

Gdańsk, dnia 29 maja 2026 roku

prof. dr hab. inż. Lech Bałachowski
Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Wyborskiego
pt. „Zagadnienia nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych”

promotor rozprawy: Dr hab. inż. Janusz Kozubal, prof. uczelni
promotor pomocniczy: Dr inż. Zofia Zięba

1. Podstawa opracowania

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej sporządziłem na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej i otrzymanego egzemplarza rozprawy.

2. Tematyka i cel rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Piotra Wyborskiego jest zagadnienie wzmacniania gruntów częściowo nasyconych wodą oraz zapobieganie powstawania spękań podczas procesu ich suszenia. Autor rozpatruje przede wszystkim ulepszanie nienasyconych gruntów pylaste dodatkiem cementem i włókien i. Dodatkowo analizuje grunt piaszczysty stabilizowany cementem lub dodatkiem pyłu granodiorytowego. Zasadniczą częścią rozprawy jest analiza wpływu różnych dodatków na proces pękania próbek gruntu podczas suszenia. Zjawisko to badane jest doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych oraz z zastosowaniem modelu numerycznego. Podjęta tematyka badawcza dotyczy zagadnień istotnych z punktu widzenia wzmacniania podłoża z wykorzystaniem dodatków chemicznych, włókien, biomateriałów oraz nanomateriałów. Określenie parametrów mechanicznych gruntów poddawanych suszeniu staje się również coraz ważniejsze ze względu na zachodzące zmiany klimatyczne, których wynikiem są długotrwałe susze i powiększanie się miąższości strefy aeracji w gruncie. Wiąże się też z zagadnieniem szczelności warstw izolacyjnych narażonych na spękania desykacyjne. Analiza powstawania i rozwoju spękań w suszonej masie gruntu naturalnego lub wzmocnionego oraz określenie parametrów wytrzymałościowych takich gruntów podczas suszenia są głównym celem rozprawy. Autor zrealizował go poprzez wykonanie wielu serii badań laboratoryjnych, rejestrację mechanizmów spękań oraz ich analizę. Dopełnieniem tych rozważań jest numeryczne modelowanie powstawania i rozwoju spękań w suszonym gruncie.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa jest bardzo obszerna, gdyż zawiera 294 strony tekstu z uwzględnieniem streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu treści i literatury, wykazu oznaczeń oraz trzech załączników.

Doktorant podzielił tekst rozprawy doktorskiej na sześć rozdziałów.

Krótki rozdział pierwszy dotyczy struktury pracy i głównych celów rozprawy. Autor przedstawia listę tez badawczych (jest ich dziewięć) oraz uzasadnia ważność podjętej tematyki. Wymienia też skutki spękania gruntu wywołane wysychaniem w różnych aspektach budownictwa i techniki.

W rozdziale drugim Autor przedstawia stan wiedzy dotyczący mechaniki pękania. Pokazuje trzy podstawowe schematy obciążenia podczas pękania elementu oraz różne rodzaje pęknięć i stan naprężenia w sąsiedztwie spękania. Doktorant omawia mechanizmy inicjacji i rozwoju pęknięć oraz przedstawia modele wytrzymałości gruntu na rozciąganie i ścinanie. Szczegółowo dyskutuje etapy powstawania siatki spękań oraz ich geometrię. Autor omawia też metody detekcji spękań oraz parametry geometryczne służące do ich opisu. Ważnym elementem tego rozdziału jest opis zabiegów ograniczających powstawanie spękań z uwzględnieniem zastosowania spoiw chemicznych, biomateriałów oraz włókien naturalnych, syntetycznych i mineralnych. Doktorant rozpatruje również możliwość wykorzystania pyłu odpadowego z instalacji odpylania kruszyw wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Na podstawie przeglądu literatury szczegółowo analizuje wpływ różnych dodatków na parametry mechaniczne wzmocnianych gruntów. Autor opisuje możliwość zastosowania modelowania numerycznego do analizy spękań w gruncie. Podsumowaniem tego rozdziału jest zwięzłe przedstawienie zagadnień, które wymagają dalszych badań.

