

Dr hab. inż. Katarzyna Dołżyk-Szypcio
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45A
15-351 Białystok
e-mail: k.dolzyk@pb.edu.pl

Białystok, dn. 13.03.2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Miturskiego pt: „*Charakterystyka wytrzymałościowa gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych*”.

1. Podstawa recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie z dnia 9 października 2024 roku oraz pisma zlecającego IIL3/2025 podpisanego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport prof. dr hab. inż. Eugeniusza Kodę.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW

Promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej Głuchowski

Podstawa prawna: Ustawa z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.).

2. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy badań laboratoryjnych gruntów stabilizowanych cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych. Dla pobranych z terenu trzech rodzajów gruntów wykonano mieszanki z różną zawartością objętościową cementu, włókien polipropylenowych i wody o różnych porowatościach. Próbkę z tak przygotowanych mieszanek były poddawane różnym procesom pielęgnacji. Analizowano wpływ różnych parametrów mieszanki i procesu pielęgnacji na właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe otrzymanych w efekcie próbek gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych. Właściwości odkształceniowe określano nowoczesnymi metodami nieniszczącymi i niszczącymi. Właściwości wytrzymałościowe badano po różnych okresach i warunkach pielęgnacji próbek. Duża liczba przygotowanych mieszanek umożliwiła analizę statystyczną otrzymanych parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych oraz określenie wpływu

składu mieszanki, czasu i warunków pielęgnacji na właściwości odkształceniowe i wytrzymałościowe otrzymanego gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych.

3. Ogólne informacje o rozprawie

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z części zasadniczej liczącej 220 stron oraz dwóch załączników o łącznej objętości 42 stron (łącznie liczy 262 strony).

Zasadnicza część rozprawy składa się z wykazu zastosowanych w pracy symboli i oznaczeń, 8 rozdziałów treści, wykazu literatury oraz spisu rysunków i tabel, które stanowią ostatnie dwa rozdziały tej części.

Zasadnicza część rozprawy zawiera 100 rysunków i fotografii oraz 73 tabele, zaś w dwóch załącznikach zamieszczono 11 stronicową tabelę (Zał. A) oraz 61 rysunków (Zał. B).

Wykaz literatury zawiera 219 pozycji, z czego 177 to publikacje naukowe lub naukowo-badawcze (w tym 2 autora), zaś 42 pozycje to normy i dokumenty normatywne. Wśród wymienionych publikacji 157 to pozycje anglojęzyczne. Spośród wykazanych w spisie literatury 94 pozycje zostały opublikowanych w ostatnim dziesięcioleciu (od 2014 roku włącznie, w tym 2 autora rozprawy).

4. Cel i zakres rozprawy

Celem głównym rozprawy jest:

„Analiza czynników wpływających na wytrzymałość na ściskanie gruntu stabilizowanego cementem z włóknami polipropylenowymi oraz wyznaczenie zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a parametrami takimi jak: objętość porów, objętość spoiwa, objętość włókien, objętość szkieletu gruntowego świeżej mieszanki i czasu utwardzania oraz odporności na działanie wody”.

Traktując grunt stabilizowany cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych jako ciągły ośrodek pięciofazowy sformułowano cele szczegółowe rozprawy dotyczące wpływu poszczególnych składników świeżej mieszanki oraz czasu i warunków pielęgnacji na właściwości odkształceniowe i wytrzymałościowe cementogruntu.

W ośmiu rozdziałach rozprawy opisano badania laboratoryjne i analizy otrzymanych wyników badań umożliwiających osiągnięcie określonego w rozprawie celu.

Rozdział pierwszy przedstawia historię mechanicznej i chemicznej stabilizacji gruntów oraz stosowania włókien naturalnych i sztucznych jako dodatków przy stabilizacji gruntów.

Wskazano na możliwość redukcji zawartości cementu przy stosowaniu zbrojenia rozproszonego nie powodując zmniejszenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

W rozdziale tym sformułowano cel główny i cele szczegółowe rozprawy oraz hipotezę badawczą.

