

Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: antoni.szydlo@pwr.wroc.pl

Wrocław, 2023-09-09

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Symy pt: **"Analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowych w metodach statycznej i dynamicznej"**.

1. Uwagi formalne

Recenzja rozprawy została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 29 czerwca 2023 roku oraz pisma zlecającego nr RDILGT.512.58.2023 z dnia 17.07.2023 r. podpisanego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. P.Śl.

Promotorem rozprawy jest: prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka,

Promotorem pomocniczym: Dr hab. inż. Marian Łupieżowiec, prof. PŚl.

2. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z badaniami i oceną nośności podbudów nawierzchni drogowych ocenianych za pomocą testów statycznych i dynamicznych. Praca ma charakter aplikacyjny i jest umiejscowiona w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Cel pracy określony jest jednoznacznie. Celem pracy jest analiza możliwości uzyskania zadowalającego współczynnika determinacji R^2 przy porównaniu dynamicznego modułu odkształcenia uzyskanego podczas badania lekką płytą dynamiczną a wtórnym modułem odkształcenia uzyskanego podczas badania statyczną płytą na podbudowie z kruszywa dla różnych kategorii ruchu. Dla zrealizowania celu pracy Doktorat wykonał szereg badań *in situ* na poligonach drogowych, które tworzyły budowy zlokalizowane na drogach województwa śląskiego. Prace były prowadzone na 16 poligonach badawczych. Temat jest aktualny ponieważ w warunkach krajowych brak jest wymagań

W rozdziale 5 przedstawił metodologię badania za pomocą statycznych płyt VSS oraz sposób interpretacji wyników badań jak również metodologię badania za pomocą lekkiej płyty dynamicznej.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił program badań na poligonach doświadczalnych. Wszystkie podbudowy były wykonane z tego samego kruszywa (kruszywo dolomitowe z Siewierza) oraz w podobny sposób zagęszczane. Dla kategorii ruchu KR1- KR2 wykonano 100 porównań (badań statycznych i dynamicznych). Dla kategorii KR3 – KR4 również 100 porównań. Dla kategorii KR5-KR7 wykonano 150 porównań, przy czym z tego 93 porównań dla podbudów z kruszywa a 57 porównań podbudów ułożonych na warstwach stabilizowanych cementem. Dodatkowo Doktorant wykonał analizy numeryczne za pomocą programu Z_Soil przemieszczeń podczas obciążania warstw za pomocą płyty statycznej i dynamicznej. Analizy te miały na celu porównanie rozkładu przemieszczeń rejestrowanych *in situ* z wynikami analiz z modelu. Jak również ocenę zasięgu oddziaływania obciążenia od płyty w głąb warstw nawierzchni.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił wyniki badań dla kategorii ruchu KR1 – KR2. Badania wykonał na 4 konstrukcjach były to warstwy podbudowy z kruszywa ułożone na różnych warstwach: odsączających, odcinających, mrozoochronnych. W wyniku analiz statystycznych ustalił zależności pomiędzy wtórnym modułem odkształcenia otrzymywanym za pomocą badań płyty obciążoną statycznie wg metody VSS z wynikami modułów otrzymywanymi za pomocą lekkiej płyty dynamicznej. Współczynnik determinacji jest większy od 0,7. Wykonał analizę numeryczną rozkładu przemieszczeń podczas badań płytą statyczną i dynamiczną. Jednakże nie dokonał analizy tych wyników.

W rozdziale 8 Doktorant przedstawił wyniki badań dla kategorii ruchu KR3 – KR4. Badania wykonał na 5 konstrukcjach były to warstwy podbudowy z kruszywa ułożone na różnych warstwach: odcinających, mrozoochronnych, gruncie stabilizowanym spoiwem hydraulicznym oraz bezpośrednio na podłożu gruntowym. W wyniku analiz statystycznych ustalił zależności pomiędzy wtórnym modułem odkształcenia otrzymywanym za pomocą badań płyty obciążoną statycznie wg metody VSS z wynikami modułów otrzymywanymi za pomocą lekkiej płyty dynamicznej. Współczynnik determinacji jest większy od 0,7 dla konstrukcji podatnych. Natomiast dla konstrukcji z warstwą stabilizowaną spoiwem wynosi 0,62. Wykonał analizę numeryczną rozkładu przemieszczeń podczas badań płytą statyczną i dynamiczną. Jednakże nie dokonał analizy tych wyników.