Rozdział trzeci stanowi zasadniczy element rozprawy, w którym Doktorant opisuje badania laboratoryjne próbek gruntów spoistych i niespoistych wzmocnianych dodatkami cementu, pyłu granodiorytowego lub włókien. Jako zbrojenie rozproszone gruntu stosowane są włókna polipropylenowe, jutowe, polietylenowe oraz włókna szklane pokryte żywicą poliestrową. Wszystkie włókna miały 12mm długości i po wymieszaniu stanowiły 0,5% masy suchej mieszanki. Uformowane próbki były poddawane procesowi dojrzewania w warunkach wysokiej wilgotności, a potem badaniom wytrzymałości na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia oraz badaniom w aparacie bezpośredniego ścinania. Dodatkowo, próbki wzmocnionego piasku poddane były procesowi dojrzewania w szczelnym pojemniku w temperaturze 5 i 20 stopni Celsjusza. Wyniki badań wytrzymałości w aparacie bezpośredniego ścinania pozwoliły Doktorantowi na wyznaczenie efektywności poszczególnych dodatków wzmocnianych próbek gruntu. Ponadto, bezpośrednio po badaniach bezpośredniego ścinania, Autor określił wartość ssania matrycowego próbek gruntu bez dodatków z zastosowaniem bibuły filtracyjnej. Wykonał też badania wytrzymałości na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia w przypadku próbek bez dodatków i próbek gruntu z dodatkiem cementu po okresie dojrzewania.

Ponadto, Autor przygotował próbki pyłu z dodatkiem 15% i 35% wagowo iłu do analiz intensywności pękania powierzchniowego próbek oraz pękania w objętości gruntu. Badania intensywności pęknięć powierzchniowych odbywały się w podwyższonej temperaturze, celem przyspieszenia procesu suszenia, a Autor w regularnych odstępach czasu wykonywał zdjęcia powierzchni górnej próbki. Zdjęcia te były poddawane odpowiedniej procedurze przetwarzania obrazu. Niektóre z próbek pyłu były

wzmacniane zbrojeniem rozproszonym w postaci włókien jutowych bądź polipropylenowych. Próbki cylindryczne umieszczone w ocynkowanej stalowej rurze były poddawane długotrwałemu suszeniu w okresie do 7 tygodni. Celem badań było określenie trójwymiarowego rozkładu pęknięć gruntu za pomocą tomografii komputerowej.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawia wyniki poszczególnych badań wytrzymałościowych, mechanizmy spękań powierzchniowych i przestrzennych. Autor pokazuje obwiednie zniszczenia oraz parametry wytrzymałościowe próbek gruntu z aparatu bezpośredniego ścinania. Uwzględnia różnego rodzaju wzmocnienie gruntu oraz wpływ dojrzewania. Wyniki tych badań podsumowano w tabeli oraz na zbiorczym wykresie parametrów wytrzymałościowych. Autor podaje też wyniki ssania matrycowego oraz całkowitego w przypadku próbek pyłu po zakończeniu procesu ścinania. W kolejnym podrozdziale przedstawia wyniki badań jednoosiowego ściskania dla sześciu wariantów próbek gruntu spoistego oraz analizuje mechanizm zniszczenia przy różnym wzmocnieniu/zbrojeniu gruntu. W przypadku próbek gruntu niespoistego uwzględnia wpływ czasu dojrzewania na wytrzymałość próbek na jednoosiowe ściskanie.

Doktorant analizuje proces wysychania i obserwuje charakterystykę pęknięć. Wyznacza wskaźnik intensywności pęknięć (CIF) dla pęknięć powierzchniowych w zależności od wilgotności próbki. Przedstawia też wizualizację pęknięć próbek cylindrycznych gruntu zeskanowanych z użyciem tomografii komputerowej. Analiza obrazu pozwoliła na wyznaczenie wskaźnika pęknięć objętościowych oraz przestrzennych rozkładów szerokości pęknięć. Autor opracował również mapę wskaźnika pęknięć objętościowych dla danego profilu próbki. Rozdział zakończony jest wnioskami z badań laboratoryjnych wytrzymałości próbek, ciśnienia ssania oraz obserwacji pęknięć powierzchniowych i przestrzennych w gruncie.

Rozdział piąty dotyczy modelowania zachowania się gruntów nienasyconych poddawanych procesowi suszenia. Badania dotyczą pyłu i jego mieszanek z dodatkiem montmorylonitu. Autor prognozuje intensywność pęknięć wykorzystując metodę uczenia maszynowego, szczególnie z zastosowaniem drzewa decyzyjnego i lasu losowego. Na podstawie zebranych danych z badań laboratoryjnych i metody uczenia maszynowego Doktorant zidentyfikował najważniejsze czynniki wpływające na powstawanie i rozwój pęknięć. Skorelował cechy gruntu z intensywnością pęknięć posługując się współczynnikiem korelacji Pearsona. Ze względu na brak silnej korelacji wykorzystał jednak metodę uczenia maszynowego i algorytmy regresji do predykcji spękań. Biorąc pod uwagę zbyt małą dokładność tego modelu oraz znaczne wartości błędów podejmuje kolejną próbę szacowania intensywności pęknięć na podstawie modelu lasu losowego, co pozwoliło na uzyskanie dobrej zgodności pomiarów i wyników modelu.