Rozdział 2 jest poświęcony przeglądowi literatury dotyczącej tematyki rozprawy. Zwrócono uwagę na terminologię stosowaną w literaturze naukowej, normatywach krajowych i zagranicznych. Szczegółowo omówiono zagadnienia dotyczące stabilizacji mechanicznej i chemicznej z dodatkiem lub bez zbrojenia rozproszonego. Skupiając uwagę na stabilizacji cementem omówiono podstawowe właściwości cementów stosowanych do stabilizacji gruntów, hydratację cementu i wpływ mineralogii i rodzaju gruntów przydatnych do stabilizacji cementu. Wskazano na wpływ ilości wody w mieszance na właściwości fizyczne i mechaniczne gruntu stabilizowanego cementem oraz problemy przy zagęszczaniu mieszanek. Ponadto, omówiono również wpływ pielęgnacji mieszanki na właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntu stabilizowanego cementem. Analizując szeroko literaturę naukową dotyczącą stosowania zbrojenia rozproszonego omówiono wpływ właściwości stosowanych włókien, ich geometrii i ilości na parametry wytrzymałościowe, odkształceniowe oraz odporność na działanie wody gruntu stabilizowanego cementem.

Rozdział 3 dotyczy badań granulometrii, gęstości właściwej, granic Atterberga, zawartości części organicznych, zawartości CaCO_3 oraz zagęszczalności metodą Proctora trzech różnych gruntów przyjętych do stabilizacji cementem z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. W rozdziale tym przedstawiono wyniki badań cementu i włókien polipropylenowych stosowanych do przygotowania mieszanek z dodatkiem tych włókien.

W rozdziale 4 szczegółowo opisano program badań laboratoryjnych. Wykonano 360 mieszanek próbnych i 72 mieszanki kontrolne. Szeroko opisano metodykę przygotowania i pielęgnacji próbek. Opisano sprzęt do badań nieniszczących i niszczących próbek gruntu stabilizowanych cementem z różną zawartością składników (gruntu, cementu, wody, zbrojenia) oraz okresu i warunków pielęgnacji próbek. Na uwagę zasługuje dbałość o zachowanie normowych i nienormowych zaleceń dotyczących badań i kalibracji sprzętu stosowanego do badań.

Rozdział 5 dotyczy opisu wyników badań laboratoryjnych. Przedstawiono wpływ wilgotności, zawartości cementu, zbrojenia rozproszonego, okresu i warunków pielęgnacji na wytrzymałość przy ścisaniu oraz parametry odkształceniowe otrzymane w badaniach niszczących (E_{50}) i nieniszczących (E_{UPV} , G_{UPV}). Pokazano zależność wytrzymałości na ściskanie od parametrów odkształceniowych.

W rozdziale 6 analizowano wyniki badań Etapu I, traktując cementogrunty jako ośrodki pięciofazowe. Do gruntu jako ośrodka trójfazowego (szkielet, woda, powietrze) dodano fazę wiążącą (cement) i fazę strukturalną (zbrojenie rozproszone). Pokazano szczegółowo metodykę obliczeń zawartości objętościowej poszczególnych faz oraz wyprowadzono empiryczne zależności wpływu poszczególnych faz i oddziaływań wody na wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe. Na uwagę zasługuje fakt poszukiwania zależności dobrze opisujących niezależny wpływ poszczególnych faz, interakcję niektórych z nich na efekty końcowe, wprowadzając siedem parametrów ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6, \Delta_7$). Z sukcesem opracowano empiryczne zależności o wysokim współczynniku determinacji.

Zdefiniowano ogólną (kończącą) zależność empiryczną na podstawie wszystkich wyników badań Etapu I oraz dodatkowo dwie zależności. Jedną nieuwzględniającą mieszanek o 1% zawartości objętościowej cementu i drugą nieuwzględniającą mieszanek o zawartości objętościowej 1% cementu i próbek pielęgnowanych w środowisku wodnym. W rozdziale tym przedstawiono szeroką analizę statystyczną otrzymanych wartości wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe, oceniono jakość otrzymanych zależności empirycznych korzystając z zaawansowanych programów komputerowych.

