

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz
Katedra Geotechniki
Instytut Inżynierii Lądowej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
e-mail: zbigniew_lechowicz@sggw.edu.pl

Warszawa, 11.05.2026 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Wyborskiego
pt.

„Zagadnienia nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych”

Recenzję opracowałem na zlecenie prof. dr. hab. inż. Wojciecha Puły, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej (pismo W2/2026 z dn. 24.03.2026), zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej nr 322/26/RDND06/2024-2028 z dn. 18.03.2026 r., na podstawie otrzymanego egzemplarza w/w rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Janusz Kozubal, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. Zofia Zięba.

1. Uwagi ogólne

Intensywna rozbudowa infrastruktury oraz konieczność posadowienia obiektów w rejonach występowania złożonych warunków geotechnicznych stanowią współczesne wyzwania i wytyczają kierunki rozwoju mechaniki gruntów i inżynierii geotechnicznej. Badania i opis zachowania się gruntów spoistych głównie dotyczyły gruntów nasyconych. Grunty spoiste nasycone, ze względu na małą przepuszczalność w stosunku do prędkości obciążenia, wykazują najmniejszą wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu. W takim przypadku w projektowaniu posadowień bezpośrednich jako podstawowe kryterium oceny nośności granicznej podłoża spoistego pod obciążeniem, przyjmuje się warunki bez odpływu, uwzględniając wytrzymałość na ścinanie bez odpływu.

W przypadku nienasyconych gruntów spoistych, w projektowaniu posadowień bezpośrednich, do oceny nośności granicznej podłoża spoistego pod obciążeniem przyjmuje się warunki z odpływem, czyli wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego i efektywnej spójności. W takich warunkach nośność graniczna podłoża spoistego jest większa niż w warunkach bez odpływu. W praktyce inżynierskiej możliwość wystąpienia zwiększenia wilgotności gruntów spoistych powoduje konieczność rozpatrzenia bardziej niekorzystnych warunków bez odpływu, uwzględniając wytrzymałość na ścinanie bez odpływu.

Podczas wysychania w gruntach spoistych powstają pęknięcia, które w istotny sposób zmieniają właściwości mechaniczne gruntów, powodując ich dużą zmienność. Pojawienie się pęknięć stanowi istotny problem w projektowaniu konstrukcji geotechnicznych, takich jak wały przeciwpowodziowe, zapory, składowiska odpadów mokrych. Największą podatność na

pojawienie się pęknięć wykazują ility zawierające montmorylonit. Pozostałe grunty spoiste zawierające frakcję ilastą są również podatne na powstawanie pęknięć. Pyły charakteryzują się dużą wrażliwością na zmianę wilgotności, która wynika z małej różnicy między granicą płynności w_L i granicą plastyczności w_P . Pomimo badań prowadzonych w tym zakresie, nadal istnieją liczne luki w rozpoznaniu powstawania pęknięć nienasyconych gruntów spoistych podczas wysychania oraz ich wpływu na właściwości mechaniczne tych gruntów.

W celu poprawy właściwości mechanicznych gruntów spoistych, również poprzez ograniczenie powstania pęknięć, w inżynierii geotechnicznej stosowane są różne metody wzmocniania gruntów spoistych. Do stabilizacji gruntów spoistych przede wszystkim wykorzystuje się cement, popiół, wapno. W ramach zbrojenia gruntów spoistych stosuje się zbrojenie ciągłe lub rozproszone. Pomimo badań prowadzonych w tym zakresie, nadal istnieje potrzeba określenia wpływu stabilizacji i zbrojenia na właściwości mechaniczne gruntów spoistych.

Należy wyrazić uznanie Doktorantowi, że podjął trudną tematykę oceny nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych. Praca doktorska mgr. inż. Piotra Wyborskiego rozszerza obszar badań nad właściwościami mechanicznymi nienasyconych gruntów spoistych naturalnych i wzmocnionych przy różnym stopniu nasycenia. Uwaga Autora rozprawy doktorskiej skupiła się na zbadaniu parametrów wytrzymałościowych wybranych nienasyconych gruntów spoistych (naturalnych i wzmocnionych), na ocenie intensywności pęknięć podczas wysychania oraz na przeprowadzeniu analiz numerycznych służących ocenie nośności granicznej podłoża zbudowanego z nienasyconych gruntów spoistych (naturalnych i wzmocnionych) obciążonych stopą fundamentową przy określonej niezawodności i na ocenie rozstawu i głębokości pęknięć w procesie wysychania. Badania własne właściwości fizycznych i mechanicznych pyłu, pyłu z ıtem i ılıu (naturalnych i wzmocnionych) obejmowały wykonanie: badań podstawowych właściwości fizycznych, badań zagęszczalności, badań wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania i badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz badań przebiegu procesu wysychania gruntów spoistych.

2. Treść rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Wyborskiego składa się z sześciu rozdziałów oraz streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu symboli, trzech załączników: A - z wykresami wyników badań wytrzymałości na ścinanie wszystkich analizowanych materiałów gruntowych, B - z tabelami przedstawiającymi podstawowe prawdopodobieństwa, C - z kodem programu FlexPDE, oraz spisu literatury. Spis literatury zawiera 411 pozycji literatury, w tym 357 obcojęzycznych, 29 norm i specyfikacji. Całkowita objętość pracy wraz z załącznikami wynosi 294 strony. Praca poza tekstem drukowanym zawiera 61 tabel i 134 rysunki.

