

dr hab. inż. Marian Łupieżowiec, prof. PŚ.
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Geotechniki i Dróg
ul. Akademicka 5
44-100 Gliwice

Gliwice, 29 maja 2024 r.

WPEŁYNIŁO - WBLIW

04-06-2024

12/195/2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Daniela Kefelegna Teshagera
pt. „Probabilistic analysis of shallow foundations settlement using
the Hardening Soil Model”

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Daniela Teshagera pt. „Probabilistic analysis of shallow foundations settlement using the Hardening Soil Model” wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport – Pana prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły z dn. 8 kwietnia 2024 roku, działającego na podstawie Uchwały nr 476/76/RDND06/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej z dn. 3 kwietnia 2024 roku.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa jest napisana w języku angielskim, liczy 115 stron tekstu wraz ze spisem literatury oraz 34 strony załączników, w których przedstawiono dodatkowe wyniki analiz w postaci tabeli i wykresów oraz wydruk procedury napisanej w programie Matlab wykorzystanej do rozwiązywania problemów numerycznych. Spis literatury zawiera łącznie 201 pozycji. W zdecydowanej większości są to artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach, które odnoszą się do aktualnej światowej wiedzy w zagadnieniach podejmowanych przez autora w swojej rozprawie. Praca zawiera również spis rysunków i tabel oraz spis zastosowanych skrótów oraz oznaczeń. Została podzielona na 7 rozdziałów, wśród których pierwszy to krótki wstęp, a ostatni to generalne wnioski. Układ pracy jest właściwy, a jej struktura ułatwia szybkie odnajdywanie treści interesujących czytelnika.

3. Aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

Problematyką podjętą w recenzowanej pracy doktorskiej jest zagadnienie niepewności wartości parametrów modelu opisującego zachowanie się gruntów i wpływ tej niepewności na uzyskiwane wyniki. Rozważany problem bardzo dobrze wpisuje się w naturę ośrodka gruntowego, który charakteryzuje się bardzo dużą zmiennością w zakresie jego właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych. Rozrzut wartości parametrów bezpośrednio

wpływa na niepewność w zakresie określania nośności podłoża i szacowania osiadań pod fundamentami, które to analizy są wykonywane w ramach projektowania przy sprawdzaniu warunków stanów granicznych. Aby zapewnić bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji budowlanej skutki te niepewności niwelują współczynniki bezpieczeństwa, które jednakże są podawane w normach w sposób bardzo ogólny. Jednakże rozwój metod analiz wykonywanych w ramach projektowania wymaga, aby możliwe niepewności móc ująć obliczeniowo, stąd potrzeba realizacji prac, które do tego celu będą wykorzystywać metody oparte na zaawansowanym rachunku prawdopodobieństwa i statystyce.

Chociaż w chwili obecnej statystyka jest nauką bardzo zaawansowaną, która oferuje bardzo wiele różnych narzędzi, to jednakże nie są one powszechnie stosowane przez projektantów konstrukcji budowlanych, a stosowne analizy są podejmowane jedynie w ramach prac naukowych. Typowy projektant woli zastosować jakiś współczynnik bezpieczeństwa, a odpowiedzialność za podejmowane decyzje sędować na ogólne wymagania przedstawione w normach. Jednakże taki sposób postępowania nie może być stosowany po wprowadzeniu norm Eurokod (w tym Eurokod-7 dotyczącym geotechniki), stąd potrzeba wykonywania analiz dotyczących rachunku niepewności w zakresie analiz dotyczących zachowania się konstrukcji budowlanych i ich współpracy z ośrodkiem gruntowym.

Oczywistym jest, że zaawansowane analizy z wykorzystaniem metod probabilistycznych muszą opierać się o aktualne metody analiz zachowania się ośrodka gruntowego pod złożonym obciążeniem. Obecnym standardem wykonywania tego typu analiz jest wykorzystanie metody elementów skończonych. Ponadto w mechanice gruntów zachodzi konieczność wykorzystania zaawansowanych modeli gruntów, w tym modeli uwzględniających silną zmienność sztywności w zakresie małych odkształceń, jak i po każdej ostrej zmianie kierunku ścieżki naprężenia.

