

Gdańsk, 14.02.2020

Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. nadzw. IBW PAN

Instytut Budownictwa Wodnego PAN  
80-328 Gdańsk-Oliwa  
Kościerska 7  
Email:waldek@ibwpan.gda.pl

**RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ**  
**mgr inż. Pawła Boronia pt.:**

**„Analiza odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wstrząsy  
parasejsmiczne pochodzenia górniczego z zastosowaniem Metody  
Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi”**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Joanna Dulińska  
Promotor pomocniczy: dr inż. Dorota Jasińska

**1. Uwagi wstępne i charakterystyka pracy**

Niniejszą recenzję wykonałem na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 02.12.2019r. (pismo nr LO.510.31.1.2019).

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Boronia w ogólności poświęcona jest uwzględnieniu wielkości obiektu budowlanego (obiekty wielkogabarytowe) i wynikającego z tego wpływu nierównomiernego obciążenia wywołanego wstrząsem parasejsmicznym indukowanym działalnością górniczą, we właściwej ocenie odpowiedzi dynamicznej takich obiektów.

Przedstawiona mi do oceny praca liczy ogółem 198 stron, 71 rysunków, 21 tabel oraz 141 pozycji literatury. Pracę podzielono na 12 rozdziałów, z których każdy ma kilka podrozdziałów. Główne rozdziały pracy zostały uzupełnione podsumowaniem, w którym Autor przedstawił wnioski końcowe, spisem literatury oraz podsumowaniem w języku angielskim.

Pierwsze 6 z 12 rozdziałów stanowi wprowadzenie do tematu rozprawy i do zasadniczych wyników pracy Autora.

W pierwszym rozdziale Autor charakteryzuje podjęty przez niego problem badawczy. Przedstawia genezę pracy podając generalne podstawy zagadnienia związanego z oceną odpowiedzi dynamicznej konstrukcji inżynierskich na wstrząsy pochodzenia górniczego. Wskazuje przy tym na ważność tego zagadnienia dla naszego kraju z uwagi na intensywne prace wydobywcze prowadzone w dwóch głównych regionach wydobywania kopalin tj. Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) i Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM). Z całej gamy konstrukcji inżynierskich stanowiących element infrastruktury powierzchniowej Autor wyróżnia obiekty wielkogabarytowe, w przypadku których w ocenie odpowiedzi dynamicznej kluczową rolę może odegrać nierównomierność wymuszenia kinematycznego, czyli zróżnicowanie ruchu podłoża pod obiektem. Na tej podstawie formułuje cel i tezę pracy przedstawiając również szczegółowe zadania badawcze, które pozwoliły mu cele te osiągnąć, a tezę udowodnić.

D Z I E K A N A T  
Wydziału Inżynierii Lądowej

Wpłynęło dnia 20.02.2020

L. dz. 10.510.31.3.2020

podpis

*Naumyja*

W rozdziale drugim Autor dokonuje wszechstronnego przeglądu literatury pod kątem uwzględnienia nierównomiernego wymuszenia kinematycznego w analizach dynamicznych obiektów różnego typu, poddanych zarówno wstrząsom wywołanym sejsmicznością naturalną, jak też indukowaną działalnością górniczą. Wykazuje przy tym na ubogość prac poświęconych ocenie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji poddanych nierównomiernemu obciążeniu wywołanemu zjawiskami parasejsmicznymi.

W rozdziale trzecim Doktorant omawia szczegółowo charakterystykę sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą w cytowanych wcześniej obszarach o największej intensywności występowania wstrząsów górniczych w Polsce tj. obszarze GZW oraz LGOM.

Z kolei, w rozdziale czwartym Autor omawia najczęściej stosowane modele wymuszenia kinematycznego tj. model wymuszenia równomiernego i model wymuszenia nierównomiernego, identyfikując i dyskutując szczegółowo najistotniejsze czynniki mające wpływ na nierównomierność ruchu podłoża, takie jak: skończona prędkość fali, redukcja amplitudy drgań wraz z odległością od ich źródła, a także utrata spójności fali. Czynniki te zostały następnie uwzględnione w analizach prowadzonych przez Autora.

