

Dr hab. inż. Maria Jolanta Sulewska, prof. PB
Katedra Geotechniki i Mechaniki Konstrukcji
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

RECENZJA

poprawionej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Głuchowskiego na temat: „Reakcja gruntu spoistego na obciążenia cykliczne w warunkach bez odpływu”

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Alojzy Szymański.
Promotorem pomocniczym jest dr inż. Wojciech Sas.

1. Podstawa opracowania

Recenzję poprawionej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Głuchowskiego pt. „Reakcja gruntu spoistego na obciążenia cykliczne w warunkach bez odpływu” opracowałam na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie dr. hab. inż. Eugeniusza Kody, prof. nzw. SGGW (pismo z dnia 25.10.2018) w związku z decyzją Rady Wydziału z dnia 24.10.2018 roku.

Egzemplarz poprawionej wersji pracy doktorskiej wraz z pismem Dziekana WBiŚ SGGW w Warszawie otrzymałam 30.10.2019 r.

2. Ogólna charakterystyka i zakres pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została wykonana w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Problematyka rozprawy zawiera się w obszarze dyscypliny budownictwo. Rozprawa ma charakter badawczy. Praca dotyczy analizy wyników badań gruntów spoistych w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania.

Rozprawa liczy ogółem 214 stron, w tym 28 stron załączników. Rozprawa zawiera 93 rysunki i 16 tabel. Praca składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu treści, spisu oznaczeń, sześciu rozdziałów, spisu literatury, pięciu załączników oraz spisów rysunków i tabel.

Rozdział 1. stanowi wstęp (6,5 stron), w którym sprecyzowano problem badawczy, określono cel pracy i hipotezę badawczą oraz zakres pracy.

Rozdział 2. zawiera przegląd literatury (44 strony). Przegląd literatury jest obszerny, z podziałem na analizy poszczególnych zagadnień, dotyczących obciążeń cyklicznych gruntów.

W rozdziale 3. opisano materiały i metody badań (18 stron). Badania zasadnicze wykonano w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania. Opisano wykonane dodatkowe badania laboratoryjne wybranych parametrów geotechnicznych.

Rozdział 4. zawiera wyniki badań i ich analizę (79 stron).

W rozdziale 5. (3 strony) zamieszczono autorską propozycję kryterium klasyfikacji gruntów spoistych obciążonych cyklicznie ze względu na potencjał deformacji.

Rozdział 6. (6 stron) zawiera podsumowanie pracy, wnioski, opis oryginalnych elementów pracy oraz kierunków dalszych badań.

W **spisie literatury** zamieszczono 168 pozycji, w tym: 3 artykuły autorskie lub współautorskie oraz 11 norm i specyfikacji technicznych. Cytowano głównie angielskojęzyczne pozycje literatury (około 90%); pozycje wydanych po roku 2000 przywołano 51%.

3. Cel rozprawy i hipoteza badawcza

Celem pracy jest rozpoznanie reakcji trzech gruntów spoistych na obciążenia cykliczne w zakresie różnych stanów naprężeń, przy czym wyjaśniono rozpatrywany zakres pojęcia „reakcja gruntu spoistego na obciążenia cykliczne”, a mianowicie analizy będą dotyczyły:

- 1) przyrostu nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu w zależności od liczby cykli obciążeń i w zależności od przyrostu naprężeń pionowych,
- 2) przebiegu ścieżek naprężenia przy zastosowanych wartościach obciążenia cyklicznego,
- 3) sposobu akumulacji odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach obciążenia.

Hipoteza pracy zakłada, że obciążenia cykliczne gruntu spoistego w warunkach bez odpływu prowadzą do akumulacji odkształceń plastycznych, przy czym akumulacja odkształceń może mieć różną charakterystykę.

Hipoteza badawcza jest uszczegółowiona przez trzy **hipotezy pomocnicze**:

- 1) grunt spoisty ma zdolność dostosowania się do pewnej granicznej wielkości naprężenia cyklicznego,
- 2) wielkość akumulowanych odkształceń plastycznych w danych warunkach obciążenia można opisać jako zjawisko stałego przyrostu odkształceń plastycznych,
- 3) długotrwałe obciążenie cykliczne może prowadzić do zmniejszania się sztywności gruntu spoistego bez odpływu.