Recenzowana praca doktorska bardzo dobrze wpisuje się w aktualny stan wiedzy, a przeprowadzone bardzo rzetelnie analizy i wyciągnięte na ich podstawie wnioski mają spory potencjał ich wykorzystania w praktyce przy projektowaniu posadowienia konstrukcji budowlanych.

4. Struktura i treść rozprawy doktorskiej

W rozdziale **pierwszym** autor przedstawił krótki wstęp (wraz z przywołaniem właściwej literatury) oraz przedstawił cel i zakres pracy, a także streszczenie podjętych działań. W rozdziale **drugim** zawarte są podstawy teoretyczne wykonanych w dalszej części analiz probabilistycznych. Jest tam mowa o osiadań podłoża gruntowego, założeniach do analiz numerycznych wykonywanych w geotechnice, a także wykorzystywanych modelach: sprężysto-idealnie plastycznym z powierzchnią plastyczności Coulomba-Mohra oraz sprężysto plastycznym ze wzmocnieniem (Hardening Soil) z opisem silnej nieliniowości w zakresie małych odkształceń. Rozdział drugi zawiera również definicje wielkości z zakresu probabilistyki, które były przedmiotem dalszych analiz. Zdefiniowana została również niepewność ośrodka gruntowego, która jest najważniejszym przedmiotem podjętych analiz. Rozdział **trzeci** poświęcono na opis metodologii wykonywanych analiz. W szczególności

autor opisał dobór wartości parametrów (metoda Monte Carlo przy założonych wskaźnikach probabilistycznych) przyjmowanych do rozwiązania dwuwymiarowego zagadnienia MES osiadania łąwy fundamentowej posadowionej na podłożu. Przedstawiono kompletną procedurę obliczeniową oraz sposób uzyskiwania wyników. Rozdział **czwarty**, który jest najbardziej obszerny i zdaniem recenzenta niezwykle istotny, zawiera porównanie wyników otrzymanych z modelu M-C i modelu Hardening Soil. Analizowano uzyskane wartości średnie osiadań oraz współczynnik wariacji (COV) będący miarą występujących fluktuacji. W rozdziale tym autor przedstawił również analizy ośrodka jednorodnego, jak i dwuwarstwowego (warstwa leżąca głębiej ma większą sztywność). Najważniejszymi wynikami przedstawionymi w tym rozdziale jest ocena wpływu wartości parametrów modelu na otrzymywane wartości osiadań. Najważniejszym z punktu widzenia postawionych przez autora celów pracy, jest rozdział **piąty**, gdzie analizowano wpływ niepewności parametrów wejściowych modeli na fluktuacje (wahania) otrzymywanych wyników osiadań. Wreszcie rozdział **szósty** przedstawia estymację rozkładu prawdopodobieństwa uzyskania konkretnych wartości osiadań za pomocą probabilistycznych funkcji rozkładu oraz skumulowanego rozkładu (funkcja dystrybucji). Wykorzystano test Kołmogorowa-Smirnowa do oceny dopasowania rozkładu logarytmiczno-normalnego, który jest najczęściej wykorzystywany w analizach probabilistycznych. Przedstawione tutaj wyniki mogą być wykorzystane we wdrożeniach w zagadnieniach projektowania przy określaniu wymaganych współczynników bezpieczeństwa. Ostatnią częścią rozprawy, są ogólne wnioski, które autor sformułował na podstawie przeprowadzonych przez siebie analiz.

Strukturę i zawartość rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie i nie wnoszę do niej uwag.