W rozdziałach piątym i szóstym Autor przedstawia i omawia metody obliczeniowe najczęściej stosowane w analizach dynamicznych zaczynając od pełnej metody dynamicznej (THA), poprzez metody uproszczone tj. Metodę Spektrum Odpowiedzi (RSA) i Metodę Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi (MSRSA). Ta ostatnia jest szczegółowo omawiana w rozdziale szóstym, gdzie Autor przedstawia jej podstawy teoretyczne oraz zasady stosowania tej metody, poprzez opisanie sposobu wyznaczenia poszczególnych funkcji, współczynników i składowych wektorów występujących w algorytmie metody, niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały od siódmego do dwunastego, w których Autor przedstawił wyniki przeprowadzonych przez niego badań eksperymentalnych na obciążanym dynamicznie, rzeczywistym obiekcie wielopodporowym. Wyniki te skonfrontował z wynikami predykcji zachowania się tego obiektu pod zadaniem obciążeniem dynamicznym, wykonanych przedstawionymi wcześniej metodami, przyjmując zarówno model obciążenia równomiernego, jak i nierównomiernego wymuszenia kinematycznego.

Kolejno, w rozdziale siódmym Autor opisał szczegółowo wybrany do analizy wielopodporowy wiadukt drogowy zlokalizowany w miejscowości Chrzanów o długości 160 m, przedstawiając jego elementy konstrukcyjne oraz zbudowany na tej podstawie trójwymiarowy, numeryczny model obiektu.

W następnym rozdziale, ósmym, została przedstawiona, zastosowana przez Doktoranta, metodyka badań analizowanego wiaduktu drogowego, której celem było wyznaczenie charakterystyk dynamicznych obiektu tj. częstotliwości i postaci drgań własnych oraz parametrów tłumienia. W tym samym rozdziale zostały również omówione wyniki weryfikacji zaproponowanego przez Autora modelu numerycznego wiaduktu.

W rozdziale dziewiątym Autor przedstawił metodykę badań terenowych zastosowaną do wyznaczenia parametrów rządzących zjawiskiem propagacji fali w gruncie, związanym z nierównomiernym ruchem podłoża tj. prędkość rozchodzenia się fali pomiędzy podporami, redukcję amplitudy z odległością od źródła drgań, a także sposób wyznaczania funkcji koherencji pomiędzy sygnałami zarejestrowanymi na kolejnych podporach analizowanego wiaduktu.

Kolejno, w rozdziale dziesiątym pracy, Autor przedstawił modele nierównomiernego wymuszenia kinematycznego założone do analiz numerycznych, które w przypadku pełnej analizy dynamicznej bazowały na reprezentatywnych sygnałach wywołanych rzeczywistymi wstrząsami górniczymi z obszaru GZW oraz LGOM, a w przypadku metod uproszczonych, na krzywych spektralnych przyjętych dla tych obszarów.

W rozdziale jedenastym zostały skonfrontowane wyniki analiz numerycznych odpowiedzi dynamicznej wiaduktu na wymuszenie kinematyczne pochodzenia górniczego z zastosowaniem wszystkich trzech metod (THA, RSA i MSRSA) oraz wymuszenia równomiernego i nierównomiernego. W przypadku pełnej analizy dynamicznej jako obciążenia kinematyczne w obliczeniach przyjęto rzeczywiste przebiegi czasowe wstrząsów górniczych z obszaru GZW oraz LGOM, natomiast w przypadku metod uproszczonych wzorcowe i zmodyfikowane krzywe spektralne dla tych obszarów.

Rozdział dwunasty zawiera szczegółową analizę otrzymanych wyników oraz wynikające z tej analizy wnioski.

## **2. Ogólna ocena pracy**

### **2.1 Ocena aktualności tematyki**

Analiza pracy rzeczywistej konstrukcji inżynierskiej poddanej złożonym stanom obciążenia, a szczególnie teoretyczna predykcja jej zachowania jest ciągle dużym wyzwaniem zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. W chwili obecnej dysponujemy już bardzo zaawansowanymi narzędziami w postaci skomplikowanych modeli pracy materiału wraz z odpowiednimi kodami numerycznymi, które powinny stanowić dobrą bazę umożliwiającą nam prawidłowe odtworzenie pracy takich konstrukcji w warunkach in situ, choć czasami nie zawsze skutecznie. Jest to niezwykle ważne, gdyż pozytywny wynik konfrontacji predykcji teoretycznych z rzeczywistą odpowiedzią obiektu inżynierskiego umożliwia nam weryfikację poprawności przyjętych założeń i metod projektowych, zmierzając w konsekwencji do zapewnienia odpowiednich warunków bezpiecznej pracy takiego obiektu.