Rozdział 1. stanowi wstęp, w którym Doktorant zwrócił uwagę na problemy związane z zachowaniem się gruntów spoistych w stanie nienasyconym, ze szczególnym

uwzględnieniem ich podatności na pękanie oraz możliwości ograniczania tego zjawiska poprzez odpowiednie wzmocnienie materiałowe. Doktorant przedstawił pięć głównych celów rozprawy:

- Zbadanie wpływu dodatków wzmacniających oraz wilgotności na wybrane parametry mechaniczne pyłu: wytrzymałość na ścinanie oraz wytrzymałość na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia;
- Zbadanie przebiegu procesu wysychania gruntów spoistych oraz ocena wpływu dodatku włókien na intensywność pęknięć, z wykorzystaniem fotografii i pomiarów tomograficznych;
- Opracowanie i walidacja modelu prognostycznego intensywności pęknięć z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego;
- Analiza niezawodności nośności granicznej posadowienia fundamentowego w gruncie nienasyconym z zastosowaniem metody zbiorów losowych;
- Opracowanie i weryfikacja numerycznego modelu rozwoju pęknięć w wysychającym podłożu nienasyconym.

W oparciu o przyjęte założenia badawcze sformułowano tezy i hipotezy badawcze.

W uzasadnieniu podjęcia tematu Doktorant podkreślił znaczenie rozszerzenia badań i analiz dotyczących zachowania się naturalnych i wzmocnionych nienasyconych gruntów spoistych przy różnym stopniu nasycenia.

W ramach przeglądu stanu wiedzy i podstaw teoretycznych (*Rozdział 2.*) Doktorant przedstawił podstawy mechaniki pękania, charakterystykę procesu inicjacji i rozwoju pęknięć, czynniki wpływające na powstawanie pęknięć oraz zabiegi ograniczające powstawanie pęknięć. Doktorant zwrócił uwagę na trzy podstawowe przypadki pękania: pękanie w wyniku otwierania szczeliny, wywołane działaniem naprężeń rozciągających prostopadłych do płaszczyzny pęknięcia, pękanie ścinające w płaszczyźnie szczeliny, związane z naprężeniami stycznymi działającymi równolegle do frontu pęknięcia i pękanie ścinające prostopadłe do frontu szczeliny, występujące przy działaniu naprężeń stycznych w kierunku prostopadłym do płaszczyzny pęknięcia. Doktorant przeanalizował związki konstytutywne zalecane przy analizie pękania różnych materiałów. Przedstawił dotychczasowe koncepcje procesu inicjacji pęknięć w gruncie ilastym. Scharakteryzował naprężenia międzycząsteczkowe w skali mikro występujące w nienasyconych gruntach spoistych w zależności od stopnia nasycenia. Przedstawił modele opisu wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych wykorzystujące wyniki badań trójosiowych z pomiarem ciśnienia ssania. Doktorant przeanalizował dotychczasową wiedzę dotyczącą przebiegu procesu pękania, rozwoju siatek pęknięć i klasyfikacji ich typów. Zwrócił uwagę na metody stosowane do monitorowania i rejestracji procesu pękania gruntu. Przedstawił zestawienie wskaźników geometrycznych wykorzystywanych w opisie pęknięć. Doktorant podkreślił znaczenie czynników wpływających na powstawanie pęknięć, zwracając uwagę na wpływ właściwości gruntu, ograniczeń brzegowych, warunków środowiskowych i niejednorodności i defektów

strukturalnych. Doktorant scharakteryzował zabiegi ograniczające powstawanie pęknięć, w szczególności zastosowanie dodatków chemicznych i zbrojenia włóknami. Zamieścił szczegółowe zestawienie wpływu wybranych dodatków na intensywność i charakter pęknięć gruntu pod kątem rodzaju dodatku, zastosowanego udziału i uzyskanych efektów. Przedstawił dotychczasową wiedzę na temat wpływu dodatków na nośność graniczną. Doktorant przeanalizował przedstawione w literaturze metody numeryczne służące opisowi inicjacji i rozwoju pęknięć w ośrodkach gruntowych, w szczególności metody siatkowe oraz metody bezsiatkowe.

W podsumowaniu Doktorant stwierdził, że pomimo iż problematyka pękania gruntów była dotychczas badana, wciąż występują istotne luki badawcze. W ramach realizowanych celów badawczych Doktorant podjął się częściowego wypełnienia następujących luk badawczych, które obejmują: niedostateczną identyfikację i brak klasyfikacji czynników decydujących o intensywności powstawania pęknięć; brak szerokiej analizy porównawczej parametrów wytrzymałościowych gruntu oraz cementogruntu zbrojonego różnym typem włókien; niedostateczne rozpoznanie problematyki niezawodnościowej analizy nośności granicznej podłoża gruntowego zbrojonego włóknami; ograniczony zakres badań nad modelami numerycznymi umożliwiającymi określenie rozstawu i głębokości pęknięć.

Rozdział 3. zawiera opis zakresu i metod badań własnych oraz charakterystykę właściwości badanych materiałów z dodatkiem w różnych włóknach, pyłu granodiorytowego i cementu.

