lodowcowej
str. 153	wykazują pewną korelację	wykazują słabą korelację
str. 155	dobrze korelują się z wartościami	dobrze korelują z wartościami
str. 156	co stoi w dużym kontraście do	w przeciwieństwie do
str. 157	wykrystalizował etryngit	wykrystalizował się etryngit
str. 165	gdzie odpowiedź gruntu	gdzie reakcja gruntu
str. 168	wskaźnika Poissona	współczynnika Poissona