

Białystok, 6.09.2023

Prof. dr hab. inż. Maria Jolanta Sulewska
Katedra Geotechniki, Dróg i Geodezji
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Symy na temat: „Analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowych w metodach statycznej i dynamicznej”

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka, promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Marian Łupieżowiec, prof. PŚ.

1. Podstawa opracowania

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Symy pt. „Analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowych w metodach statycznej i dynamicznej” opracowałam na zlecenie (pismo z 17 lipca 2023 r.) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej dr. hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ, zgodnie z uchwałą Rady z 29 czerwca 2023 roku.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji praca ma charakter eksperymentalny i dotyczy analizy zależności między wartościami modułów odkształcenia badanymi metodą statyczną i metodą dynamiczną. Badania zostały przeprowadzone na rzeczywistych konstrukcjach drogowych.

Rozprawa doktorska przedstawiona do recenzji liczy ogółem 153 strony. Zawiera 77 rysunków i 53 tablice. Praca składa się ze spisu treści, jedenastu rozdziałów, streszczeń w językach polskim i angielskim oraz bibliografii.

Rozprawa została przygotowana w postaci maszynopisu, w języku polskim.

3. Teza, cel naukowy i zakres pracy

Nie sformułowano wyraźnie **tezy pracy**.

Na podstawie wyjaśnień zawartych w rozdziale 1. Wprowadzenie, domyślnie można przyjąć, że skoro istnieje potrzeba określenia korelacji między dynamicznym modułem odkształcenia gruntów E_{vd} oraz wtórnym modułem odkształcenia E_2 oraz w literaturze opisano liczne badania porównawcze przeprowadzone na różnych podłożach, to także dla podbudów z kruszywa łamanego badanych w niniejszej pracy dla konstrukcji dróg kategorii ruchu KR1-KR7 można opracować równania regresji między tymi modułami.

W treści rozdziału 1. podany został **cel pracy** w postaci zdania:

„Praca ma odpowiedzieć na pytanie, czy porównania wartości dynamicznego modułu odkształcenia uzyskiwane podczas badania lekką płytą dynamiczną a wtórnym modułem odkształcenia uzyskiwanym podczas badania statyczną płytą na podbudowie z kruszywa o frakcji 0/31,5 mm dla kategorii dróg: KR1-KR2, KR3-KR4, KR5-KR7 doprowadzą do uzyskania zadowalającego współczynnika determinacji R^2 .”

Myślę, że na podstawie treści rozdziału 1. można wydzielić część celów szczegółowych o charakterze naukowym (poznawczym) oraz część celów szczegółowych o charakterze użytkowym (praktycznym).

Jako **szczegółowe cele naukowe** można byłoby wymienić: przegląd literatury na temat badań korelacji między modułami badanymi lekką płytą dynamiczną i płytą statyczną, analiza metod badań za pomocą płyty VSS i lekkiej płyty dynamicznej, zebranie bazy danych czyli wyników badań dwiema płytami przeprowadzonych na rzeczywistych obiektach drogowych, analiza wyników badań i ustalenie równań regresji oraz opracowanie wniosków.

Jako **szczegółowe cele użytkowe** można byłoby wymienić: opracowanie zależności dla podbudów 3. grup konstrukcji w zależności od kategorii ruchu KR1-KR7 oraz opracowanie współczynników przeliczeniowych modułów E_2 na moduły E_{vd} . Opracowane równania i współczynniki mogą być wykorzystane w praktyce budowlanej, przy wykonywaniu podbudów drogowych z kruszywa łamanego 0/31,5 mm i usprawnienia kontroli nośności warstw.

Zakres ocenianej pracy obejmuje następujące zagadnienia:

Rozdział 1. zawiera wprowadzenie i uzasadnienie podjęcia tematu oraz pokrótce zakres pracy.
Rozdział 2. omawia przegląd literatury na temat zastosowań płyty statycznej VSS oraz lekkiej płyty dynamicznej na świecie i w Polsce.

Rozdział 3. omawia klasyfikację dróg, elementy składowe drogi oraz konstrukcje nawierzchni drogowych.

Rozdział 4. opisuje rodzaje podbudów drogowych, wymagania odnośnie do mieszanek do wykonania podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie, sposoby zagęszczania warstwy podbudowy oraz wymagania odbiorowe dla podbudowy zasadniczej i pomocniczej z kruszywa stabilizowanego mechanicznie.

Rozdział 5. zawiera opisy aparatury i metod badania modułów odkształcenia za pomocą płyty VSS oraz lekkiej płyty dynamicznej.

Rozdziały 6-9 zawierają zasadniczą treść pracy: opis badań, wyniki i analizy wyników.