5. Ocena dorobku naukowego rozprawy

Wybór tematyki rozprawy uważam za bardzo trafny i potrzebny w obliczu rozwoju technik obliczeniowych i ich wykorzystania w procesie projektowania konstrukcji budowlanych, do których z całą pewnością należy zaliczyć fundamenty. Niepewność wartości parametrów modelu wykorzystanego do analiz statyczno-wytrzymałościowych przekłada się na rozrzut wyników, które są podstawą podjęcia konkretnych decyzji projektowych. Ważne jest również oszacowanie zapasu bezpieczeństwa, co jest niezmiernie ważne w kontekście coraz bardziej powszechnej optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Ponieważ projektanci konstrukcji realizują przede wszystkim analizy z wykorzystaniem deterministycznie oszacowanych wartości parametrów, konieczne jest określenie realistycznych wartości współczynników bezpieczeństwa, które ujmować będą niepewności związane z rozpoznaniem podłoża oraz stosowanymi założeniami i uproszczeniami w wykonywanych analizach projektowych.

Autor rozwiązując postawione przez siebie zadanie opisał zmienność ośrodka gruntowego wykorzystując procedury obliczeniowe stosowane w rachunku prawdopodobieństwa. Takie podejście ma istotną przewagę w porównaniu do metod arytmetyki przedziałowej, gdyż w tym przypadku wynikiem podejmowanych analiz jest nie tylko uzyskany przedział otrzymywanych wartości (np. jak w przedmiotowym przypadku

osiadania), ale przede wszystkim rozkład prawdopodobieństwa uzyskania tych wartości. Ważnym podjętym zagadnieniem jest również analiza fluktuacji przy wykorzystaniu różnych modeli materiałowych ośrodka gruntowego. W ocenianej pracy analizowano dwa takie modele: relatywnie prosty ze sprężysto-idealnie plastycznym prawem konstytutywnym (model M-C), jak również model zaawansowany, który w szczególności jest w stanie opisać zmianę sztywności w zakresie małych odkształceń (model HS-small). Z wykonanych analiz wynika, że skala fluktuacji modelu HS-small jest wyraźnie mniejsza niż przy modelu M-C, co oznacza, że ten pierwszy odznacza się mniejszą wrażliwością na wahania wartości parametrów przyjmowanych przez użytkownika do swoich analiz. Oczywiście sytuacja może być zupełnie inna przy innych zagadnieniach.

Na podkreślenie zasługuje biegłość autora w wykorzystywaniu zaawansowanych metod statystycznych i ich skutecznym wykorzystaniu w analizach geotechnicznych. Autor na podstawie wyliczanych miar statystycznych jest w stanie formułować trafne wnioski. W pracy przedstawiono wiele wykresów, które pozwalają na dogłębną analizę postawionego problemu naukowego. Warto zauważyć jest również wykonanie bardzo wielu symulacji numerycznych (1000 analiz MES na podstawie symulacji Monte Carlo wartości parametrów w każdym przypadku), co pozwala stwierdzić, że stwierdzenia przedstawione w pracy zostały mocno udowodnione. Nie byłoby możliwe wykonanie aż tak dużej liczby analiz bez napisania specjalnej procedury w programie Matlab, która umożliwiła zewnętrzne sterowanie programem Z_Soil. W ramach tego sterowania zmieniane były wartości parametrów wejściowych, przeprowadzone obliczenia w module liczącym programu Z_Soil oraz zbierane istotne wyniki. Wszystkie otrzymane wyniki przedstawiono w załącznikach, co ułatwia czytelnikowi dokonanie własnych analiz, a także stanowi bogaty materiał, który może być podstawą przyszłych publikacji.

Warto zauważyć jest również duża wiedza autora w zakresie modelowania zachowania się ośrodka gruntowego oraz wykonywania analiz numerycznych zjawisk związanych z przekazywaniem obciążeń z fundamentów na podłoże. Doktorant wykazał się biegłością przede wszystkim w zakresie doboru wartości parametrów modeli do tego typu analiz, a także bardzo dobrze ocenia wrażliwość uzyskiwanych wyników na wartości poszczególnych parametrów wykorzystanych w analizach.