4. Uwagi i pytania merytoryczne do poszczególnych rozdziałów rozprawy

W tym punkcie recenzji zawarłam uwagi i pytania, dotyczące treści kolejnych rozdziałów rozprawy.

Rozdziały 1 i 2 mają charakter przeglądowy.

Autor szczegółowo i wnikliwie naświetla problem badawczy, omawia naprężenia w gruncie, obciążenia cykliczne i ich źródła, nośność i użytkowość podłoża gruntowego obciążonego cyklicznie, porównanie ze sobą obciążeń monotonicznych i cyklicznych, odkształcenia sprężyste gruntów obciążonych cyklicznie i cykliczny moduł sprężystości M_r , odkształcenia plastyczne gruntów obciążonych cyklicznie, teorię dostosowania, modelowanie odkształceń plastycznych zgodnie z teorią dostosowania. Szczególnie interesujący jest rozdział 2.4, w którym Autor omawia opisane w literaturze badania dotyczące ciśnienia wody w porach gruntów obciążonych cyklicznie i wpływ na reakcje gruntów spoistych: sposobu obciążania cyklicznego i spoistości gruntu oraz degradację sztywności gruntu obciążonego cyklicznie. Przegląd literatury kończy się podsumowaniem i analizą stanu wiedzy oraz uzasadnieniem podjęcia tematu, gdzie stwierdzono, że badania będą przeprowadzane w warunkach obciążeń cyklicznych gruntów spoistych będących podłożem gruntowym konstrukcji fundamentów i dróg. Na koniec sprecyzowano cele badawcze rozprawy.

Trafnie wybrano i zacytowano bardzo wiele pozycji literatury.

W rozdziale 2.2.2 podano (Head 1986), że częstotliwość obciążeń ruchem drogowym i kolejowym wynosi 1-100 Hz, a maszyn i silników do 100 Hz, przy czym można przyjąć, że przy częstotliwości $f \leq 5$ Hz obciążenie jest quasi-statyczne. Odczuwa się brak bardziej szczegółowej klasyfikacji obciążeń cyklicznych z uwagi na wybrane kryteria oraz charakterystyki obciążeń cyklicznych najczęściej działających na podłoża obiektów budowlanych.

W rozdziale 3. dotyczącym materiałów i metod badawczych wyjaśniono m. in. założenia dotyczące stanu naprężenia panującego w podłożu gruntowym konstrukcji drogowych lub fundamentów bezpośrednich, znajdującym się „poniżej poziomu przemarzania do głębokości 2,0 m p.p.t.”. Wykonano 18 badań próbek gruntów w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania, według przyjętej własnej procedury badawczej. Czym się kierowano przy opracowaniu własnej procedury badawczej?

W jaki sposób przeprowadzano konsolidację izotropową próbki w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania?

W rozdziale 3.1.3 Autor napisał: „Szczególną uwagę poświęcono normie PN-EN 13286-7:2004 Część 7: Próba cyklicznego obciążania mieszanek niezwiązanych...”. Na czym polegało poświęcenie szczególnej uwagi?

Wykonano dodatkowe badania laboratoryjne: analizy sitowe i areometryczne, badania granic Atterberga, badania parametrów zagęszczalności gruntów metodą Proctora, badania edometryczne, badania monotoniczne wytrzymałości gruntów na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania, badania prędkości fali poprzecznej za pomocą piezoelementów.

Do badań wybrano 3 grunty spoiste o wskaźniku plastyczności: 18,4; 23,5 oraz 9,9%. Z gruntów przerobionych przygotowywano próbki do dalszych badań, przy wilgotności gruntu 5,65-18,57%, zagęszczając je metodą zbliżoną do metody Proctora.

Mam zastrzeżenia do nazw gruntów ustalonych na podstawie ich składu granulometrycznego. Według zacytowanej poprawki do normy klasyfikacyjnej gruntów PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012: grunty 1 i 2 o przyjętym symbolu sasiCl nazwano glinami ilastymi, a według tablicy NA.2 należało nadać im następującą polską nazwę: ility z pyłem i z piaskiem. Grunt 3 o przyjętym symbolu clSa nazwano piaskiem zilonym, tymczasem według tablicy NA.2 należało nazwać go piaskiem z łem. Ponadto na str. 72 badane grunty niewłaściwie określono jako: grunt 2 - spoisty ciężki, grunt 3 - mało spoisty z większą zawartością frakcji ilastej. Ponadto powstaje pytanie, co wynika z rysunku 25.?