W rozdziałach 10-11 zamieszczono podsumowanie i wnioski.

4. Struktura rozprawy

W tym punkcie recenzji zostaną w skrócie omówione treści poszczególnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział 1. (*Wprowadzenie, 3 strony*) stanowi wstęp, w którym przedstawiono genezę pracy i potrzebę opracowania zależności między wartościami modułów odkształcenia E_{vd} i E_2 podbudów z kruszywa łamanego dolomitowego 0/31,5, konstrukcji drogowych kategorii ruchu KR1-KR2 oraz KR3-KR4, a także KR5-KR7. Wykonano 350 badań porównawczych in situ na 16. budowach różnych konstrukcji drogowych, z podziałem na podbudowy podatne i półsztywne. Ponadto opisano zakres pracy.

W rozdziale 2. (*Przeгляд zastosowań lekkiej płyty dynamicznej oraz płyty statycznej VSS w Polsce i na świecie, 10 stron*) zawarto przegląd literatury zagranicznej na temat badań nad działaniem i zastosowaniem lekkiej płyty dynamicznej do określenia dynamicznego modułu odkształcenia różnych podłoży gruntowych. Opisano badania porównawcze lekką

plytą dynamiczną i innymi urządzeniami (plytą statyczną VSS, belką Benkelmana oraz wynikami badań laboratoryjnych Kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR). Obszerniej opisano badania porównawcze wykonane w Polsce lekką plytą dynamiczną i plytą VSS, w szczególności w aspekcie określenia zależności między modułami E_{vd} i E_2 oraz w celu określenia wskaźnika zagęszczenia I_s . Przegląd literatury zakończono przytaczając (bez własnego komentarza) opinię Parylaka (2019), który podważa przydatność lekkiej plyty dynamicznej do kontroli zagęszczenia gruntów.

W **rozdziale 3.** (*Drogi, ich podział i budowa, 9 stron*) zamieszczono potrzebne wiadomości podstawowe na tematy dotyczące klasyfikacji dróg i elementów składowych dróg, w tym: rozwiązań konstrukcji nawierzchni (podatne, półsztywne i sztywne) oraz górnej i dolnej konstrukcji nawierzchni.

W **rozdziale 4.** (*Podbudowy, 12 stron*): wymieniono i opisano rodzaje podbudów pomocniczych (z kruszywa stabilizowanego mechanicznie, z tłuczni kamiennego, z chudego betonu, z betonu cementowego, z betonu popiołowego, z betonu asfaltowego, z piasku otoczonego asfaltem, z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej), przytoczono wymagania dotyczące mieszanek do wykonania podbudów z kruszywa stabilizowanego mechanicznie, opisano sposoby zagęszczania podbudowy, zamieszczono wymagania odbiorowe dla podbudowy zasadniczej i pomocniczej z kruszywa stabilizowanego mechanicznie zamieszczone w normach PN-97/S-06102 i PN-84/S-96023 oraz Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych (2014). Z treści tego rozdziału nie wynika jasno, jakie ostatecznie przyjęto wymagania dla podbudowy zasadniczej i pomocniczej dróg kategorii ruchu: KR1-KR2, KR3-KR4 i KR5-KR7.

W **rozdziale 5.** (*Badanie warstwy podbudowy, 15 stron*) opisano zastosowanie plyty obciążonej statycznie VSS do badania tak zwanej w drogownictwie „nośności” podłoża, jej budowę, sposób badania i błędy podczas wykonywania badania. Opisano zastosowanie lekkiej plyty dynamicznej, jej budowę, zasadę działania i metodę badania. Opisano także ugięciomierz Benkelmana, mimo że nie używano go do badań analizowanych w rozprawie.

W **rozdziale 6.** (*Metodyka i program badań, 12 stron*) zamieszczono opis wykonanych badań i analiz. Badania porównawcze plytą VSS (jeden test) oraz plytą dynamiczną firmy ZORN (średnia z trzech testów) jako badania do obioru jakości wykonanych podbudów głównie pomocniczych o sumarycznej grubości od 20 cm do 60 cm. Dodatkowo przeprowadzono analizę sitową oraz badanie wilgotności naturalnej gruntu. Podbudowy były wykonywane z kruszywa łamanego 0/31,5 mm z kopalni GZD Siewierz. Grubość warstw kruszywa łamanego wynosiła od 15 cm do 60 cm. Dane do analizy badanej zależności zostały podzielone w zależności od kategorii ruchu: dla KR1-KR2 wykonano 100 badań porównawczych na 4. konstrukcjach podatnych, dla KR3-KR4 wykonano 100 porównań na 5. konstrukcjach podatnych, dla KR5-KR7 wykonano 150 porównań na 7. konstrukcjach (w tym: na 3. konstrukcjach półsztywnych 57 porównań i na 4. konstrukcjach podatnych 93 porównania).