Skomentować należy również bardzo dużą liczbę przeprowadzonych analiz, przez co formułowane wnioski mogą być uznane za bardziej wiarygodne. Oczywiście jest fakt, że przeprowadzający badania numeryczne, dzięki wykorzystaniu maszyn liczących są w stanie uzyskać zdecydowanie więcej wyników niż ci, którzy prowadzą badania w laboratorium lub badania terenowe, jednakże aby rezultaty mogły być uznane za wiarygodne, należy przedstawić właściwy plan badań numerycznych oraz opracować prawidłowe procedury obliczeniowe. Nie bez znaczenia jest też umiejętność formułowania prawidłowych wniosków, które w dalszej kolejności będą inspiracją wykonania kolejnych badań. W przypadku przedmiotowej pracy, wszystkie te elementy prawidłowo realizowanej koncepcji badawczej należy ocenić bardzo wysoko.

Wysoko należy również ocenić sposób prezentowania przez autora zarówno wyników przeprowadzonych przez siebie symulacji numerycznych, jak i wynikających z nich

wniosków. Świadczy to o dużej wiedzy i biegłości autora w rozwiązywaniu postawionych problemów naukowych. Układ pracy jest logiczny i spójny. Biorąc pod uwagę treść i zakres pracy można z całą pewnością stwierdzić, że postawione na początku rozprawy doktorskiej przez mgr inż. Daniela Teshagera cele naukowe zostały osiągnięte.

6. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Recenzent wyraża drobną wątpliwość odnośnie definicji modelu do analiz osiadań ławy posadowionej na gruncie (rys. 3.3 na str. 17). Wydaje się, że wysokość modelu w kierunku pionowym jest zbyt mała w porównaniu do szerokości. Autor szczegółowo tłumaczy, że szerokość wynika z potrzeby zapewnienia odpowiedniej zbieżności wyników, natomiast wysokość jest konsekwencją przyjęcia konkretnego profilu gruntowego, gdzie płytko zalega bardzo sztywna skała. Można mieć jednak pytanie, czy w przypadku typowych warunków gruntowych w Polsce, gdzie zwykle do głębokości rozpoznawania podłoża nie stwierdza się występowania skał, wnioski zawarte w pracy byłyby identyczne ?

Wartości parametrów modelu przyjęte do analiz w rozdz. 3 i rozdz. 4 dla modeli Mohr-Coulomb i Hardening soil dają wyniki znacznie różniące się pomiędzy sobą (zob. tabela 4.8). Zdaniem recenzenta trudno jest porównywać wyniki uzyskiwane przez poszczególne modele, gdy ich wartości średnie tak istotnie różnią się pomiędzy sobą. Analizy przeprowadzone w rozdz. 6 już zostały przeprowadzone w taki sposób, aby średnie wartości osiadań uzyskiwanych w analizach z wykorzystaniem obydwu modeli dawały już zbliżone do siebie wartości. Czy autor mógłby wyjaśnić dobór parametrów do analiz MES na poszczególnych etapach swoich analiz ? Czy uzyskiwane fluktuacje różniłyby się w sposób istotny, gdyby charakterystyki deterministyczne podłoża w istotny sposób różniłyby się od siebie ?

Skoro autor analizował zmienność przestrzenną wartości parametrów w ośrodku gruntowym (zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym), to dlaczego na rys. 4.8 przedstawione są warstwy poziome, tak jakby fluktuacja była tylko po głębokości (rys. 4.9 – 4.12 już taką zmienność przestrzenną pokazują) ?

Ważnym aspektem, który został pominięty w pracy, jest przedstawienie możliwości dalszych badań na podstawie uzyskanych wyników badań. Zdaniem recenzenta, uzyskane wyniki mogłyby posłużyć do określania wartości współczynników bezpieczeństwa przy projektowaniu. Rodzi się więc pytanie, czy jest możliwość przeprowadzenia tego rodzaju analiz, ewentualnie, czy autor ma plany na dalszą realizację badań w tym zakresie ?