W rozdziale 7 przedstawiono weryfikację podstawowej zależności empirycznej dla różnych rodzajów gruntu. W szczególności dla gruntu nr 2 (MSa) i gruntu nr 3 (siCl) nie badanych w Etapie I. Dla większości kontrolnych próbek, korzystając z podstawowej zależności empirycznej, otrzymano dobre wyniki prognozowanych wytrzymałości tych próbek na ściskanie jednoosiowe. Tylko pojedyncze wyniki badań były odstające.

W rozdziale 8 podsumowano wyniki prognozowania wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe cementogrunty jako ośrodka pięciofazowego. Otrzymane zależności pozwalają określić ilość cementu w mieszankach z dodatkiem włókien polipropylenowych do otrzymania oczekiwanej klasy wytrzymałościowej cementogrunty. Wykazano wpływ wilgotności i porowatości mieszanek cementogrunty z dodatkiem włókien polipropylenowych na zmiany wytrzymałości w czasie oraz odporność na oddziaływanie wody. Ponadto, przedstawiono zależności wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe od parametrów odkształceniowych.

Sformułowano 13 końcowych wniosków istotnych przy projektowaniu mieszanek cementogrunty z dodatkiem włókien polipropylenowych. Na końcu rozprawy sformułowano dalsze kierunki badań.

W załączniku A przedstawiono składy wszystkich mieszanek oraz czas ich twardnienia.

W załączniku B zaprezentowano wyniki badań ściskania wszystkich próbek przed i po zniszczeniu.

5. Uwagi redakcyjne

- W całej pracy równoważnie stosowano określenia: „grunt stabilizowany cementem” lub „cementogrunty”, „czas utwardzania”, „czas pielęgnacji” lub „czas twardnienia” oraz „objętość cementu” lub „zawartość cementu”.
Należało zdecydować się na wybrane określenie i konsekwentnie stosować w dalszych rozdziałach pracy.
- Brak kilku przykładów symboli identyfikacji (oznaczeń) mieszanek pod rysunkiem 4.2 znacznie utrudnia percepcję pracy. W Tabeli 4.3 zestawienie mieszanek jest niezgodne z rysunkiem 4.2.
- Brak numeru ważnego wzoru na stronie 111.
- W Tabeli 6.2 wzory na R_c i $\hat{R}_c$ są identyczne. Zatem opis tabeli powinien być bardziej rozszerzony lub wprowadzone Δ_7 i $\hat{\Delta}_7$.
- Tytuł podrozdziału 6.2.2 „Wpływ objętości cementu” nie jest prawidłowy. Wpływ tej samej objętości cementu przy różnej zawartości wody lub porowatości na właściwości mechaniczne cementogrunty jest różny.
- Parametr kalibracyjny PK_1 wzoru 6.33 jest opisany nieprawidłowo (PK^1).
- We wzorach 6.52 – 6.54 powinny być zastosowane zaokrąglenia a nie podawane wartości otrzymane z programu komputerowego, np.: wzór 6.52 powinien mieć postać:

$$\hat{R}_{c\ nr\ 1} = 1437 \Delta_7^{-2,56}$$

a nie

$$\hat{R}_{c\ nr\ 1} = 1436,96 \left[\frac{n(1 - Z_i^{0,53}) I^{-0,27}}{T_c^{0,10} C_i^{0,41}} \right]^{-2,56}$$

- Tytuł podrozdziału 7.2 „Weryfikacja zależności empirycznego” powinien być poprawiony.
- Rysunki 6.2 i 7.1 powinny być przedstawione na trzech rysunkach: 6.2a, 6.2b i 6.2c i odpowiednio 7.1a, 7.1b i 7.1c celem łatwiejszego ich opisu i czytelności pracy.
- Opisy wielu rysunków nie są prawidłowe.

Na przykład na rysunku 2.7 oś pionowa „ R_c ze zbrojeniem/ R_c [-]”, oś pozioma „Ilość zbrojenia rozproszonego [%]”, a podpis rysunku „Wpływ ilości zbrojenia na wytrzymałość na ściskanie”.

Rysunek 2.22. oś pionowa „ E_{50} (MPa)”, oś pozioma „Zawartość włókien (%)”, a podpis rysunku „Wpływ włókien na sprężystość podczas badania jednoosiowego ściskania [39]”.