Badania obejmowały określenie wytrzymałości gruntu na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania przy różnym stopniu nasycenia gruntu. Badania przeprowadzono na gruncie z dodatkiem samych włókien (polipropylenowych, jutowych, PET, szklanych pokrytych żywicą poliestrową), lub samego cementu, stosując dwa poziomy jego zawartości, lub dodatku pyłu granodiorytowego, lub włókien w połączeniu z cementem. W celu określenia, w jakim stopniu ssanie matrycowe przyczynia się do wzrostu wytrzymałości próbek, przeprowadzono oznaczenie wartości ssania metodą bibuły filtracyjnej. Dodatkową ocenę wpływu włókien i cementacji na właściwości wzmocnionego gruntu przeprowadzono na podstawie badania jednoosiowego ściskania. Badania procesu wysychania gruntu obejmowały obserwację inicjacji oraz rozwoju pęknięć na powierzchni wysychających próbek w celu oceny wpływu procesu wysychania na intensywność pęknięć oraz określenia, w jaki sposób włókna i dodatek minerałów ilastych wpływają na przebieg tego zjawiska. Analizę wpływu wilgotności oraz dodatku włókien na intensywność pęknięć wewnątrz próbek gruntu przeprowadzono z wykorzystaniem tomografii komputerowej.

W badaniach gruntów spoistych jako podstawowy wykorzystano pył (Si) o zawartości frakcji iłowej 8,7%, ponadto pył z iłem (clSi) o zawartości frakcji iłowej 22,7% oraz ił (Cl) o zawartości frakcji iłowej 40,9%. W badaniach wykorzystano również piasek z pyłem (siSa) o zawartości frakcji żwirowej 11% oraz o zawartości frakcji iłowej 6,5%.

Do stabilizacji próbek gruntu zastosowano cement portlandzki CEM II/B-M (S-V) N o klasie wytrzymałości na ściskanie 42,5 MPa. Pył granodiorytowy pochodził z instalacji odpylania kruszyw wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Włókna polipropylenowe,

włókna jutowe, włókna PET i włókna szklane pokryte żywicą poliestrową charakteryzowały się gęstościami objętościowymi odpowiednio: $0,903 \text{ g/cm}^3$, $1,45 \text{ g/cm}^3$, $1,35 \text{ g/cm}^3$ i $1,90 \text{ g/cm}^3$. Dodatki w postaci włókien o długości 12 mm wprowadzano w ilości odpowiadającej 0,5% suchej masy mieszanki gruntowej.

W celu wyznaczenia wilgotności optymalnej odpowiadającej maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla badanych materiałów przeprowadzono badania zagęszczalności normalną metodą Proctora. Wszystkie typy próbek zostały wykonane poprzez dokładne wymieszanie suchych składników w odpowiednich proporcjach, a następnie dodanie wody w kilku porcjach, stale mieszając, aż do uzyskania jednolitej mieszaniny. W przypadku badań w aparacie bezpośredniego ścinania przygotowane mieszaniny umieszczano w formach prostopadłościennych, zagęszczając w trzech warstwach, aż do uzyskania założonej gęstości. Próbkę bez dodatku cementu natychmiast umieszczano w aparacie, natomiast próbki z dodatkiem cementu przed badaniem poddawano procesowi kondycjonowania przez 7 lub 28 dni.

W celu zbadania wpływu wilgotności na parametry wytrzymałościowe przyjęto następujące charakterystyczne wartości wilgotności:

- dla pyłu $w=9,7\%$ oraz $w=16,2\%$ (tj. $w_{\text{opt}} - 3,8\%$, $w_{\text{opt}} + 2,7\%$),
- dla pyłu z dodatkiem włókien polipropylenowych $w=12,7\%$ oraz $w=16,3\%$ (tj. $w_{\text{opt}} - 2,3\%$, $w_{\text{opt}} + 1,3\%$),
- dla pyłu z dodatkiem włókien jutowych $w=14,8\%$ oraz $w=16,0\%$ (tj. $w_{\text{opt}} - 0,7\%$, $w_{\text{opt}} + 0,5\%$),
- dla pyłu z dodatkiem włókien PET $w=16,2\%$.

Do badań wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przygotowano sześć typów mieszanek pyłu (Si): bez dodatku, z dodatkiem 0,5% włókien polipropylenowych, z dodatkiem 2% cementu, z dodatkiem 4% cementu, z dodatkiem 2% cementu oraz 2% pyłu granodiorytowego, z dodatkiem 4% cementu i 0,5% włókien polipropylenowych. Ponadto przeprowadzono badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie na mieszankach piasku z pyłem (siSa) z dodatkiem 4% cementu oraz z dodatkiem 2% cementu oraz 2% pyłu granodiorytowego.

Badania intensywności pęknięcia powierzchniowego przeprowadzono na trzech gruntach spoistych: próbkach pyłu (Si, $I_p = 14,5\%$), pyłu z iłem (clSi, $I_p = 22,4\%$) (pyłu z dodatkiem montmorylonitu w ilości 15%) i iłu (Cl, $I_p = 34,1\%$) (pyłu z dodatkiem montmorylonitu w ilości 35%). Do próbek pyłu oraz do próbek iłu wprowadzono dodatek włókien polipropylenowych i jutowych oraz do próbek pyłu dodatek 4% cementu.

Badania pęknięć za pomocą tomografii komputerowej przeprowadzono na próbkach iłu (Cl) bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych o wysokości 250 mm i średnicy 80 mm, przy użyciu przemysłowego tomografu rentgenowskiego GE phoenix v|tome|x s.

Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach o wymiarach $60 \times 60 \text{ mm}$ i wysokości 20 mm, przy trzech lub czterech

wartościach naprężenia normalnego: 25 kPa, 50 kPa, 75 kPa i 100 kPa. Próbkki były poddane konsolidacji i ścinaniu przy stałej prędkości przemieszczenia 0,05 mm/min.

Oznaczanie wartości ssania wybranych próbek gruntu poddanych badaniu ścinania przeprowadzono metodą bibuły filtracyjnej.

Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przeprowadzono na cylindrycznych próbkach o średnicy 8 cm i wysokości równej 8 cm, przy stałej prędkości przemieszczenia wynoszącej 0,3 mm/s.

Badania intensywności pęknięcia powierzchniowego trzech gruntów spoistych (pyłu, pyłu z iłem i iłu) poddanych procesowi wysychania przeprowadzono na próbkach bez i z dodatkami przy początkowej konsystencji płynnej, przy początkowej wilgotności znacznie przekraczającej granicę płynności do wilgotności powyżej granicy płynności w przypadku iłu (seria pierwsza $I_L = 1.15$, Rys. 3.26), natomiast do wilgotności poniżej granicy plastyczności w przypadku pyłu z iłem (seria druga $I_L = -0.58$) i pyłu (seria pierwsza $I_L = -0.96$).

W rozdziale 4. Doktorant przedstawił porównanie wykresów wytrzymałości na ścinanie, uzyskane z badań w aparacie bezpośredniego ścinania, różnych wariantów próbek pyłu przy różnym stopniu nasycenia, bez dodatku, z dodatkiem włókien polipropylenowych, włókien jutowych, włókien PET, z dodatkiem 4% cementu, z dodatkiem 2% cementu oraz 2% pyłu granodiorytowego, z dodatkiem 4% cementu zbrojonego włóknami polipropylenowymi, z dodatkiem 4% cementu zbrojonego włóknami jutowymi. Pył o większej wartości stopnia nasycenia ($S = 0,92$) wykazywał wyraźnie mniejsze wartości parametrów wytrzymałościowych w porównaniu z pyłem o mniejszym stopniu nasycenia ($S = 0,55$). Pył z dodatkiem włókien polipropylenowych, o większym stopniu nasycenia, charakteryzował się większymi wartościami parametrów wytrzymałościowych w porównaniu z pyłem bez dodatku o zbliżonym stopniu nasycenia ($S = 0,94$). Pył o większej wartości stopnia nasycenia ($S = 0,92$) z dodatkiem włókien juty wykazywał większe wartości spójności w porównaniu z pyłem o tym samym stopniu nasycenia. Przedstawione porównanie wskazuje, że wprowadzenie włókien do pyłu przyczynia się do poprawy jego wytrzymałości na ścinanie. Pył z dodatkiem 2% cementu wykazywał znacznie większe wartości spójności oraz nieco większy kąt tarcia wewnętrznego w porównaniu z pyłem bez dodatku cementu o tej samej wilgotności ($w = 16,2\%$). Znacznie większe wartości parametrów wytrzymałościowych uzyskano dla pyłu z dodatkiem 4% cementu. Większą wartość kąta tarcia wewnętrznego uzyskano dla pyłu z dodatkiem 2% cementu i 2% pyłu granodiorytowego. Zastosowanie dodatku cementu do pyłu przyczynia się do znacznej poprawy jego wytrzymałości na ścinanie. Największą wartość kąta tarcia wewnętrznego uzyskano dla pyłu zbrojonego włóknami PET z dodatkiem 4% cementu.

Oznaczenie wartości ssania matrycowego i całkowitego przeprowadzono zgodnie z normą ASTM D5298-16 metodą bibuły filtracyjnej dla wybranych próbek pyłu poddanych ścinaniu przy wilgotności $w = 9,7\%$ i $16,2\%$.

Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przeprowadzono na różnych wariantach próbek pyłu: bez dodatku, z dodatkiem włókien polipropylenowych, z dodatkiem 2% i 4%

cementu, z dodatkiem 2% cementu i 2% pyłu granodiorytowego, z dodatkiem 4% cementu zbrojonego włóknami polipropylenowymi. Średnie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wynosiły dla próbek pyłu bez dodatków 0,186 MPa, z dodatkiem włókien polipropylenowych 0,227 MPa, z dodatkiem 2% cementu 0,355 MPa, z dodatkiem 2% cementu oraz 2% pyłu granodiorytowego 0,394 MPa, z dodatkiem 4% cementu zbrojonego włóknami polipropylenowymi 0,630 MPa i z dodatkiem 4% cementu 1,022 MPa. Największe wartości odchylenia standardowego stwierdzono dla próbek stabilizowanych cementem. Dodatek włókien do mieszanki cementogruntovej spowodował znaczny wzrost odkształceń plastycznych ściskanej próbki.

Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przeprowadzono również na różnych wariantach próbek piasku z pyłem: z dodatkiem 4% cementu, z dodatkiem 2% cementu i 2% pyłu granodiorytowego po 7 oraz 28 dniach kondycjonowania w różnych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych. Największą średnią wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (1,87 MPa) uzyskano dla próbek pyłu z dodatkiem 4% cementu kondycjonowanych przez 28 dni nad powierzchnią wody. Najmniejszą średnią wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (1,08 MPa) uzyskano dla próbek pyłu z dodatkiem 4% cementu kondycjonowanych przez 28 dni w wilgotnym piasku w obniżonej temperaturze 5°C. Największą średnią wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (1,39 MPa) uzyskano dla próbek pyłu z dodatkiem 2% cementu i 2% pyłu granodiorytowego kondycjonowanych przez 28 dni nad powierzchnią wody. Najmniejszą średnią wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (0,81 MPa) uzyskano dla próbek pyłu z dodatkiem 2% cementu i 2% pyłu granodiorytowego kondycjonowanych przez 28 dni w wilgotnym piasku w obniżonej temperaturze 5°C.

Badania pęknięć powierzchniowych podczas procesu wysychania wykonano na próbach pyłu, pyłu z iłem i iłu przy bardzo dużej zmianie wilgotności (odpowiednio w drugiej serii z 59,7% do 3,1%, 100% do 17,9% i 151,6% do 73,8%). Analizę pęknięć powierzchniowych podczas procesu wysychania przeprowadzono z wykorzystaniem wskaźnika intensywności pęknięć CIF, stanowiącego stosunek całkowitej powierzchni pęknięć do całkowitej powierzchni próbki gruntu wyrażony w procentach. Wskaźnik intensywności pęknięć CIF gruntów spoistych w badanym zakresie zmiany wilgotności wynosił dla pyłu, pyłu z iłem i iłu odpowiednio: 32,2%, 48,5% i 51,8%. W próbkach pyłu z dodatkiem włókien polipropylenowych i jutowych pierwsze pęknięcia wystąpiły wcześniej w miejscach występowania defektów strukturalnych. Końcowy wskaźnik intensywności pęknięć CIF pyłu z dodatkiem włókien polipropylenowych i jutowych był mniejszy i wynosił odpowiednio 25,8%, 29,1%. Końcowy wskaźnik intensywności pęknięć CIF w próbkach iłu był większy niż w próbkach iłu z dodatkiem włókien polipropylenowych i jutowych, który wynosił odpowiednio 41,3% i 49,5%. Dodatek cementu do pyłu spowodował szybki i wyraźny wzrost wartości CIF w początkowych etapach suszenia w porównaniu z próbką bez spoiwa, po czym wskaźnik intensywności pęknięć CIF pyłu z dodatkiem cementu w badanym zakresie zmiany wilgotności wynosił 16,9%.

Badania pęknięć za pomocą tomografii komputerowej próbek iłu (CI) bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych przeprowadzono w układzie objętościowym. Analizę pęknięć objętościowych podczas procesu wysychania przeprowadzono z wykorzystaniem wskaźnika pęknięć objętościowych R_{VC} , stanowiącego stosunek objętości pęknięć do objętości wynikającej z sumy wokseli, wyrażony w procentach. Badania wskazują, że dodatek włókien polipropylenowych ogranicza możliwość skurczowego odkształcania się iłu.

W rozdziale 5. Doktorant przedstawił wyniki analizy i modelowania zachowania się gruntów nienasyconych, które obejmowały prognozowanie intensywności pęknięć i ocenę cech gruntu wpływających na pękanie z wykorzystaniem uczenia maszynowego, ocenę nośności granicznej wraz z analizą niezawodności posadowienia stopy fundamentowej na wzmocnionym podłożu nienasyconym oraz modelowanie numeryczne rozwoju pęknięć.

Ocenę wpływu poszczególnych cech gruntu i warunków wysuszenia na wskaźnik intensywności pęknięć przeprowadzono z wykorzystaniem macierzy korelacji. Z cech gruntu największy wpływ na zwiększenie CIF ma zawartość montmorylonitu, granica płynności, granica plastyczności, wskaźnik plastyczności, wilgotność. Podjęto próbę wykorzystania modelu drzewa regresyjnego do prognozy wartości wskaźnika CIF oraz szacowania intensywności pęknięć na podstawie cech wyjściowych gruntu.

Ocenę nośności nienasyconego podłoża pod fundamentem obciążonym siłą pionową przyłożoną centralnie przeprowadzono, wykorzystując metodę zbiorów losowych. Przyjęto fundament o kwadratowej podstawie 1×1 m, posadowiony na głębokości 1 m poniżej poziomu terenu. Jako podłoże przyjęto pył bez dodatku ($S = 55\%$ i $S = 92\%$) i pył ($S = 92\%$) z dodatkiem włókien polipropylenowych, włókien jutowych, z dodatkiem cementu, z dodatkiem cementu i pyłu granodiorytowego, z dodatkiem cementu zbrojonego włóknami polipropylenowymi, z dodatkiem cementu zbrojonego włóknami PET, z dodatkiem cementu zbrojonego włóknami z kompozytu żywicy epoksydowej oraz włókien szklanych. Dla analizowanych materiałów gruntowych obliczono zmienne losowe (spójności, kąta tarcia wewnętrznego i ciężaru objętościowego) wykorzystując rozkład beta. Dla pyłu stabilizowanego cementem uzyskano bardzo duże wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności ($\varphi' = 52,3^\circ$ i $c' = 314$ kPa). Dodatek włókien PET do pyłu stabilizowanego cementem znacznie zwiększył wartość kąta tarcia wewnętrznego ($\varphi' = 71,8^\circ$). Określono dolne i górne dystrybuanty funkcji stanu granicznego nośności oraz zmianę wskaźnika niezawodności β dla analizowanych materiałów gruntowych. W tabeli 5.12 przedstawiono zestawienie obliczonych wartości pionowego obciążenia fundamentu potrzebnego do osiągnięcia założonych wartości współczynnika niezawodności β dla wszystkich analizowanych materiałów gruntowych. Najmniejszą wartość pionowego obciążenia fundamentu potrzebnego do osiągnięcia współczynnika niezawodności $\beta = 3,8$ (okres odniesienia 50 lat, klasa konsekwencji CC2) uzyskano dla podłoża z pyłu o stopniu nasycenia $S = 92$, która wynosiła 487 kN. Zbrojenie pyłu dodatkiem włókien polipropylenowych spowodowało zwiększenie wartości pionowego obciążenia fundamentu do 937 kN. Stabilizacja pyłu dodatkiem 4% cementu spowodowało zwiększenie wartości pionowego obciążenia fundamentu do 8004 kN.