Ponadto w treści pracy stwierdzono występowanie kilku błędnych lub dyskusyjnych sformułowań, takich jak:

- rozdz. 2.1: wydaje się, że przynajmniej w polskich realiach, najważniejszym czynnikiem przy projektowaniu fundamentów jest nośność podłoża, a nie powstałe osiadania (chyba że analizuje się konstrukcję, w której osiadania powodują znaczny wzrost wartości sił wewnętrznych i powstanie stanu granicznego w tej konstrukcji,
- rozdz. 2.2: utrata nośności podłoża pod fundamentami płytkimi polega raczej na wyparciu gruntu spod fundamentu, a nie na zniszczeniu gruntu pod fundamentem,

- rozdz. 2.3: patrząc na obecnie dostępne programy MES nie można się zgodzić ze stwierdzeniem, że metoda MES jest odpowiednia dla modeli liniowo-sprężystych, a w ośrodkach o charakterystyce nieliniowej, staje się zbyt złożona,
- rozdz. 2.3.1: we wprowadzeniu do modeli konstytutywnych brakuje publikacji prof. M. Gryczmańskiego (choć na obronę autora wpływa fakt, że publikacje te są w większości w j. polskim); brak też krótkiej i ogólnej wzmianki w tym rozdziale o estymacji parametrów poszczególnych, niekiedy bardzo złożonych modeli gruntów,
- rozdz. 2.4.1: model Coulomba-Mohra to model sprężysto-idealnie plastyczny, a nie model idealnie liniowo sprężysty,
- we wzorze (19) brak liczby „2” w mianowniku,
- rozdz. 4.2.1: w pracach naukowych nie należy pisać, że wykorzystano komercyjne oprogramowanie Z_Soil, tylko że rozwiązywano zagadnienie metodą elementów skończonych wykorzystując program Z_Soil,
- rozdz. 4.3.2: wartość ilorazu E_{ur} / E nie opisuje sztywności – opisują ją poszczególne wartości modułów,
- rys. 6.8: zdaniem recenzenta, przedstawione na wykresie zależności teoretyczne i empiryczne wykazują bardzo dużą zgodność, choć autor ma inne zdanie w tym zakresie.

Ponadto recenzent zgłasza zastrzeżenie odnośnie nazwy „histogram częstotliwości”, który widnieje na opisach wielu rysunków. Zdanie recenzenta prezentowana wielkość, to gęstość prawdopodobieństwa uzyskania poszczególnych wartości osiadań. Dla porównania, rys. 6.1 – 6.8 mają już właściwy opis osi pionowej.

7. Podsumowanie i wniosek końcowy

W przedstawionej pracy, w sposób bardzo dobry rozwiązany został trudny inżynierski problem określenia zakresu zmienności wartości osiadań w zależności od rozrzutu wartości parametrów przyjmowanych do analiz z wykorzystaniem zaawansowanych metod statystycznych. Autor wykazuje bardzo dużą wiedzę teoretyczną i biegłość w praktycznym jej zastosowaniu. Sprawnie dobiera narzędzia do zaawansowanych analiz numerycznych, w sposób umiętny planuje i realizuje plan analiz, wnikliwie ocenia otrzymane wyniki oraz formułuje słuszne wnioski. Z całą pewnością byłby w stanie nakreślić plan dalszych badań i go zrealizować.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Daniela Teshagera pt. „Probabilistic analysis of shallow foundations settlement using the Hardening Soil Model” spełnia wszystkie warunki i wymagania określone przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.).

Biorąc powyższe pod uwagę oraz moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa,

Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej oraz o dopuszczenie Pana mgr inż. Daniela Kefelegna Teshagera do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marian Szymon', is positioned to the right of the main text block.