Rysunek 2.23. Oś pionowa „ $q_u/q_u(\dots)$ ”, oś pozioma „ $\eta/C_{IV}^{0,28}$ ” a podpis rysunku „Znormalizowana wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie po 7 dniach [30]”.

- Na rysunku 4.17 na osi poziomej powinny być odkształcenia wyrażone w ułamku a nie w procentach i powinny to być odkształcenia skorygowane ($\varepsilon - \varepsilon_k$).
- Sformułowania:
 „... gdzie w trzeciej pracy zauważono ...” - str. 74,
 „Szacowanie właściwości mechanicznych cementogruntu” - pkt 2.4,
 „Moduł taki można wyznaczyć przy pomocy wzoru 4.10” – str. 111,
 „w tym celu przebadano próbki wytworzone na podstawie 9 mieszanek i ...” – str. 115,
 „Badanie objęło łącznie 90 próbek ...” – str. 122,
 „...co zostało wyrażone wzorem 6.4.” – str. 137,
 powinny zostać poprawione przy publikacji pracy.
- W Tabeli 2.21. dla włókien PP 18 mm błędnie opisano wpływ włókien na moduł ścinania w badaniach Fatah i in. [50].

6. Uwagi merytoryczne

- Jako zmienne zależne Etapu I (Rys. 4.1) powinny być:
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c),
 - moduły odkształcenia (E_{50} , E_{UPV} , G_{UPV})
 a nie
 - siła pionowa,
 - przemieszczenie pionowe,
 - prędkości fal,
 które są zmiennymi pośrednimi.
- Należało pokazać krzywe uziarnienia gruntu 1 i 3 po ich mechanicznym rozdrobnieniu, ponieważ rozdrobnienie ma wpływ na efekt wzmocnienia.
- Należało szerzej opisać dlaczego takie grunty wybrano do badań. Czy lokalizacje do pobrania gruntu wynikały z możliwości późniejszej stabilizacji tych gruntów.
- Nie wykonano badań zagęszczalności poszczególnych mieszanek. Wybrane wilgotności mieszanek w badaniach kontrolnych nie mogą być odniesione do w_{opt} tych mieszanek.
- Wskaźnik kruchości (I_B) powinien być pokazany w załączniku B, gdyż wartości wielkości potrzebnych do jego wyznaczenia były określone w badaniach.

- Prawidłowo wybrano grunt nr 1 do badań zasadniczych Etapu I, gdyż jest to grunt o właściwościach pośrednich pomiędzy gruntami 2 i 3.
- Na stronie 110 „... wytrzymałość na ściskanie definiowana jako zdolność materiału do opierania się działaniu sił zewnętrznych”. Powinno być „Maksymalne naprężenie ściskające w badaniach jednoosiowego ściskania”. Materiał opiera się również przy mniejszych wartościach naprężeń lecz nie jest to wytrzymałość na ściskanie.
- W pracy brak ostatecznego krytycznego spojrzenia na badania CBR i wytrzymałości na rozciąganie, chociaż na stronie 110 jest sformułowanie „... metody zostały odrzucone na podstawie przeglądu literatury i doświadczenia badacza”.
- Niezrozumiałym jest dlaczego w Etapie II (kontrolnym) badano również mieszanki z gruntem nr 1 z Etapu I (24 badania). Zdaniem recenzenta należało zwiększyć liczbę mieszanek z gruntem 2 i 3 z 24 na 36.

Warto było też przedstawić w tabeli sumaryczną liczbę badań, jak poniżej:

Etap I				Etap II		
Tc	S	W	Suma	S	W	Suma
1	27	0	27	0	0	0
3	27	0	27	4	0	4
7	27	0	27	4	18	22
14	27	0	27	4	0	4
28	180	45	225	42	0	42
56	27	0	27	0	0	0
Suma	315	45	360	54	18	72

- W pracy przyjęto, że „Moduły sprężystości wyznaczone na podstawie badań statycznych są mniejsze niż moduły wyznaczone metodami dynamicznymi”. Należy zauważyć, że mierząc odkształcenia próbki za pomocą czujników montowanych na próbce różnice byłyby małe lub nieznaczne.
- Raczej zaskoczeniem jest $w_{opt} \approx 10\%$ niezależnie od zawartości cementu (3%, 5%, 7%), ilości zbrojenia rozproszonego (0%, 0,25%, 0,50%) i wytrzymałości cementogruntu po 28 dniach pielęgnacji.
- Brak stabilizacji wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe po 28 dniach pielęgnacji nie został skomentowany.