W kolejnym podrozdziale Doktorant szacuje nośność kwadratowej stopy fundamentowej posadowionej na podłożu z gruntu wzmocnionego/zbrojonego o cechach wyznaczonych w badaniach laboratoryjnych w poprzednich rozdziałach. Parametry podłoża (ciężar objętościowy, kąt tarcia wewnętrznego oraz spójność) potraktowano jako zmienne losowe, a rozkłady prawdopodobieństwa tych zmiennych opisano rozkładem normalnym, beta i lognormalnym. Autor wyznacza pełny zbiór losowy opisujący niepewność modelu podłoża gruntowego. Określa dolne i górne dystrybuanty funkcji stanu granicznego nośności dla poszczególnych rodzajów podłoża oraz wyznacza wskaźniki niezawodności fundamentu bezpośredniego posadowionego w danym gruncie.

Podrozdział 5.3 dotyczy modelowania numerycznego rozwoju pęknięć metodą elementów skończonych. Autor zakłada sprężysty model gruntu i płaski stan odkształcenia. Wyznacza parametry gruntów nienasyconych do modelu van Genuchtena oraz modułu sprężystości przy niepełnym nasyceniu gruntu wodą. Na podstawie wyników badań własnych oraz danych z literatury określa wytrzymałość analizowanych gruntów na rozciąganie. Powyższe parametry uwzględnia w analizie numerycznej pionowego wycinka gruntu podlegającemu suszeniu. W obliczeniach założono różne rozstawy oraz głębokości pęknięć. Autor przedstawia rozkłady modułu sprężystości, przemieszczeń oraz wartości naprężeń rozciągających w przypadku pęknięcia w połowie wysokości próbki. Zestawia wartości maksymalnych naprężeń rozciągających w zależności od rozstawu i głębokości pęknięcia. Najwyższe wartości tych naprężeń występują przy górnej powierzchni próbki. Doktorant wyznacza strefy zagrożone pęknięciem w zależności od rodzaju gruntu oraz porównuje wyniki badań laboratoryjnych oraz modelu obliczeniowego dla trzech rodzajów gruntu.

W rozdziale szóstym Autor podsumowuje najważniejsze rezultaty pracy oraz stopień realizacji pięciu założonych celów badawczych oraz podkreśla innowacyjny charakter przeprowadzonych analiz. Prezentuje wnioski praktyczne oraz kreśli kierunki dalszych badań.

4. Ocena merytoryczna pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Wyborskiego składa się z dwóch wzajemnie powiązanych części. Pierwsza dotyczy zagadnienia wzmocnienia podłoża dodatkiem spoiw, włókien oraz pyłu granodiorytowego. Doktorant prowadzi badania zagęszczalności takiego materiału w aparacie Proctora, wybiera pewne wilgotności charakterystyczne mieszanek, dla których określa parametry mechaniczne w badaniach jednoosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania. Badania te realizuje na dużej populacji próbek, co pozwala na statystyczną ocenę uzyskanych wyników. Wyznacza też wartości ciśnienia ssania próbek naturalnego gruntu spoistego na powierzchni ścięcia. Posłużą one do wyznaczenia zależności między skurczem a ssaniem oraz modułu sprężystości gruntu w analizie numerycznej powstawania rys skurczowych. Dodatkowo na podstawie wcześniej określonych parametrów mechanicznych próbek gruntu i ich rozkładu statystycznego formułuje losowy model podłoża oraz wyznacza górne i dolne oszacowanie nośności fundamentu bezpośredniego zagłębionego w tym gruncie.

W drugiej części rozprawy Autor zajmuje się mechanizmami powstawania i propagacji spękań w gruncie naturalnym oraz wzmocnionym na podstawie obserwacji próbek płaskich i cylindrycznych oraz numerycznego modelowania tego procesu metodą elementów skończonych. Wyznacza współczynniki skurczu dla próbek w układzie płaskim oraz osiowo-symetrycznym. Zdjęcia spękanych próbek oraz wyniki tomografii komputerowej poddaje analizie obrazu i analizuje mechanizmy zniszczenia. Mechanizmy te są zależne od zawartości frakcji ilastej w gruncie. W przypadku dużej zawartości frakcji ilastej w próbce Doktorant uzyskał dobrą zgodność wyników analiz numerycznych i analizy obrazu próbek cylindrycznych badanych metodą tomografii komputerowej.