Obecnie zupełnie nieźle radzimy sobie w przypadku obiektów budowlanych poddanych standardowym obciążeniom eksploatacyjnym charakteryzującym się niewielką zmiennością w czasie. Jednak problem staje się znacznie trudniejszy, gdy mamy do czynienia z obciążeniami dynamicznymi pochodzenia sejsmicznego, czy parasejsmicznego, szczególnie w przypadku budowli wielkogabarytowych, kiedy to istotną rolę w odtworzeniu rzeczywistej pracy takiej konstrukcji zaczyna odgrywać właściwy model wymuszenia kinematycznego, które jest zmienne w czasie i przestrzeni.

Z uwagi na skomplikowanie opisu procesów i reakcji zachodzących w czasie przejścia fali sejsmicznej w rejonie lokalizacji obiektu wielkogabarytowego, w procesie projektowania i oceny odpowiedzi dynamicznej takiego obiektu stosuje się daleko idące uproszczenia. Podstawowym jest przyjęcie uproszczonych metod szacujących odpowiedź dynamiczną konstrukcji na wymuszenie kinematyczne, bez posilkowania się zaawansowanymi obliczeniami numerycznymi. Zakłada się również przy tym równomierność oddziaływania kinematycznego wzdłuż całej analizowanej konstrukcji. Tak, jak dla typowych obiektów infrastruktury powierzchniowej o niewielkiej kubaturze metody te dobrze się sprawdzają, a założenie o równomiernym ruchu podłoża w wyniku wymuszenia kinematycznego jest zasadne, to już w

przypadku obiektów wielkogabarytowych takie założenie może nieść za sobą poważne konsekwencje skutkujące niewłaściwym zaprojektowaniem konstrukcji inżynierskiej, które może powodować zarówno niedoszacowanie, jak i przeszacowanie rzeczywistej odpowiedzi dynamicznej obiektu. Dotyczy to szczególnie obiektów wielkogabarytowych poddanych oddziaływaniom dynamicznym indukowanym działalnością górniczą, dla których nie ma zbyt wielu opracowań dotyczących skutków przyjmowanych uproszczeń. Powyższe stanowiło genezę pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Boronia.

Dlatego też należy jednoznacznie stwierdzić, że podjęta przez Doktoranta tematyka pracy jest jak najbardziej aktualna i ważna zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia, w szczególności w naszym kraju, z dwoma dużymi obszarami górniczymi o największej intensywności występowania wstrząsów górniczych i gęstej infrastrukturze powierzchniowej.

## 2.2 Ocena pracy

Autor w swojej pracy podjął się ambitnego zadania dokładnego zidentyfikowania, zbadania i oszacowania wpływu przyjmowanych standardowych uproszczeń przy ocenie odpowiedzi dynamicznej wielkogabarytowej konstrukcji inżynierskiej poddanej oddziaływaniom parasejsmicznym, na bezpieczeństwo takiego obiektu. Uproszczenia te dotyczyły zarówno samej metody tej oceny jak i modelu wymuszenia kinematycznego.

Wykonane przez Autora prace badawcze, zarówno teoretyczne jak i eksperymentalne w zakresie możliwości zastosowania jednej z metod przybliżonych w analizie odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych, narażonych na nierównomierne wstrząsy pochodzenia górniczego prowadzone były w ramach dwóch głównym celów:

- weryfikacji możliwości i celowości zastosowania Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi do obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia kinematyczne indukowane działalnością górniczą;
- implementacji wzorcowych krzywych spektralnych, opisanych dla rejonów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) oraz Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) i zmodyfikowanych pod kątem zastosowania Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi, w analizie dynamicznej budowli wielopodporowych uwzględniającej nierównomierność wymuszenia kinematycznego.

Na tej podstawie starał się udowodnić postawioną we wstępie rozprawy podstawową tezę pracy mówiącą o tym, że zastosowanie klasycznej Metody Spektrum Odpowiedzi może prowadzić do niedoszacowania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia kinematyczne pochodzenia górniczego, podczas gdy Metoda Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi pozwala na otrzymanie konserwatywnego i bardziej dokładnego oszacowania odpowiedzi dynamicznej takich obiektów w porównaniu z klasyczną Metodą Spektrum Odpowiedzi.