Modelowanie zagadnienia nośności granicznej na rozciąganie (rozwój pęknięć) w nienasyconej próbce gruntu (o wysokości 1 m) przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzi numerycznych. Analizę numeryczną wykonano dla trzech rodzajów gruntów: pyłu, pyłu z iłem oraz iłu, przyjmując idealnie sprężysty model gruntu i płaski stan odkształcenia. W analizach uwzględniono zmienność właściwości gruntu (wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości), wzdłuż wysokości próbki w zależności od stopnia nasycenia. Do oceny intensywności skurczu wykorzystano wskaźnik pęknięć powierzchniowych R_{sc} , stanowiący stosunek całkowitej powierzchni pęknięć do początkowej powierzchni próbki gruntu wyrażony w procentach. Najlepszym odzwierciedleniem zależności pomiędzy skurczem a ssaniem dla wszystkich analizowanych gruntów okazało się dopasowanie wykładnicze. Obliczenia dla modelowanej próbki gruntu przeprowadzono, zakładając obecność pęknięcia o zmiennej głębokości. Poniżej wierzchołka pęknięcia zdefiniowano strefę przejściową z obniżonym współczynnikiem skurczalności, co odzwierciedla warunki wysychania gruntu i stopniowe zmniejszanie skurczu wraz ze wzrostem wilgotności. Rozpatrzono różne wartości rozstawu pęknięć oraz głębokości pęknięcia. Porównanie rozstawu pęknięć uzyskanych w pomiarach laboratoryjnych oraz w obliczeniach wykonanych z wykorzystaniem modelu numerycznego w przypadku pyłu z iłem i iłu wskazuje na dobrą zgodność wyników. Badania laboratoryjne wykazały, że włókna zwiększają rozstaw pęknięć dzięki wzrostowi wytrzymałości gruntu na rozciąganie, jednakże stanowią one wtrącenia, w których otoczeniu może dochodzić do koncentracji naprężeń i inicjacji pęknięć.

W *rozdziale 6.* podano podsumowanie i wnioski końcowe w zakresie najważniejszych rezultatów rozprawy doktorskiej w odniesieniu do założonych celów, wkładu własnego i innowacyjności pracy, wniosków praktycznych i aplikacyjnych oraz kierunków dalszych badań.

3. Ocena pracy

Tytuł rozprawy doktorskiej jest adekwatny do celu i treści rozprawy stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora. Rozprawa doktorska charakteryzuje się przejrzystym i dobrze skonstruowanym układem rozdziałów. Cytowana literatura pokrywa obszar współczesnych doświadczeń krajowych i zagranicznych w ramach analizowanej tematyki. Pewien niedobór stanowi brak części literatury dotyczącej badań trójosiowych spoistych gruntów zbrojonych oraz części literatury krajowej dotyczącej badań nienasyconych gruntów ekspansywnych. Przyjęty w rozprawie sposób powoływania się na literaturę (np. model z pracy [5], według [21] zamiast model z pracy Morris i in. [5], według Tanga i in. [21]) utrudnia czytelnikowi identyfikację autorstwa przedstawianych pozycji poprzez konieczność sięgania do spisu literatury.

W badaniach laboratoryjnych wytrzymałości na ścinanie gruntów spoistych w rozprawie doktorskiej wykorzystano aparat bezpośredniego ścinania. W badaniach w aparacie bezpośredniego ścinania nie ma możliwości kontrolowania warunków odpływu; jedynie zapewnienie odpowiedniej prędkości ścinania umożliwia badanie w warunkach

z odpływem. Ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania odbywa się w wymuszonej, bardzo wąskiej strefie zniszczenia. W przypadku badania wytrzymałości na ścinanie zbrojonego gruntu spoistego, taka wąska strefa ścinania w porównaniu z zastosowanym zbrojeniem, może powodować zawyżenie wyznaczonych wartości parametrów wytrzymałościowych. Lepsze warunki badania wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego zapewnia aparat trójosiowy ze względu na możliwość kontrolowania warunków odpływu oraz większą strefę ścinania, szczególnie przy dużych próbkach gruntu. Wykonując badania trójosiowe metodą CU (z konsolidacją, bez odpływu) możliwe jest wyznaczenie wartości efektywnej spójności c' i efektywnego kąta tarcia wewnętrznego φ' oraz wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w zależności od naprężenia efektywnego σ'_3 .