Autor potwierdził pozytywny efekt włókien i cementu na parametry mechaniczne wzmocnianych gruntów oraz na ograniczenie możliwości ich spękania podczas wysychania. Wykazał, że ssanie matrycowe jest głównym czynnikiem poprawiającym wytrzymałość gruntu. Doktorant zastosował włókna pochodzące z recyklingu oraz pył granodiorytowy, który może być traktowany jako produkt

uboczny technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych, a nie jako odpad. Wykazał, że można częściowo ograniczyć ilość stosowanego cementu zastępując go włóknami pochodzenia naturalnego lub z recyklingu. Autor pokazał, że częściowe zastąpienie cementu dodatkiem włókien zmienia charakter zniszczenia materiału na bardziej podatny, co znacząco poprawia jego odporność na duże odkształcenia i może wydłużyć trwałość budowli ziemnych. Wyniki badań potwierdzają możliwość optymalizacji procesu stabilizacji gruntów z wykorzystaniem włókien naturalnych, materiałów pochodzących z recyklingu oraz produktów ubocznych. Autor krytycznie podchodzi do otrzymanych wyników, wskazując na podwójny efekt działania włókien. Z jednej strony poprawiają one właściwości mechaniczne gruntu, a z drugiej strony sama ich obecność generuje lokalne niejednorodności sprzyjające powstawaniu spękań.

Pragnę podkreślić szeroki i kompleksowy zakres metod badawczych zastosowanych przez Doktoranta w rozprawie. Przeprowadził on serie badań wytrzymałościowych próbek gruntu, obserwował mechanizmy powstawania i rozwoju spękań, analizował zarejestrowane obrazy, opracował model numeryczny powstawania spękań oraz ich predykcję na podstawie metod uczenia maszynowego. Zakres przeprowadzonych analiz daleko wykracza poza tradycyjny schemat dotyczący modelu gruntu suchego lub w pełni nawodnionego.

Praca napisana jest w sposób przejrzysty, a poszczególne rozdziały zakończone są wnioskami lub zwięzłym podsumowaniem. Rozprawa jest bardzo obszerna, a przedstawione badania i analizy wymagały dużego nakładu pracy. Przedstawione treści mogłyby być jednak lepiej usystematyzowane, a niektóre z nich ograniczone lub pominięte. Pragnę podkreślić dobry poziom edytorski rozprawy, chociaż niektóre wykresy z analiz numerycznych są mało czytelne (rysunki 5.49, 5.50).

Do najważniejszych osiągnięć ocenianej rozprawy doktorskiej zaliczam:

- wykonanie i opracowanie statystyczne wyników wielu serii badań laboratoryjnych wytrzymałości gruntów naturalnych i wzmocnionych różnymi dodatkami,
- wykorzystanie wyników tych badań do opracowania modelu numerycznego powstawania spękań desykacyjnych,
- obserwacje i analizę obrazów próbek gruntów spoistych podczas procesu pęknięcia,
- identyfikację czynników decydujących o intensywności powstawania spękań,
- określenie rozstawu i wielkości pęknięć oraz porównanie wyników modelu numerycznego z obserwacjami,
- ocenę efektywności stosowania różnych dodatków wzmacniających i ich kombinacji na wytrzymałość gruntu i jego skłonność do pęknięcia.

5. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Tytuł rozprawy może być dosyć mylący, gdyż mógłby sugerować, że Autor zajmuje się nośnością podłoża, w którym występują losowo rozmieszczone spękania. Tak zdefiniowany temat byłby bardzo trudny i niezwykle ambitny, ale może stanowić sugestię tematyki osobnej pracy. W rzeczywistości losowość w rozprawie ograniczona jest do parametrów mechanicznych wzmacnianego gruntu. Jaka

jest losowość rozmieszczenia w ulepszanym gruncie dodatków oraz orientacji wprowadzanych włókien? Czy udało się uformować jednorodną próbkę gruntu?

Przedstawiona rozprawa doktorska jest bardzo obszerna i pewne jej elementy możnaby skrócić lub pominąć. Z drugiej strony opis i analiza badań laboratoryjnych wymagają pewnego uzupełnienia. Analiza nośności fundamentu na podłożu z gruntu wzmocnionego wraz z analizą niezawodności nie jest w rozprawie niezbędna. Biorąc pod uwagę różne mechanizmy mieszania i formowania próbek w laboratorium i podczas wzmacniania/mieszania gruntu w terenie, można mieć wątpliwości, czy wyniki doświadczeń laboratoryjnych będą odzierać stan ulepszanego gruntu w terenie. Czy bezpośrednie wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych dotyczących wytrzymałości ulepszanego gruntu do oceny nośności granicznej podłoża pod stopą fundamentową jest zasadne?