**Analiza recenzowanej pracy doktorskiej skłania do generalnego wniosku, że dla osiągnięcia obu celów pracy oraz udowodnienia jej tezy Autor opracował bardzo szczegółową i wyczerpującą metodykę z trafnie zidentyfikowanymi i zdefiniowanymi celami cząstkowymi.**

## Rozdziały od 3 do 6

W początkowych 6 rozdziałach pracy Autor dobrze zdefiniował i omówił postawiony we wstępie pracy problem, podając dokładne podstawy teoretyczne związane zarówno z metodami obliczeniowymi stosowanymi w analizach dynamicznych jak też analizowanymi modelami wymuszenia kinematycznego. Szczególną uwagę Autor poświęcił modelowi nierównomiernego wymuszenia kinematycznego opisanemu w rozdziale 4 pracy, gdzie omówił podstawowe przyczyny występowania nierównomierności ruchu podłoża gruntowego tj. utratę spójności fali, skończoną prędkość rozchodzenia się fali, złożone warunki gruntowe oraz redukcję amplitudy wraz z odległością od źródła drgań, podając przy tym i szeroko omawiając podstawy teoretyczne pozwalające uwzględniać poszczególne czynniki w analizach dynamicznych. Pozwoliło to Autorowi zdefiniować warunki do budowy własnego modelu wymuszenia kinematycznego, który został przyjęty w obliczeniach odpowiedzi dynamicznej konstrukcji na wymuszenie wstrząsami parasejsmicznymi pochodzenia górniczego. Należy żałować, że tak mało uwagi Autor poświęcił przyczynom wywołującym analizowaną nierównomierność ruchu, całkowicie pomijając omówienie wpływu warunków gruntowych, które wg mnie są jedną z podstawowych przyczyn tej nierównomierności.

W kolejnych dwóch rozdziałach Autor sprawnie podaje podstawy teoretyczne najczęściej stosowanych metod oceny dynamicznej konstrukcji, w szczególności omawiając Metodę Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi stosowaną dla przypadku sejsmiczności naturalnej, która została przez autora zaimplementowana do oddziaływań dynamicznych indukowanych działalnością górniczą.

Należy podkreślić, że pomimo, iż zawarte w omawianych rozdziałach informacje oraz przytaczane związki są znane i dość dobrze opisane w literaturze tematu, porządkujący sposób ich przedstawienia oraz wyczerpujący charakter świadczą o tym, że Doktorant sprawnie porusza się w podstawach podjętej przez siebie tematyki.

## Rozdziały od 7 do 12

Powodzenie realizacji przyjętych celów pracy było w niezwykle istotnej mierze związane z odpowiednim wyborem monitorowanej konstrukcji inżynierskiej odpowiadającej obiektowi wielkogabarytowemu zlokalizowanemu na terenie oddziaływań górniczych oraz z właściwie zaplanowanymi i przeprowadzonymi badaniami eksperymentalnymi tego obiektu. Należy tutaj stwierdzić, że Doktorant sprostą temu zadaniu w stopniu bardzo dobrym.

Do swej analizy Autor wybrał wielkogabarytową konstrukcję inżynierską w postaci wielopodporowego, pięcioprzęsłowego wiaduktu drogowego o długości 160 m, szczegółowo opisaną w rozdziale 7 pracy. Obiekt ten został przyjęty jako poligon doświadczalny do identyfikacji odpowiedzi dynamicznej konstrukcji na różnego rodzaju wymuszenia kinematyczne, zarówno kontrolowane (wymuszenie w postaci sterowanego wymuszenia harmonicznego wywołane za pomocą wibrosejsu Birdwagen MARK IV oraz wymuszenie pochodzące od podskoków grupy ludzi na płycie pomostu), jak i typowe wymuszenia eksploatacyjne (ruch pojazdów po wiadukcie).

Niezależnie, w celu przeprowadzenia obliczeń odpowiedzi dynamicznej wiaduktu drogowego na nierównomierne wymuszenie, na bazie metody elementów

skończonych Autor zbudował trójwymiarowy model numeryczny wiaduktu, którego podstawowe elementy przedstawił również w tym samym rozdziale 7.

Odpowiedź dynamiczna wiaduktu na wymuszenia kinematyczne była rejestrowana w postaci przebiegów czasowych przyspieszeń drgań mierzonych za pomocą trójkierunkowych układów akcelerometrów umieszczonych na płycie pomostu wiaduktu. Przyjęty zakres wymuszenia harmonicznego obejmował serie wymuszeń o częstotliwościach zawierających się w przedziale od 8 Hz do 50 Hz, a więc pokrywających pasmo niskoczęstotliwościowe, w którym należało się spodziewać występowania częstotliwości drgań własnych obiektu istotnych z punktu widzenia zagrożenia jego bezpiecznej pracy. Odpowiedź dynamiczna obiektu przedstawiana była w postaci przebiegów przyspieszeń drgań w trzech kierunkach – dwóch poziomych (prostopadłym i równoległym do osi obiektu) i pionowym.