Korzystając z nowej klasyfikacji należy odczytać zawartość poszczególnych frakcji (tzw. gruntów podstawowych według PN-EN ISO 14688-1:2006) korzystając z nowych wartości granicznych średnic frakcji, które nie zmieniły się na granicy frakcji żwirowej i piaskowej – 2 mm i na granicy frakcji pyłowej i iłowej – 0,002 mm, natomiast zmieniły się na granicy frakcji piaskowej i pyłowej z 0,05 mm na 0,063 mm, co powoduje zmniejszenie się zawartości % frakcji piaskowej i zwiększenie się zawartości % frakcji pyłowej, wobec czego mogą zmienić się symbole gruntów. Na rys. 23 pracy nie zaznaczono nowych zakresów średnic frakcji, więc nie można stwierdzić, czy odczytano zawartości procentowe frakcji piaskowej i pyłowej uwzględniając nowe średnice graniczne.

Przy badaniu Proctora zawsze należy podać, którą metodą wykonano badania.

Dlaczego w badaniu edometrycznym pierwsze obciążenie wykonywano do naprężeń równych 1000 kPa i dlaczego moduł M obliczono w zakresie 400-1000 kPa?

W rozdziale 4. zamieszczono program badań gruntów spoistych w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania. Wykonano badania 18. próbek gruntów obciążonych cyklicznie z częstotliwością obciążenia równą 1 Hz, przy czym wartościami zmiennymi były: efektywne mniejsze naprężenie główne w zakresie $\sigma'_3 = 45-275$ kPa, amplituda naprężenia dewiatorowego w jednym cyklu $q_a = 2,6-11,0$ kPa, średnie naprężenia dewiatorowe $q_m = 25,6-32,3$ kPa i liczba cykli $N = 1 \cdot 10^4$ lub $5 \cdot 10^4$.

Jak było obliczane efektywne mniejsze naprężenie główne σ'_3 ?

Przeanalizowano wykresy o różnych przebiegach następujących zależności:

1) zależności nadwyżek ciśnienia wody w porach Δu od liczby cykli N o nieliniowym przebiegu,

2) zależności nadwyżek ciśnienia wody w porach Δu od odkształcenia osiowego ϵ_1 o wykresach składających się z części liniowej i z części nieliniowej.

Dużym osiągnięciem Doktoranta jest uogólnienie mechanizmu zmian ciśnienia wody w porach, który pokazano na wykresie zależności $\Delta u = f(N)$ (rys. 54). Mechanizm (i wykres) podzielono na 4 etapy: pierwszy cykl obciążenia, stały szybki przyrost nadwyżki ciśnienia wody w porach, stabilizacja nadwyżki ciśnienia wody w porach i faza plateau (zatrzymanie się wzrostu albo stały powolny wzrost lub spadek nadwyżki ciśnienia). W szczególności opracowano ogólne równanie empiryczne (39) $\Delta u = f(N)$ dla wszystkich przypadków oraz, na podstawie danych z badań, równanie empiryczne (40) współczynnika $c_{du} = f(\sigma'_3)$ do równania (39) wraz ze współczynnikami równania (40) i współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,705$ przy $n = 18$. Wartość standardowego błędu estymacji równa $\pm 0,231$ przy zakresie danych $c_{du} = 0,084 - 0,928$ świadczy o tym, że równanie (40) nie ma zbyt dobrej dokładności przewidywania, co zresztą potwierdza rys. 56. Przypuszczam, że na podstawie większej liczby danych z badań jeszcze innych gruntów będzie może polepszyć w przyszłości jakość równania (40).

Przeanalizowano przebieg ścieżek naprężenia w badaniach trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu. Co oznacza na rysunkach 57 i 58 czarna podwójna linia, jak się ją wyznacza i co oznacza „strona sucha” i „strona mokra” przy obciążeniach cyklicznych?