Autor wykonał badania zagęszczalności gruntów naturalnych i wzmocnionych i określił dwie charakterystyczne wilgotności, przy których formował próbki do dalszych analiz wytrzymałościowych. Jakie było kryterium doboru tych wilgotności? W pracy brakuje istotnej informacji o granicy skurczalności pyłu i pyłu z dodatkiem montmorylonitu.

Doktorant przeprowadził szereg badań wytrzymałości gruntu na jednoosiowe ściskanie lub w aparacie bezpośredniego ścinania. Są to podstawowe badania laboratoryjne wytrzymałości gruntu na ścinanie. Przedmiotem rozprawy jest jednak wytrzymałość gruntu na rozciąganie. Jakie badanie mogłoby być zastosowane do wyznaczenia tej wytrzymałości?

W przypadku wzmacniania podłoża różnymi dodatkami ważna jest nie tylko wytrzymałość ulepszanego gruntu na ścinanie, ale pełna charakterystyka zależności naprężenie-odkształcenie i sposobu zniszczenia próbki. Autor przedstawia w rozprawie jedynie takie krzywe z badań jednoosiowego ściskania dla kilku różnych dodatków.

Ciśnienie ssania zostało wyznaczone metodą bibuły filtracyjnej na powierzchni poślizgu próbki ścinanej w aparacie skrzynkowym poddanej uprzednio konsolidacji. Przy jakiej wartości ciśnienia konsolidacyjnego wykonywano te badania? Pragnę podkreślić występowanie różnych mechanizmów zniszczenia podczas rozrywania próbek i podczas ich ścinania. W drugim przypadku obserwujemy zmiany objętościowe w strefie ścinania próbki. Charakter i wielkość tych zmian zależy od poziomu naprężenia konsolidacyjnego i od wielkości odkształcenia próbki. Jaki jest rozkład wilgotności w profilu próbki po ścięciu? Jak proces ścinania próbki wpływa na zmiany wilgotności (ssanie) na powierzchni ścięcia. Autor nie przedstawił wykresów zmian wysokości ścinanej próbki w aparacie skrzynkowym w zależności od przemieszczenia. Najprawdopodobniej występowała kompresja ścinanej strefy próbki w aparacie skrzynkowym, a nie jej rozszerzanie. Czy ciśnienie ssania wyznaczone podczas badania ścinania będzie odpowiadać sytuacji zniszczenia próbki wskutek rozciągania?

Autor wyznaczył moduł sprężystości gruntu w modelu numerycznym na podstawie danych literaturowych oraz wzorów. Czy moduł ten mógłby być wyznaczony z badań jednoosiowego ściskania próbek cylindrycznych poddanych suszeniu? Jak określono wartości modułu sprężystości gruntu w stanie pełnego nasycenia wodą (Tabela 5.15)?

Na rys. 4.18 wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie jest w dwóch przypadkach mniejsza po upływie umownego procesu dojrzewania (28 dni) niż po 7 dniach. W jaki sposób można to wytłumaczyć?

Doktorant modeluje numerycznie proces suszenia cylindrycznej próbki gruntu w układzie płaskim. W jakim stopniu tak uproszczony model numeryczny i warunki brzegowe w układzie płaskim odzwierciedlają proces suszenia cylindrycznej próbki gruntu? Jaki jest rozkład wilgotności w profilu próbki?

Informacja o rodzaju gruntu na rys. 2.9b wydaje się być zbędna.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Wyborskiego dotyczy ważnego i rozwojowego zagadnienia zachowania się gruntów w stanie częściowego nasycenia wodą. Autor szczegółowo przeanalizował proces suszenia gruntów naturalnych i wzmocnianych oraz określił ich wytrzymałość i podatność na spękanie. Autor dowiódł posiadania pogłębionej wiedzy i umiejętności z zakresu badań laboratoryjnych, metod analizy obrazu, analiz numerycznych i metod uczenia maszynowego. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dotyczy ważnego i aktualnego problemu nauk inżynieryjno-technicznych oraz wnosi istotne elementy poznawcze. Oceniana rozprawa doktorska spełnia wymogi określone w odpowiednich przepisach. Pragnę podkreślić, że Autor wykazał się w rozprawie umiejętnością prowadzenia i interpretacji badań doświadczalnych oraz prowadzenia zaawansowanych analiz numerycznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązania problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 z późn. zm.) sprostął wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wniosuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Wyborskiego pt. „Zagadnienie nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych” do publicznej obrony.