Wykonano także analizę numeryczną za pomocą programu komputerowego Z_SOIL symulacji obciążenia plytą statyczną i plytą dynamiczną podbudowy w postaci modelu sprężysto-idealnie plastycznego z powierzchnią Coulomba-Mohra. Na jej podstawie uzyskano możliwość oszacowania głębokości oddziaływania obciążenia przekazywanego poprzez stalową plytę obciążoną statycznie lub dynamicznie na podłożę lub warstwy konstrukcji.

W **rozdziale 7.** (*Kategoria ruchu KR1-KR2, 17 stron*) analizowano wyniki przeprowadzonych badań podbudów podatnych konstrukcji drogowych dla dróg kategorii ruchu KR1-KR2. Według PN-97/S-06102 przyjęto, że wymagana wartość wtórnego modułu odkształcenia dla podbudów konstrukcji podatnych KR1-KR2 wynosi $E_2 \geq 120$ MPa, a wskaźnik odkształcenia $I_0 \leq 2,2$.

Rozrzut wszystkich 100 wyników badań modułu E_2 wynosił od 113,1 do 163,0 MPa, a modułu E_{vd} wynosił od 38,9 do 59,6 MPa.

Zależność dla wszystkich 4. konstrukcji została wyrażona wzorem: $E_2 = 2,02 \cdot E_{vd} + 37,08$ przy wartości współczynnika determinacji $R^2 = 0,72$.

Następnie opisano osobno analizy dla poszczególnych konstrukcji.

W przypadku konstrukcji nr 1 pokazano przekrój konstrukcji (kruszywo łamane o grubości warstwy 20 cm + warstwa odcinająca piasek grubości 15 cm, poniżej podłoże gruntowe), w tabeli zestawiono wyniki badań modułów, opracowano równania regresji w postaci liniowej, logarytmicznej i kwadratowej, spośród których wybrano liniowe równanie regresji o $R^2 = 0,74$. Zamieszczono protokół z obciążenia podbudowy płytą VSS. Osiedlenia podbudowy obciążonej płytą statyczną i dynamiczną obliczone za pomocą programu komputerowego Z_SOIL zilustrowano na rysunkach 7.5-7.6 oraz na rys. 7.8. Z rysunków wynika, że oddziaływanie obu płyt sięga ok. 50 cm, a osiedlenia rzeczywiste (rys. 7.7) i obliczone za pomocą programu miały wartości zbliżone do siebie.

Dla pozostałych konstrukcji nr 2, 3, 4 pokazano, że podobne równania regresji liniowej uzyskano w podobny sposób jak dla konstrukcji nr 1, uzyskując odpowiednio wartości $R^2 = 0,69$; $0,75$ i $0,63$. Przy odbiorach tzw. „nośności” za pomocą lekkiej płyty dynamicznej potrzebna jest znajomość minimalnej wymaganej wartości modułu E_{vd} , którą można obliczyć z równań regresji lub korzystając ze współczynnika przeliczeniowego uzyskanego z badań danej konstrukcji – jako stosunek średniej wartości E_2 do średniej wartości E_{vd} . W tym przypadku wynosił on od 2,78 do 2,83, średni dla konstrukcji 1-4 wynosił 2,80 – wtedy minimalna wymagana wartość $E_{vd} = 42,9$ MPa.

W **rozdziale 8.** (*Kategoria ruchu KR3-KR4, 20 stron*) analizowano wyniki przeprowadzonych badań podbudów podatnych konstrukcji drogowych dla dróg kategorii ruchu KR3-KR4. Według PN-97/S-06102 przyjęto, że wymagana wartość wtórnego modułu odkształcenia dla podbudów konstrukcji podatnych wynosi $E_2 \geq 140$ MPa, a wskaźnik odkształcenia $I_0 \leq 2,2$.

Rozrzut wszystkich 100 wyników badań modułu E_2 wynosił od 128,6 do 194,0 MPa, a modułu E_{vd} wynosił od 40,7 do 73,6 MPa.

Zależność dla wszystkich 5. konstrukcji została wyrażona wzorem: $E_2 = 1,81 \cdot E_{vd} + 56,03$ przy wartości $R^2 = 0,80$. Następnie opisano osobno analizy dla poszczególnych konstrukcji.