Następny rozdział 4.6.1 zawiera bardzo obszerny opis analiz pętli histerezy i odkształceń sprężystych, a następny rozdział zawiera analizę przyrostów odkształceń plastycznych. Uważam, że jest to znaczące osiągnięcie rozprawy doktorskiej, ponieważ Doktorant zaproponował sposób modelowania przyrostów odkształceń plastycznych w 3 zakresach liczby cykli obciążenia: pierwszego cyklu, od 2 do $2 \cdot 10^3$ cykli i dla $N > 2 \cdot 10^3$ cykli, pokazał opracowane wzory oraz bardzo interesującą ocenę ex-post niepewności modelu empirycznego (61), wyrażającego wartość odkształceń plastycznych przy obciążeniu długotrwałym. Wykazał, że błąd względny przewidywania wynosi 3-73%, przeprowadził weryfikację modelu na nowych danych, uzyskując podobny błąd procentowy (ile?).

Dlaczego w równaniu regresji liniowej (43) współczynnik determinacji równa się $R^2 = 0,472$ co wynika z analizy statystycznej w załączniku E, zamiast wynosić $R^2 = 0,598^2 = 0,358$ jak wynika to z tabeli 10. współczynników korelacji liniowej Pearsona? Skąd te rozbieżności?

Dlaczego w Załączniku E w równaniu (50) są inne wartości stałych równania niż w tym samym równaniu zapisanym na str. 147 tekstu rozprawy?

W rozdziale 5. zawarto propozycję autorską wprowadzenia kryterium klasyfikacji gruntów spoistych obciążonych cyklicznie w warunkach bez odpływu, która jest ważna dla praktyki. Norma PN-EN 13286-7:2004 dla mieszanek niezwiązanych spoiwem hydraulicznym z gruntów niespoistych podaje kryterium nieprzekroczenia strefy plastycznego dostosowania w postaci równania (68): $\epsilon_{p5000} - \epsilon_{p3000} < 0,4 \cdot 10^{-3}$.

Autor zaproponował modyfikację wzoru (68) i uzyskał wzór (71): $\epsilon_{p5000} - \epsilon_{p3000} < 0,75 \cdot 10^{-3}$.

Spełnienie tego warunku ma zapewnić, że odkształcenia plastyczne podłoża gruntowego z zagęszczonych gruntów spoistych od obciążeń cyklicznych nie przekroczą wartości 1%.

Czy dla innych gruntów niż były badane również powinien obowiązywać zaproponowany wzór (71)?

Co Autor miał na myśli pisząc na str. 162: „Ponieważ przyjęta w Eurokodzie 7 propozycja analizy deformacji ma postać jak w równaniu (68)...”?

Rozdział 6. zawiera podsumowanie pracy i wnioski, spośród których najważniejszymi są: wnioski potwierdzające realizację założonych celów pracy, wniosek który potwierdza hipotezę badawczą, że obciążenia cykliczne gruntu spoistego w warunkach bez odpływu prowadzą do

akumulacji odkształceń plastycznych o różnej charakterystyce oraz wnioski potwierdzające hipotezy pomocnicze.

5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa ma charakter pracy eksperymentalnej i dotyczy geotechnicznych badań laboratoryjnych, których wyniki mogą zainteresować także drogowców.

W pracy został przedstawiony problem obciążeń cyklicznych gruntów spoistych w warunkach bez odpływu. Rozprawa doktorska ma aspekty naukowe, jak również użytkowe, ponieważ obciążenia cykliczne są obecne w podłożu gruntowym budowli komunikacyjnych, przemysłowych i innych.

Autor przeprowadził badania 18. próbek reprezentujących 3 grunty spoiste w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania w zakresie od 10 tys. do 50 tys. cykli obciążeń, przeanalizował wyniki badań w celu rozpoznania reakcji gruntów spoistych na obciążenie dynamiczne. Reakcje gruntu spoistego były rozumiane jako: przyrost nadwyżek ciśnienia wody w porach gruntu, przebieg ścieżek naprężenia oraz akumulacja odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach obciążenia. Autor przeanalizował mechanizmy tych zjawisk. Opracował model empiryczny (61), służący do obliczenia wartości odkształceń plastycznych przy obciążeniu długotrwałym, zaproponował kryterium klasyfikacji gruntów spoistych obciążonych cyklicznie w warunkach bez odpływu.