- Otrzymane bardzo dobre zależności: $R_c - V_p$ (Rys. 5.13), $R_c - V_s$ (Rys. 5.14), $E_{UPV} - R_c$ (Rys. 5.15) i $G_{UPV} - R_c$ (Rys. 5.16) oraz $E_{50} - E_{UPV}$ (Rys. 5.17) i $E_{50} - G_{UPV}$ (Rys. 5.18) świadczą o możliwości wykorzystania badań nieniszczących do określania R_c i E_{50} .
- Objętościowe zawartości poszczególnych składników były podstawowe w analizach. Należało jednak w pracy przedstawić procedurę przejścia na zawartości wagowe, łatwiejsze do praktycznego zastosowania.
- Przy analizie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych cementogruntu skutecznym okazało się wprowadzenie współczynników Δ_i ($i = 1 \div 7$) i parametrów kalibracyjnych PK_i ($i = 1 \div 4$) otrzymanych z analiz z wykorzystaniem programów komputerowych. Zdaniem recenzenta jest to jedno z głównych osiągnięć Doktoranta.
- Nie jest zrozumiałe dlaczego nie przedstawiono w rozprawie optymalnych mieszanek dla poszczególnych gruntów i możliwości zastąpienia pewnej części cementu włóknami polipropylenowymi. Sądzę, że w dalszej pracy naukowo-badawczej Doktorant skupi swoją uwagę na tym zagadnieniu bardzo istotnym z użytecznego punktu widzenia.

7. Ocena rozprawy

- Bardzo pozytywnie oceniam wiedzę doktoranta dotyczącą stabilizacji gruntów spoiwami hydraulicznymi z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. Doktorant nie tylko umiał wykonać prawidłowo badania laboratoryjne korzystając z nowoczesnej aparatury badawczej, ale również analizować otrzymane wyniki badań korzystając z zaawansowanych programów komputerowych.
- Rozprawa doktorska dowodzi, że Doktorant ma umiejętności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej. Umie zaplanować badania, precyzyjnie wykonać badania i prawidłowo przedstawić wyniki badań i ich analizy. Na uwagę zasługuje również bardzo duża liczba pracochłonnych badań.
- Jako oryginalne osiągnięcia naukowe rozprawy doktorskiej uważam:
 - opracowanie analitycznych zależności parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych cementogruntu od składu mieszanek oraz czasu i sposobu pielęgnacji. Otrzymane zależności mogą być wykorzystane w praktyce inżynierskiej.
 - Szczególnie cenne są zależności parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych cementogruntu wymagane w normatywach od wyników badań nieniszczących.

8. Wniosek

Opiniowaną rozprawę doktorską **mgr inż. Macieja Miturskiego** pt: „*Charakterystyka wytrzymałościowa gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych*” oceniam bardzo pozytywnie.

Uwagi redakcyjne i merytoryczne mogą być poprawione bez konieczności wykonywania dodatkowych badań przy publikacji wyników tej rozprawy w publikacjach naukowych.

Na szczególną uwagę zasługuje pracowitość Doktoranta, dbałość o dokładność badań i analiza otrzymanych wyników z wykorzystaniem zaawansowanych programów komputerowych.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska **mgr inż. Macieja Miturskiego** pt: „*Charakterystyka wytrzymałościowa gruntu stabilizowanego cementem z dodatkiem włókien polipropylenowych*”, której promotorem jest dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW i promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Głuchowski z Instytutu Inżynierii Lądowej SGGW spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim podane w Ustawie z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.).

Wnoszę o dopuszczenie **mgr inż. Macieja Miturskiego** do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.


Dr hab. inż. Katarzyna Dożyk-Szypcio, prof. PB

RPM/6588/2025 N
Data: 2025-03-17



PRICOTTET



Instytut Inżynierii Lądowej SGGW

ul. Nowoursynowska 159

budynek 33, p. 119

02-776 Warszawa

Warszawa