W przypadku konstrukcji nr 1 pokazano przekrój konstrukcji (kruszywo łamane 20 cm, poniżej podłoże gruntowe), w tabeli zestawiono wyniki badań modułów, opracowano równania regresji w postaci liniowej, logarytmicznej i kwadratowej, spośród których wybrano liniowe równanie regresji o $R^2 = 0,85$. Zamieszczono protokół z obciążenia podbudowy płytą VSS. Osiedlenia podbudowy obciążonej płytą statyczną i dynamiczną obliczone za pomocą programu komputerowego Z_SOIL zilustrowano na rysunkach 8.5-8.6 oraz na rys. 8.8. Z rysunków wynika, że oddziaływanie obu płyt sięga ok. 50 cm, a osiedlenia rzeczywiste (rys. 8.7) i obliczone za pomocą programu miały wartości zbliżone do siebie.

Dla pozostałych konstrukcji nr 2-5 pokazano, że podobne równania regresji liniowej uzyskano w podobny sposób jak dla konstrukcji nr 1, uzyskując odpowiednio wartości $R^2 = 0,75$; $0,86$; $0,62$ i $0,94$. Współczynnik przeliczeniowy w tym przypadku wynosił od 2,77

do 2,90, średni dla konstrukcji 1-5 wynosił 2,83 – wtedy minimalna wymagana wartość $E_{vd} = 49,5$ MPa.

W rozdziale 9. (*Kategoria ruchu KR5-KR7, 29 stron*) analizowano wyniki przeprowadzonych badań podbudów podatnych i półsztywnych konstrukcji drogowych dla dróg kategorii ruchu KR5-KR7. Według PN-97/S-06102 przyjęto, że wymagana wartość wtórnego modułu odkształcenia dla podbudów analizowanych konstrukcji wynosi $E_2 \geq 180$ MPa, a wskaźnik odkształcenia $I_0 \leq 2,2$.

Rozrzut wszystkich 150 wyników badań modułu E_2 wynosił od 138,9 do 304,1 MPa, a modułu E_{vd} wynosił od 45,0 do 101,8 MPa.

Zależność dla wszystkich 7. konstrukcji została wyrażona wzorem: $E_2 = 2,10 \cdot E_{vd} + 53,02$ przy wartości $R^2 = 0,69$. Następnie opisano osobno analizy dla poszczególnych konstrukcji.

W przypadku konstrukcji nr 1 pokazano przekrój konstrukcji (kruszywo łamane 35 cm, warstwa mrozoochronna z piasku gruboziarnistego 15 cm, poniżej podłoże gruntowe), w tabeli zestawiono wyniki badań modułów, opracowano równania regresji w postaci liniowej, logarytmicznej i kwadratowej, spośród których wybrano liniowe równanie regresji o $R^2 = 0,85$. Zamieszczono protokół z obciążenia podbudowy płytą VSS. Osiedlenia podbudowy obciążonej płytą statyczną i dynamiczną obliczone programem komputerowym Z_SOIL zilustrowano na rysunkach 9.5-9.6 (o nieczytelnych legendach) oraz na rys. 9.8. Z rysunków wynika, że oddziaływanie obu płyt sięga ok. 50 cm, a osiedlenia rzeczywiste (rys. 9.7) i obliczone za pomocą programu miały wartości zbliżone do siebie.

Dla pozostałych konstrukcji nr 2-5 pokazano, że podobne równania regresji liniowej uzyskano w podobny sposób jak dla konstrukcji nr 1, uzyskując odpowiednio wartości $R^2 = 0,56; 0,75; 0,63; 0,81; 0,81$ i $0,42$. Ponieważ dla konstrukcji półsztywnych (nry 2, 4, 7) współczynniki R^2 były niezbyt wysokie, wykonano dla nich osobną analizę statystyczną i uzyskano niezadowalającą średnią wartość $R^2 = 0,44$. Wobec powyższego przeprowadzono osobną analizę statystyczną wyników badań podbudów nawierzchni podatnych (nry 1, 3, 5, 6) i określono równanie regresji $E_2 = 2,19 \cdot E_{vd} + 46,25$ przy wartości $R^2 = 0,78$. Współczynnik przeliczeniowy w przypadku konstrukcji podatnych wynosił od 2,73 do 2,95, średni dla konstrukcji podatnych wynosił 2,84 – wtedy minimalna wymagana wartość $E_{vd} = 63,4$ MPa. Nie wykonano porównania wyników badań podbudów konstrukcji półsztywnych z powodu zbyt niskich wartości współczynnika determinacji.

Rozdział 10. (*Podsumowanie, 6 stron*) zawiera szczegółowe podsumowanie wykonanych 350. porównań statycznego wtórnego modułu odkształcenia E_2 z dynamicznym modułem odkształcenia E_{vd} w zależności od kategorii ruchu i dla każdej badanej podbudowy konstrukcji drogowej.

W rozdziale 11. (*Wnioski, 4 strony*) zamieszczono wnioski z wykonanych analiz wyników badań. Wnioski w dużej części są powtórzeniem informacji zawartych w rozdziale 10.