W rozdziale 9 Doktorant przedstawił wyniki badań dla kategorii ruchu KR5 – KR7. Badania wykonał na 7 konstrukcjach były to warstwy podbudowy z kruszywa ułożone na różnych

odnośnie badań lekką płytą dynamiczną w celu oceny dynamicznego modułu odkształcenia. Brak jest korelacji uzyskiwanych modułów oznaczanych za pomocą lekkiej płyty dynamicznej oraz modułów oznaczanych w badaniach płytą statyczną. Jest to istotne ponieważ wszelkie kryteria odbiorowe robót, zwłaszcza zanikających odnoszą się do wartości uzyskiwanych płytą statyczną. W niektórych przypadkach nie jest możliwy pomiar płytą statyczną ze względu na utrudniony dostęp. Dlatego istotne są zależności korelacyjne płyty statycznej i dynamicznej, która jest bardziej mobilna od płyty statycznej. Temat pracy moim zdaniem został określony trafnie. Tym bardziej, że ocena nośności podbudów drogowych jest istotna zarówno przy budowie nowych konstrukcji nawierzchni jak i przebudowywanych.

3. Treść i zakres rozprawy

Praca składa się z 11 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu literatury oraz spisu rysunków i tablic używanych w pracy. Praca liczy w sumie 153 strony formatu A4. W pracy zestawiono spis wykorzystywanej literatury, zawierający 128 pozycji w skład których wchodzi artykuły, normy, katalogi, wytyczne oraz strony internetowe.

W rozdziale 1, wstępie, Doktorant naświetlił genezę powstania pracy, cel i zakres pracy. Zasadniczym celem pracy jest: odpowiedź 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 . Doktorant wykonał 350 porównań in situ na 16 budowach o różnych konstrukcjach nawierzchni drogowych w zależności od kategorii ruchu.

W rozdziale 2 przedstawił przegląd zastosowań lekkiej płyty dynamicznej oraz płyty statycznej VSS w Polsce i na świecie. Szkoda, że w rozdziale tym nie dokonał podsumowania i wskazania na czym polega wkład Doktoranta w stosunku przedstawionych osiągnięć innych Autorów.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawił podział dróg w Polsce, podział nawierzchni drogowych oraz rolę i zadania poszczególnych warstw nawierzchni.

W rozdziale 4 Doktorant przedstawił podział podbudów drogowych, warunki wykonania i odbioru tych podbudów.

ambitnego zadania badawczego. Praca ta moim zdaniem ma ważne znaczenie poznawcze i techniczne dla oceny nośności nawierzchni drogowych. Problem ma również aspekt ekonomiczny, gdyż prawidłowa profilaktyka nawierzchni pozwala na proaktywne zarządzanie siecią drogową.

Doktorant w celu zrealizowania postawionych celów wykonał obszerny program badań *in situ*. Metodycznie i systematycznie realizował cele pracy. Wykonał szereg badań i analiz statystycznych, poszukując zależności pomiędzy modułami otrzymywanymi w wyniku badań statycznych (płyta VSS) a modułami dynamicznymi otrzymywanymi w wyniku badań lekką płytą dynamiczną. Przeprowadzone badania pokazują, że jest możliwość prowadzenia kontroli oceny nośności warstw podatnych podbudów lekką płytą dynamiczną i w efekcie na uzyskiwanie szybkie wyników badań i tym samym jest możliwość kontrolowania i poprawiania wykonywanych robót. Doktorant analizował dopasowanie współczynnika determinacji dla różnych linii trendu: liniowej, logarytmicznej i kwadratowej. Najlepszą zbieżność uzyskał dla zależności liniowej. Doktorant w swoich wnioskach określa warunki w jakich należy wykonywać badania w odniesieniu do grubości warstw i rodzajów materiałów stosowanych w nawierzchniach ażeby uzyskać wymagany współczynnik determinacji. Badania Doktoranta wskazują, że niezadowalającą determinację uzyskuje się dla warstw półsztywnych (sztywno-podatnych). Doktorant wskazuje dwie metody oceny: badanie zależności pomiędzy wtórnymi modułami oznaczanymi metodą VSS oraz modułami otrzymywanymi płytą dynamiczną i oszacowanie współczynnika determinacji. Druga metoda określa stosunek średnich wartości modułów statycznych VSS do średnich wartości modułów dynamicznych. Doktorant opracował model numeryczny badania wykorzystując program Z-Soil, który pozwala na analizę zmian przemieszczeń w wyniku obciążenia płytą statyczną i dynamiczną. Jednakże w tym przypadku nie przeprowadził dogłębnej analizy otrzymywanych wyników badań i analiz numerycznych.