W rozprawie doktorskiej do oceny nośności granicznej w warunkach z odpływem podłoża nienasyconego (bez spękań) o cechach losowych wykorzystano wzór (5.31). We wzorze (5.31) nośność graniczna głównie zależy od przyjętych wartości współczynników nośności N_q , N_c i N_γ , które zależą od efektywnego kąta tarcia wewnętrznego φ' . Dla gruntu niespoistego przy $\varphi' = 40^\circ$ współczynnik nośności N_q wynosi 64,2. Przy efektywnym kącie tarcia wewnętrznego $\varphi' = 71,84^\circ$ (pył z 4% dodatkiem cementu i z dodatkiem włókien PET) współczynnik nośności N_q wynosi aż 565343. Stąd tak duża wartość pionowego obciążenia fundamentu potrzebna do osiągnięcia nośności granicznej przy założonej wartości wskaźnika niezawodności $\beta = 3,8$ dla pyłu z 4% dodatkiem cementu i z dodatkiem włókien PET wynosząca 115168 MN (Tabela 5.12).

Rozprawa ma charakter doświadczalno-analityczny. Mgr inż. Piotr Wyborski podjął się zbadania zachowania się nienasyconych gruntów spoistych naturalnych i wzmocnionych przy różnym stopniu nasycenia, szczególnie pod kątem oceny nośności granicznej w podłożu nienasyconym o cechach losowych. Dla zrealizowania założonych celów rozprawy Doktorant wykonał obszerne i dobrze udokumentowane badania laboratoryjne oraz analizy numeryczne i probabilistyczne. Przeprowadzone badania laboratoryjne wymagały wykonania własnych stanowisk badawczych oraz zaangażowania specjalistycznej aparatury badawczej. Wyniki badań laboratoryjnych zostały opracowane statystycznie i probabilistycznie oraz porównane z wynikami analiz numerycznych i probabilistycznych. Bogaty materiał doświadczalny umożliwił Doktorantowi dokonanie oceny wpływu stopnia nasycenia na wytrzymałość i powstawanie pęknięć przy wysychaniu w nienasyconych gruntach spoistych naturalnych i wzmocnionych. Analiza wyników badań pozwoliła Doktorantowi na podanie praktycznych zaleceń oraz kierunków dalszych badań.

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

- Określenie wpływu dodatków wzmacniających (włókien polipropylenowych, jutowych, PET, szklanych pokrytych żywicą poliestrową, cementu, pyłu granodiorytowego) oraz stopnia nasycenia na wytrzymałość na ścinanie pyłu oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie pyłu i piasku z pyłem;

- Określenie intensywności pęknięć powierzchniowych i objętościowych podczas procesu wysychania pyłu, pyłu z iłem i iłu oraz określenie wpływu dodatku włókien i cementu na intensywność pęknięć, z wykorzystaniem fotografii i pomiarów tomograficznych;
- Opracowanie i walidacja modelu prognozy intensywności pęknięć z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego (drzewa regresyjnego, modelu lasu losowego);
- Ocenę niezawodności nośności granicznej posadowienia fundamentowego w gruncie nienasyconym bez i ze wzmocnieniem z zastosowaniem metody zbiorów losowych;
- Opracowanie i weryfikacja numerycznego modelu rozwoju pęknięć w wysychającym nienasyconym gruncie spoistym.

Należy podkreślić, że założone przez Doktoranta naukowe cele i zakres pracy zostały osiągnięte, a przyjęte tezy udowodnione. Przedstawione w pracy wnioski końcowe są w pełni udokumentowane i stanowią własny i oryginalny wkład Doktoranta w poznanie i ocenę zachowania się nienasyconych gruntów spoistych naturalnych i wzmocnionych przy różnym stopniu nasycenia.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

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

- Czy przeprowadzono badania pyłu, pyłu z iłem i iłu umożliwiające wyznaczenie ciśnienia pęcznienia i odkształcenia pęcznienia?
- W badaniach laboratoryjnych pyłu, pyłu z iłem i iłu dodatki w postaci włókien wprowadzano w ilości odpowiadającej 0,5% suchej masy mieszanki gruntowej. Jaka objętość całej próbki zajmowało zbrojenie rozproszone włóknami?
- W jaki sposób mieszano grunty z włóknami? Czy i jak sprawdzano jednorodność uzyskanych próbek?
- Ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania odbywa się w wymuszonej, bardzo wąskiej strefie zniszczenia. Jaki jest wpływ wymiarów zbrojenia na wytrzymałość na ścinanie zbrojonego gruntu wyznaczoną w aparacie bezpośredniego ścinania? Czy badania próbek iłu były prowadzone w warunkach z odpływem?
- Przy ocenie zwiększenia lub zmniejszenia wytrzymałości na ścinanie bardziej jednoznaczne jest porównywanie całej wytrzymałości na ścinanie, a nie oddzielnie spójności i kąta tarcia wewnętrznego, szczególnie jeśli obwiednie zniszczenia się krzyżują.
- Przyjmując parametry gruntu wzmocnionego przy ocenie nośności fundamentu bezpośredniego w obliczeniach przyjęto, że podłoże pod fundamentem w zasięgu strefy zniszczenia (pod i poza podstawą fundamentu) jest w całości wzmocnione. Czy taki schemat wzmocnienia podłoża fundamentu bezpośredniego jest zalecany do realizacji w praktyce budowlanej?