Bibliografia składa się z 96. pozycji literatury podstawowej w języku polskim i angielskim (ok. 20%), 20. norm i rozporządzeń, 12. katalogów i instrukcji oraz 1. strony internetowej.

5. Aktualność tematyki badawczej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Sebastiana Symy porusza istotny problem badań parametrów geotechnicznych, służących do odbiorów tzw. „nośności” podbudów konstrukcji drogowych. Są to: wymagany przy odbiorach normowy wtórny moduł odkształcenia E_2 oraz wskaźnik odkształcenia I_0 badane za pomocą płyty obciążonej statycznie oraz nieznormalizowany dynamiczny moduł odkształcenia E_{vd} badany lekką płytą dynamiczną. Oba rodzaje przyrządów miały średnicę sztywnych płyt naciskowych $D = 300$ mm. Wykonane w ramach rozprawy badania porównawcze dotyczą podbudów konstrukcji drogowych układanych z kruszywa łamanego 0/31,5 mm stabilizowanego mechanicznie. Badanie podbudów za pomocą płyty statycznej jest długotrwałe i kłopotliwe w wykonaniu, ponieważ wymaga zastosowania przeciwwagi, natomiast obciążenie podbudowy lekką płytą dynamiczną ma duże zalety – może być przeprowadzone bardzo szybko przez jedną osobę. W związku z tym od wielu lat prowadzone są badania nad zastosowaniem lekkiej płyty dynamicznej do odbiorów tzw. „nośności” lub zagęszczenia różnego rodzaju nasypów. Wobec tego podjęta tematyka jest ważna i aktualna – opracowanie równań regresji, które pozwolą określić moduł E_2 na podstawie zbadanego modułu E_{vd} jest ważne, szczególnie dla wykonawców robót ziemnych, ze względu na możliwość usprawnienia i przyspieszenia odbiorów warstw gruntowych wbudowanych w nasypy. Samo zagadnienie zastosowania lekkiej płyty dynamicznej nie jest nowe. Pierwszy artykuł na temat prototypu lekkiej płyty dynamicznej opublikowano w niemieckim czasopiśmie Straße und Autobahn już w 1968 roku przez Bohna. Podstawy teoretyczne i kolejne etapy udoskonalenia tego przyrządu były rozwijane dalej przez Weingarta (1978, 1981, 1990, 1993). Metodę tę wprowadzono w roku 1980 do normy ówczesnej NRD (TGL 461/10:1980), w roku 1981 do normy czechosłowackiej (ČSN 73 6192:1981), a w roku 1991 do niemieckich wytycznych drogowych (TP BF-StB TeilB 8.3:1991). Kontynuowane były intensywne badania nad konstrukcją płyty, jej zastosowaniem i interpretacją wyników badań. W Polsce od lat sześćdziesiątych XX. wieku badano pojedyncze egzemplarze przyrządów dynamicznych o różnej konstrukcji i o różnych parametrach (Borkowski 1965, Reczek 1975, Rafalski 1985, Grabowski i in. 1990). Pierwsze badania w Polsce płytą firmy ZORN typu ZFG 01 wykonano w roku 1992 w Politechnice Białostockiej na piasku średnim (Sulewska 1993). Intensywne badania nad rozwojem tej metody badawczej obserwuje się od początku XXI. wieku, szczególnie w Europie i w USA. Różni producenci opracowali i rozpowszechniają różnego rodzaju płyty dynamiczne.

Badania nad zastosowaniem lekkiej płyty dynamicznej są niezmiennie aktualne, ich wyniki ciągle analizowane i wznawiane w różnych aspektach, a w szczególności w celu uściślenia interpretacji wyników badań lekką płytą dynamiczną na podłożach z różnych materiałów.

Wraz z rozwojem technologii w budownictwie drogowym i wykorzystaniem nowych metod do badania parametrów geotechnicznych, otwierają się nowe możliwości dotyczące pomiarów cech gruntów dotychczas nieprzebadanych oraz nowych interpretacji wyników badań. Tematyka niniejszej rozprawy dobrze wpisuje się w ten kierunek rozwoju nauki i praktyki, wobec czego ma aspekty naukowe i użyteczne.

6. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa ma charakter eksperymentalny i dotyczy badań terenowych parametrów geotechnicznych podbudów konstrukcji drogowych z kruszywa łamanego. Autor wykazał się umiejętnością wyboru tematu, leżącego w zakresie jego zainteresowań i umiejętnością posługiwania się metodą naukową przy jego realizacji.

Autor zgromadził materiał badawczy, który może być nadal rozszerzany i wykorzystany w publikacjach. Osiągnięcia i dorobek rozprawy doktorskiej mogą stanowić

inspirację i podstawę tematyczną do prowadzenia dalszych badań i pomyślnego rozwoju naukowego mgr. inż. Sebastiana Symy.