Doktorant wnioski formułował wykorzystując własne zbiory wyników badań, których było 1400, dostatecznie duża populacja do analiz statystycznych. Przedstawione w zakończeniu pracy wnioski opierają się o rezultaty badań i studiów teoretycznych, stanowiąc ich uogólnienie. Prezentowana w rozprawie bibliografia jest aktualna i odnosząca się do zagadnień studiowanych w pracy.

warstwach: odcinających, mrozoochronnych, łupkach przepalonych, podłożu z warstwą stabilizowaną spoiwem hydraulicznym. W wyniku analiz statystycznych ustalił zależności pomiędzy wtórnym modułem odkształcenia otrzymywanym za pomocą badań płyty obciążoną statycznie wg metody VSS z wynikami modułów otrzymywanymi za pomocą lekkiej płyty dynamicznej. Współczynnik determinacji jest większy od 0,7 dla konstrukcji podatnych. Natomiast dla konstrukcji z warstwą stabilizowaną spoiwem współczynnik determinacji jest mniejszy od 0,7. Wykonał analizę numeryczną rozkładu przemieszczeń podczas badań płytą statyczną i dynamiczną. Jednakże nie dokonał analizy tych wyników.

W rozdziale 10 w podsumowaniu Doktorant zestawiał wyniki badań, których w sumie było 1400 a więc populacja znaczna. Autor zaproponował analizę wyników wg dwóch metod. Jedna metoda polega na określeniu współczynnika determinacji R^2 a druga na określeniu ilorazu średnich wartości modułów odkształcenia statycznych przez średnie wartości modułów dynamicznych dla analizowanej konstrukcji. Otrzymany współczynnik mnożony przez średnią wartość modułu dynamicznego daje wartości modułu odkształcenia wg VSS.

Doktorant wykazał, że współczynniki determinacji zależą od grubości konstrukcji.

W rozdziale 11 wnioskach przedstawił argumenty świadczące o tym, że analiza zależności modułów odkształcenia określanych metodą statyczną i dynamiczną wykazała, że dla konstrukcji podatnych dla wszystkich analizowanych kategorii ruchu współczynnik determinacji jest większy do 0,7 i waha się w przedziale 0,72 do 0,83. Dla konstrukcji półsztywnej (sztywno-podatnej) oraz z warstwą geowłókniny nie uzyskano zadowalających (mniejsze od 0,7) współczynników determinacji. We wnioskach ostatecznych Doktorant konkluduje, że istnieje możliwość identyfikacji modułów warstw podbudów (podatnych) za pomocą lekkiej płyty dynamicznej. Otrzymywane moduły dynamiczne przeliczone na moduły odkształcenia statyczne wg zaproponowanej przez Doktoranta metody pozwalają oszacować wtórne moduły odkształcenia, które są kryterium robót odbiorowych.

4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Sebastiana Symy dotyczy ważnego problemu związanego z oceną nośności konstrukcji nawierzchni w szczególności podbudów podatnych z kruszywa. Jest to problematyka istotna z punktu widzenia nośności i trwałości oraz utrzymania nawierzchni drogowych. Problemy te są studiowane, jak wynika z przeglądu literatury Doktoranta, w jednostkach badawczych w kraju jak również w Europie i na świecie i w związku z tym pojawiają się różne kryteria i oceny. Doktorant podjął się ciekawego i

5. Uwagi merytoryczne i pytania do Doktoranta

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy nasuwają się następujące uwagi i pytania do Doktoranta:

- 1) Brak jest podsumowania przeglądu metod badań modułów odkształcenia metodą statyczną z wykorzystaniem płyty VSS oraz lekką płytą dynamiczną i wynikających stąd wskazań odnośnie założeń pracy Doktoranta.
- 2) Obciążenie przy badaniu płytą realizowano w sposób statyczny obciążając płytę do wartości 0,45 MPa. Obciążenie lekkiej płyty dynamicznej wynosiło 0,1 MPa. Chciałbym zapytać czy Doktorant analizował wpływ obciążenia na uzyskiwane wartości modułów?
- 3) W pracy daje się zauważyć brak naukowego komentarza do wyników uzyskiwanych z modelu numerycznego *Z_Soil* i porównanie ich z wynikami uzyskiwanymi w badaniach rzeczywistych.
- 4) Szkoda, że Doktorant nie określał modułów warstw leżących poniżej podbudowy. Wtedy można by było oszacować jaki jest wpływ na uzyskiwane wartości modułów warstw leżących poniżej warstwy podbudowy.
- 5) Wg badań Doktoranta współczynniki determinacji zależą od grubości warstw a czy zależą od rodzaju materiału wbudowanego poniżej warstwy podbudowy?
- 6) Recenzent w artykule pt: *Drop weight test based identification of elastic half space model parameters*. Journal of Sound and Vibration. 2005.vol.282 nr 1/2. (P. Ruta, A.Szydło), przedstawił metodę przejścia z testu dynamicznego na test statyczny z wykorzystaniem badań lekką płytą dynamiczną. Zastosowanie tej metody nie wymaga wykonywania badań korelacyjnych. Chciałbym poznać stanowisko Doktoranta w tej kwestii.
- 7) Doktorant dla jednej konstrukcji (odpowiadającej kategorii ruchu) określając moduł na powierzchni podbudowy uzyskiwał zbiór wyników np. wtórny moduł w przedziale 120 do 200 MPa a moduł dynamiczny 45 do 65 MPa. Na bazie tych wyników sprawdzał współczynnik determinacji. Chciałbym zapytać skąd się brały te wyniki. W opisie technologii wykonywania warstwy jest podany sposób oraz logistyka zagęszczania ale nie jest opisane w którym momencie podczas wykonywania warstwy podbudowy były wykonywane badania?

6. Osiągnięcia zawarte w rozprawie

Biorąc pod uwagę całość przedstawionej rozprawy stwierdzam, że dotyczy ona ważnego zagadnienia związanego z oceną nośności podatnych podbudów drogowych wbudowywanych w konstrukcje nawierzchni drogowych. Badania Doktoranta pozwoliły na określenie dopuszczalnych współczynników determinacji dla zależności modułów odkształcenia wtórnego otrzymywanego za pomocą statycznej płyty VSS i modułów dynamicznych uzyskiwanych za pomocą lekkiej płyty dynamicznej. Opracowane zależności korelacyjne pozwalają na wykorzystanie wyników badań modułów dynamicznych za pomocą lekkiej płyty dynamicznej do oceny nośności warstw podbudów z kruszywa, zastępując długotrwałe wyniki badań statycznych za pomocą płyty VSS obciążonej statycznie. Poprawnie oceniona nośność podbudowy pozwala na zachowanie projektowanej nośności i trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej w założonym okresie eksploatacji konstrukcji nawierzchni.

Autor do realizacji celów pracy wykonał obszerny program badań, zbierając dane empiryczne w warunkach *in situ* na dużym zbiorze pomiarowym.

W sposób czytelny metodami naukowymi to jest na podstawie badań i analiz statystycznych wyników obserwacji zebranych w badaniach *in situ*, Doktorant rozwiązał zadanie naukowe. Zaproponował metodę pozwalającą na wykorzystanie lekkiej płyty dynamicznej do szacowania nośności warstwy podbudowy podatnej (z kruszywa). Do tej pory ocena ta jest wykonywana za pomocą długotrwałych badań statycznych dla których opracowane są kryteria nośności warstwy, stosownie do projektowanego ruchu. Badania płytą dynamiczną są bardziej mobilne i nie wymagają stosowania ciężkiego sprzętu jako przeciwwagi. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac badawczych i rozwiązywania problemów naukowych.

Podane powyżej uwagi nie umniejszają wartości rozprawy jako całości i mam nadzieję, że zostaną wyjaśnione podczas obrony pracy.

7. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Sebastiana Symy pt: „Analiza zależności modułów odkształcenia konstrukcji drogowych w metodach statycznej i dynamicznej”, zawiera rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na dobry poziom wiedzy Doktoranta z dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, a także na

umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania określone przez ustawę wg której procedowany jest przewód doktorski.

Przedkładam Radzie Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Recenzję podpisał
Antoni Szydło