- W jakich warunkach w kraju i na jaką głębokość może nastąpić analizowana w rozprawie doktorskiej zmiana wilgotności wywołana wysychaniem. Czy może to spowodować powstanie spękań poniżej poziomu posadowienia fundamentu bezpośredniego?
- W badaniach wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dodatkowo wykorzystano grunt o zawartości frakcji żwirowej 11,1%, frakcji piaskowej 64,2%, frakcji pyłowej 18,2% oraz o zawartości frakcji ilowej 6,5%, który określono jako grunt niespoisty (piasek z pyłem siSa). Wymaga to dodatkowego komentarza.
- W tabeli 5.10 poszczególnym klasom konsekwencji przypisano niewłaściwe symbole.
- W załączniku A zamieszczono wykresy przedstawiające wyniki badań wytrzymałości na ścinanie analizowanych materiałów gruntowych. W jaki sposób wyznaczono równanie obwiedni zniszczenia?

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

Drobne poprawki w tekście, tabelkach i na rysunkach zostały zaznaczone w recenzowanym egzemplarzu, zestawione w dołączonej tabeli oraz przekazane Doktorantowi, umożliwiając dokonanie niezbędnych korekt przed przekazaniem części pracy do druku.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mgr inż. Piotr Wyborski przedłożył do oceny rozprawę doktorską opracowaną na podstawie nowoczesnych, dobrze zaprogramowanych i obszernych badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych i probabilistycznych. Podczas realizacji rozprawy doktorskiej Doktorant zdobył specjalistyczną wiedzę teoretyczną oraz posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Recenzowana rozprawa doktorska wniosła oryginalne elementy poznawcze w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport” wskazane w ocenie rozprawy, zatem spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 r. poz.1571). Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązanie problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuje, zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Wyborskiego pt. „Zagadnienia nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych” do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz

Uwagi redakcyjne

do rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Wyborskiego
pt.

„Zagadnienia nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych”

Strona	Jest	Powinno być
w całej pracy	indeks plastyczności	wskaźnik plastyczności
w całej pracy	wyższa, najwyższa	większa, największa
w całej pracy	niska, niższa, najniższa	mała, mniejsza, najmniejsza
w całej pracy	szybkość	prędkość
w całej pracy	testy	badania
w całej pracy	metodyka	metoda
w całej pracy	włókna dedykowane do	włókna wykorzystane do
w całej pracy	redukcja	zmniejszenie
w całej pracy	spadek	zmniejszenie
w całej pracy	frakcja pylasta	frakcja pyłowa
w całej pracy	frakcja piaszczysta	frakcja piaskowa
Wykaz symboli	I_p indeks plastyczności	I_p wskaźnik plastyczności
str. 18	zagęszczonej gliny	zagęszczonego iłu
str. 23 Rys. 2.1	ociążenia,	obciążenia,
str. 31 Rys. 2.8	w grówniej	w górnej
str. 33 2.2.1.2.	Oddziaływania	Oddziaływania
str. 37	dla gliny o średniej plastyczności	dla iłu o średniej plastyczności
str. 37	Inna wartość przytoczenia formułą jest	Inną wartość przytoczenia formułą jest
str. 37	dla zagęszczonej gliny o wysokiej plastyczności	dla zagęszczonego iłu o dużej plastyczności
str. 38	dla gliny pylastej o niskiej plastyczności,	dla iłu pylastego o małej plastyczności,
str. 40	napreżeń Griffitha	napreżeń Griffitha
str. 57	W tabeli 2.6 zestawiono wybranych dodatków	W tabeli 2.6 zestawiono wpływ wybranych dodatków
str. 57 Tabela 2.6	zimniejsza się	zmniejsza się
str. 78 Tabela 3.4	g/cm ³	g/cm ³
str. 98	pełny drenaż	pełny odpływ
str. 104	przy stałej prędkości odkształcenia	przy stałej prędkości przemieszczenia
str. 122	W tabeli 4.3	W tabeli 4.4
str. 122	W tabeli 4.3	W tabeli 4.4
str. 123	w tabeli 4.4	w tabeli 4.5
str. 123	Tabela 4.3	Tabela 4.4
str. 123	w tabeli 4.4	w tabeli 4.5
str. 124	Tabela 4.4	Tabela 4.5
str. 127	W tabeli 4.5	W tabeli 4.6
str. 128	Tabela 4.5	Tabela 4.6
str. 141	w tabeli 4.8	w tabeli 4.7
str. 142	w tabeli 4.8	w tabeli 4.7
str. 142	w tabeli 4.8	w tabeli 4.7
str. 142	Tabela 4.8	Tabela 4.7
str. 143	w tabeli 4.9	w tabeli 4.8
str. 144	Tabela 4.9	Tabela 4.8

str. 144	w tabeli 4.8	w tabeli 4.7
str. 145	Tabela 4.10	Tabela 4.9
str. 145		Brak powołania na Tabelę 4.10 4.09
str. 145	w tabeli 4.9	w tabeli 4.8
str. 173	prawą obwiednie	prawą obwiednię
str. 180	Tabela 5.6 rozkłady	Tabela 5.6 Rozkłady
str. 198	w tabeli 5.4	w tabeli 5.14
str. 206	Rysunek 5.47. warunki	Rysunek 5.47. Warunki
str. 233	w sekcji 5.4.	w podrozdziale 5.4.