Osiągnięcia naukowe rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Symy oceniam pozytywnie. Do osiągnięć własnych Autora można zaliczyć:

1. Wybór ciągle aktualnej tematyki pracy o walorach naukowych i jednocześnie utylitarnych,
2. Zebranie wyników badań porównawczych płytą obciążoną statycznie oraz płytą dynamiczną w terenie, na podbudowach rzeczywistych konstrukcji drogowych. Badania in situ są obarczone niepewnościami pomiarowymi większymi niż badania wykonywane w warunkach kontrolowanych w laboratorium na jednorodnych podłożach. Badania były wykonywane na podbudowach konstrukcji drogowych, które nie były identyczne. Głównie różniły się od siebie pod względem grubości warstwy kruszywa łamanego i obecności dodatkowych warstw o różnej grubości z innych gruntów. Różnice te spowodowały na pewno rozrzut wyników, co uwidoczniło się w nieidealnych wartościach współczynników determinacji równań regresji opracowanych dla poszczególnych grup podbudów,
3. Uogólnienie wyników badań podbudów o różnej konstrukcji, ich analiza i opracowanie równań regresji,
4. Ustalenie minimalnych wymaganych wartości modułu E_{vd} dla podbudów podatnych konstrukcji drogowych z podziałem na kategorie ruchu, co może być przydatne w budownictwie drogowym,
5. Opanowanie warsztatu statystycznej analizy wyników w potrzebnym zakresie, zastosowanie narzędzi statystycznych, sformułowanie prawidłowych wniosków, co również stanowi przejaw rozwoju naukowego Autora.

7. Uwagi szczegółowe i dyskusja

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską zgłaszam następujące uwagi krytyczne i pytania do Autora, uszeregowane zgodnie z kolejnością rozdziałów.

Rozdz. 1.

- 1) We wprowadzeniu nie ma wyraźnie wyodrębnionej tezy i oddzielnie określonego celu lub celów pracy.
- 2) Dlaczego przyjęto oznaczenie dynamicznego modułu odkształcenia E_{VD} – w literaturze najczęściej używane jest oznaczenie E_{vd} ?

Rozdz. 2.

- 1) Przegląd obszernej literatury na temat zastosowań lekkiej płyty dynamicznej przeprowadzono szczegółowo w aspekcie opisów wykonanych badań, ale zabrakło zbiorczego porównania uzyskanych równań regresji zależności $E_2=f(E_{vd})$ otrzymanych przez różnych badaczy dla różnych rodzajów gruntów, wraz z miernikami dokładności tych równań, np. standardowy błąd estymacji ε (lub SEE), błąd względny RE – jeśli były obliczone.
- 2) W tablicach 2.1 oraz 2.2 zamieszczono określenia uziarnienia (ciągłe, nieciągłe, dobrze uziarnione), jak objaśniono pod tablicami – według Instrukcji producenta ZFG 03 oraz IBDIM 2005. Na podstawie których norm klasyfikacyjnych gruntów przyjęto te określenia?
- 3) Brak autorskiego podsumowania przeglądu badań opisanych w cytowanej bibliografii oraz własnych wniosków, a w szczególności wypunktowania zagadnień dyskusyjnych i wartych zbadania przez Autora

Rozdz. 3.-5.