Do mocnych stron pracy należą, moim zdaniem:

- 1) wybór interesującej tematyki badań o walorach naukowych i użytkowych,
- 2) obszerny przegląd literatury, a szczególnie opis badań przeprowadzonych w świecie,
- 3) wyniki żmudnych badań laboratoryjnych w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania, zgodnie z założonym programem badań,

Do oryginalnych własnych osiągnięć Autora zaliczam:

- 1) uogólnienie uzyskanych wyników i propozycję sposobu modelowania przyrostów odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach obciążeń,
- 2) propozycję kryterium nieprzekroczenia strefy plastycznego dostosowania,
- 3) ustalenie kierunków dalszych prac badawczych.

Do słabszych stron pracy należą, moim zdaniem, niedociągnięcia analizy statystycznej i pewna nieuwaga w używaniu pojęć specjalistycznych.

6. Uwagi redakcyjne

Układ pracy jest właściwy, a podział treści przejrzysty.

Pod względem językowym dają się zauważyć pewne uchybienia, spośród których wymieniam najważniejsze:

- częste używanie sformułowań typu: „przy pomocy metody” (str. 74), „przy pomocy piezoelementów” (str. 78), „przy pomocy koncepcji” (str. 167), które powinny łączyć się z ludźmi lub istotami żywymi; w tego typu sformułowaniach należy używać zwrotu „za pomocą”, który łączy się z podmiotami nieożywionymi,
- inne niedoskonałości stylistyczne: „ilość akumulowanego odkształcenia plastycznego” (str. 61), „koncepcja oporu gruntu w tej pracy zaadoptowana przez autora” (str. 149), „obszar spowodowany wpływem...” (na rys. 86), „równanie posiada współczynnik determinacji...” (str. 150 i wielokrotnie – równanie nie nabyło i nie jest właścicielem współczynnika; nie używa się słowa „posiada” do podmiotów nieożywionych)
- str. 70: zamiast rys. 24 powinno być rys. 23,
- w objaśnieniach wzoru (34): ρ jaka to jest gęstość gruntu?

- str. 70: brak w spisie literatury PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012; str. 68: brak w spisie literatury PN-EN 1997-2:2009/Ap1:2010,
- w tab. 8. pierwszy wiersz: zamiast $n=10^3$ powinno być 10^4 ,
- błędy w podpisie tab. 9: zamiast „Wartość parametru c równania (37)...” powinno być „Wartość parametru c_{du} równania (39)...”,
- str. 113: zamiast „...standardowy błąd aproksymacji funkcji...” powinno być „...standardowy błąd estymacji funkcji...”,
- str. 110: zamiast „plateu” należy pisać „plateau”,
- niedokończone ostatnie zdanie na str. 163,
- w załączniku E zamiast „równanie (49)” powinno być „równanie (50)”, zamiast „równanie (55)” powinno być „równanie (56)”.

7. Ocena pracy i uwagi końcowe

Recenzowana rozprawa należy do prac doświadczalnych z zakresu geotechniki. Doktorant mgr inż. Andrzej Głuchowski podjął w swojej pracy temat interesujący zarówno naukowców, jak i praktyków. Doktorant samodzielnie rozwiązał postawione w pracy problemy naukowe i osiągnął zakładane cele. Autor wykonał badania, przeprowadził analizę wielu pozycji literatury, zdobył wiedzę specjalistyczną dotyczącą analizowanych zagadnień. Doktorant wykazał się umiejętnością przeprowadzania badań i analiz naukowych. Rozprawa stanowi oryginalną propozycję rozwiązania naukowego, wnosi nowe wartości naukowe w dziedzinie geotechniki oraz potwierdza dostateczny poziom wiedzy Kandydata do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych. Sformułowane w recenzji uwagi dyskusyjne i pytania nie obniżają w sposób istotny wartości pracy.

W związku z tym, we wniosku końcowym stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Andrzeja Głuchowskiego pt.: „Reakcja gruntu spoistego na obciążenia cykliczne w warunkach bez odpływu” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule z zakresu sztuki (Dz. U. nr 65, poz.595 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Henryk Sulowski