- 1) Rozdziały 3. i 4. są informacyjne i zawierają bardzo potrzebne i związane przypomnienie informacji na temat dróg, ich podziału i konstrukcji nawierzchni drogowych budowy oraz na temat rodzajów podbudów konstrukcji drogowych i wymagań odnośnie mieszanek do wykonania podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie i wymagań odbiorowych tzw. „nośności” czyli modułów E_2 .
- 2) Dlaczego przyjęto wartości wymagane modułów $E_2 = 120, 140$ i 180 MPa według normy PN-97/S-06102 dla podbudów o wskaźniku $w_{noś} = 60, 80$ i 120% ? Czy dla analizowanych w pracy podbudów był badany wskaźnik $w_{noś}$?
- 3) Norma PN-97/S-06102 w p-kcie 3.3.3.7 zaleca badanie wskaźnika nośności I_0 i modułów E_1 i E_2 według normy BN-64/8931-02. Norma BN-64/8931-02 zaleca przy badaniu modułów płytą o średnicy 30 cm stosowanie do obliczeń modułów odkształcenia wzoru z pktu 2.4.1: $M_E = (\Delta p / \Delta S) \cdot D$, gdzie $\Delta p = 0,35-0,25$ MPa. Ponadto przy badaniu modułów odkształcenia każdy stopień obciążenia należy utrzymać min. 2 min., a końcowe obciążenie warstw nawierzchni powinno wynosić $0,45$ MPa. Natomiast wydane przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w 2021 roku Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB D-04.04.02 v03) zamieszczone na oficjalnej stronie internetowej <https://www.gov.pl/web/gddkia/dokumenty-techniczne> (data wejścia 22.08.2023) podają w tab. 6.8 następujące minimalne wymagania wartości modułu E_2 dla nośności podbudowy dróg o ruchu KR1-KR2, KR3-KR4 i KR5-KR7: dla podbudowy zasadniczej odpowiednio: $130, 160, 180$ MPa oraz dla podbudowy pomocniczej odpowiednio: $80, 100, 120$ MPa. Wzór (1.1) do obliczania modułów odkształcenia jest następujący: $E = 0,75 \cdot D \cdot (\Delta p / \Delta s)$, przy czym dla podbudowy pomocniczej i zasadniczej $\Delta p = 0,35-0,25$ MPa. Pozostałe warunki badania nie uległy zmianie. Czy Autor mógłby wyjaśnić te różnice w wymaganiach i które wartości E_2 należy obecnie stosować? Autor nie napisał wyraźnie, które wymagania ostatecznie przyjął i dlaczego. W rozdziale 5.1.4 Autor nie napisał wyraźnie, który wzór ostatecznie przyjął do obliczeń i którą procedurę badawczą zastosował i dlaczego? W opisie badania płytą VSS Autor napisał, że czas trwania poszczególnych stopni obciążenia według DODP (1998) wynosi 1 min., a ostatni stopień obciążenia wynosi $0,55$ MPa. Z rys. 7.7, 8.7 i 9.7 rozprawy oraz protokołów z badań wynika, że ostatni stopień obciążenia wynosił jednak $0,45$ MPa. Jaki rzeczywiście był czas trwania stopni obciążenia?
- 4) Moim zdaniem niepotrzebny jest opis badania ugięciomierzem Benkelmana (rozd. 5.3), ponieważ Autor w pracy nie analizuje wyników tych badań.

Rozdz. 6.-9.

- 1) Tytuł rozdziału 6.1 nie powinien brzmieć Poletko doświadczalne, ponieważ badania były wykonywane na budowach.
- 2) Do wykonywania badań na budowie zostały użyte cztery lekkie płyty dynamiczne firmy ZORN, trzy jednoczujnikowe płyty statyczne VSS firmy InfraTest i jedna trzyczujnikowa płyta statyczna VSS firmy Multiserw. Czy wszystkie były używane do badania jednej podbudowy, czy każdy z przyrządów był używany na innej budowie? Czy były wykonywane badania porównawcze kilkoma płytami na tej samej podbudowie? Czy przyrządy miały aktualne protokoły kalibrowania, zgodnie z zaleceniami producenta?
- 3) Dlaczego wyniki badań podzielono i analizowano według kategorii ruchu? Wszystkie badane podbudowy miały podobną grubość warstwy kruszywa łamanego ($25-35$ cm,

z wyjątkiem konstrukcji nr 2 dla KR3-KR4, która miała grubość 60 cm) i różne sumaryczne grubości (20-60 cm). Dlaczego nie można było opracować jednej zależności dla wszystkich podbudów i odczytać z wykresu wymagane wartości E_{vd} dla poszczególnych kategorii ruchu?

- 4) Na jakiej podstawie przyjmowano wartości parametrów geotechnicznych (tab. 6.2) do obliczeń numerycznych. Dlaczego zawsze przyjmowano spójność materiału?
Wyniki obliczeń numerycznych i wykresy w bardzo interesujący sposób ilustrują głębokość oddziaływania obu płyt obciążających oraz obszar ich poziomego oddziaływania, ale legendy do wykresów i opisy osi są opisane zbyt małą czcionką i przez to są nieczytelne.
Wykresy potwierdzają wnioski z literatury, że oddziaływania na podłoże obciążenia dwiema płytami: statyczną i dynamiczną są podobne do siebie i ich głębokość wynosi ok. 50 cm p.p.t. czyli ok. 1,5-2 średnic płyt.
- 5) Ostatecznie dla wszystkich konstrukcji przyjmowano równanie prostej regresji liniowej. Jako ocenę jakości dopasowania równania do wyników badań podawano współczynnik determinacji R^2 . Dobrze jest podawać jeszcze mierniki dokładności równań: standardowy błąd estymacji oraz błąd względny w %.
- 6) Autor uogólnia swoje obliczenia dla podbudów poszczególnych konstrukcji drogowych oraz grup podbudów, podzielonych ze względu na kategorie ruchu za pomocą współczynników przeliczeniowych X stanowiących stosunki średnich wartości wtórnych modułów odkształcenia E_2 do średnich wartości modułów dynamicznych E_{vd} . Wartości współczynników przeliczeniowych obliczone ze wszystkich wyników wynosiły: dla kategorii ruchu KR1-KR2 i konstrukcji podatnych $X = 2,7975$ i stąd obliczona wartość minimalnego modułu $E_{vd} = 42,9$ MPa, dla KR3-KR4 i konstrukcji podatnych $X = 2,8331$ i stąd $E_{vd} = 49,5$ MPa, dla KR5-KR7 i podbudów konstrukcji podatnych $X = 2,8431$ i stąd $E_{vd} = 63,4$ MPa. Można obliczyć, że średnio wartości modułów E_2 są większe od modułów E_{vd} około 2,8 raza.

Rozdz. 10.-11.

- 1) W podsumowaniu Autor szczegółowo przypomina zakres wykonanych badań i analiz wymienia współczynniki determinacji uzyskane dla poszczególnych podbudów konstrukcji drogowych oraz dla wszystkich wyników w grupach podbudów, podzielonych ze względu na kategorie ruchu oraz wartości odpowiednich współczynników przeliczeniowych.
- 2) Brakuje tu zestawienia np. tabelarycznego i porównania równań regresji uzyskanych przez Autora i przez innych badaczy dla kruszywa łamanego, ewentualnie dla innych gruntów oraz wniosków z takiego porównania.
- 3) Wnioski stanowią praktycznie powtórzenie informacji zawartych w podsumowaniu. Są stanowczo za długie i zbyt szczegółowe. Wnioski powinny stanowić uogólnienie najważniejszych osiągnięć rozprawy (w 4-5. punktach). Należy wziąć w nich pod uwagę spełnienie zapisów tezy i celu pracy.
- 4) Autor nie napisał, czy ma plany i koncepcje dalszych badań naukowych i jakie są, zdaniem Autora, najpotrzebniejsze i najbardziej interesujące kierunki badań i prac w zakresie zbliżonym do tematyki rozprawy?

Literatura

- 1) W spisie literatury wszystkie wyrazy w tytułach czasopism należy pisać wielką literą.
- 2) Artykuły tego samego autora i z tego samego roku należy rozróżniać, dodając do roku opublikowania kolejne litery alfabetu.

- 3) Niedokładnie opisane są pozycje: Krużyński i in. (2007), Pawłowski (2010), ZTV E-StB 09, Badanie i ustalanie zależności...(2005) (jest to raport z grantu wykonywanego w IBDiM, niepublikowany ale zamieszczony w internecie).
- 4) Pozycje wymienione jako DIN 18134:2001 oraz DIN 18134:2012-04 stanowią dwie wersje tej samej normy, dotyczącej badania podłoża płytą statyczną.

8. Uwagi redakcyjne

Układ pracy jest właściwy, podział treści – przejrzysty i adekwatny. Praca jest dobra pod względem poprawności językowej. Pod względem redakcyjnym praca jest przygotowana starannie, zawiera zdjęcia wykonane przez Autora i kolorowe rysunki własne oraz zaczerpnięte z literatury.

Ważniejsze uwagi redakcyjne są następujące:

- 1) Zauważono w tekście pewną liczbę błędów literowych.
- 2) Rys. 5.2, 5.7 oraz 5.3 (str. 54, 56, 57) powinny mieć numery 5.8, 5.9 i 5.10.
- 3) Legendy i jednostki na osiach na rys. 7.6, 8.6 i 9.6 są zupełnie nieczytelne.

9. Ocena końcowa

Opiniowana rozprawa należy do prac doświadczalnych z zakresu geotechniki. Mgr inż. Sebastian Syma w swojej rozprawie doktorskiej podjął temat interesujący naukowców, a w szczególności temat bardzo ważny dla praktyków i wykonawców robót drogowych.

Doktorant samodzielnie rozwiązał postawione w pracy problemy naukowe i osiągnął zakładane cele. Posługując się prawidłową metodyką zrealizował badania w założonym zakresie zagadnień, przeprowadził analizę wyników badań i wyciągnął wnioski o charakterze poznawczym. Rozprawa zawiera oryginalne aspekty i propozycje rozwiązania problemu naukowego, wnosi nowe wartości w dziedzinie geotechniki oraz potwierdza poziom wiedzy Kandydata dostateczny do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych. Sformułowane w recenzji uwagi dyskusyjne i usterki nie obniżają w sposób istotny wartości pracy.

W związku z tym, we wniosku końcowym stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Sebastiana Symy spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule z zakresu sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Maria Jolanta Sulewska

Prof. dr hab. inż. Maria Jolanta Sulewska