Precyzyjnie zaplanowane prace eksperymentalne pozwoliły Autorowi na wyznaczenie podstawowych charakterystyk dynamicznych wiaduktu tj. częstotliwości drgań własnych konstrukcji, postaci tych drgań oraz tłumienia wiaduktu. Do wyznaczenia częstotliwości drgań własnych Autor wykorzystał dwie metody tj. metodę widmowej funkcji przejścia i metodę identyfikacji podprzestrzennej, natomiast postacie drgań własnych wiaduktu zostały wyznaczone za pomocą metody dekompozycji sygnału w dziedzinie czasu, opisane szczegółowo w rozdziale 8 pracy.

Otrzymane wartości częstotliwości drgań własnych wiaduktu wydają się być jak najbardziej wiarygodne, typowe dla tego rodzaju konstrukcji inżynierskich. Podobnie ma się rzecz w przypadku wyznaczonych postaci tych drgań jak też wartości tłumienia opisanych modelem Rayleigha, o czym świadczą m. innymi wyniki zaprezentowane na Rys. 8.24.

**Należy tutaj podkreślić dużą staranność Doktoranta zarówno w czasie prowadzenia pomiarów jak też, a może szczególnie, w opracowaniu i interpretacji otrzymanych wyników, które to zadanie w przypadku odpowiedzi dynamicznej konstrukcji absolutnie nie należy do trywialnych wymagając dużej wiedzy i sprawności w operowaniu niestandardowymi narzędziami (np. filtrowanie sygnału, czy transformaty Fouriera – FFT, DFT).**

Drugim, niemniej ważnym zadaniem była weryfikacja poprawności budowy trójwymiarowego modelu numerycznego wiaduktu bazująca na wynikach pomiarów terenowych. Do tego celu Autor zastosował metodę MAC (Modal Assurance Criterion), porównując zarówno obliczone (korzystając z analizy modalnej) jak i wyinterpretowane na podstawie pomiarów częstotliwości oraz postacie drgań własnych obiektu. **Przedstawione wyniki porównawcze wskazują, że model numeryczny został zbudowany poprawnie i jest w stanie właściwie odwzorować odpowiedź dynamiczną konstrukcji na dowolny model wymuszenia kinematycznego.**

Kolejnym zadaniem cząstkowym, jakie postawił sobie Autor było eksperymentalne wyznaczenie parametrów modelu nierównomiernego wymuszenia kinematycznego w rejonie badanego wiaduktu (rozdział 9 pracy), uwzględniając trzy podstawowe czynniki tej nierównomierności tj. skończoną prędkość rozchodzenia się fali, redukcję amplitudy drgań pomiędzy podporami oraz utratę koherencji fali. Zadania tego dokonał prowadząc pomiary propagacji fal w podłożu pod analizowanym wiaduktem, w punktach pomiarowych zlokalizowanych na podporach, tuż nad poziomem gruntu, wykorzystując do tego celu kontrolowane wymuszenie kinematyczne typu liniowych sweepów o zmiennych zakresach częstotliwości,

generowanych przez wibrosejs. Na tej podstawie została wyznaczona średnia prędkość rozchodzenia się fali, dobrany model redukcji amplitudy wraz z odległością od źródła wstrząsu (model mieszany łączący redukcję geometryczną z absorpcją drgań) oraz model funkcji koherencji wraz z wyznaczeniem wartości parametrów obu modeli charakterystycznych dla analizowanego rejonu.

Również i w tym przypadku na uznanie zasługuje przyjęta przez Autora pracy metodyka pozwalająca na realizację celu częściowego, jak też sposób przeprowadzenia eksperymentów oraz interpretacja uzyskanych wyników. Sprawia to, że przyjęty do symulacji model nierównomiernego wymuszenia kinematycznego we właściwy sposób odwzorowywał charakter zmian obciążenia dynamicznego działającego na poszczególne podpory wiaduktu w czasie wstrząsu sejsmicznego.

W celu przeprowadzenia kompleksowych symulacji numerycznych odpowiedzi dynamicznej wiaduktu dla różnych scenariuszy wymuszenia kinematycznego, do pełnej analizy dynamicznej (THA) Autor przyjął postacie wymuszeń kinematycznych bazujące na rzeczywistych przebiegach czasowych zarejestrowanych w dwóch obszarach o najwyższej intensywności (GZW i LGOM). Na tej podstawie wygenerował sygnały wejściowe odpowiadające wymuszeniu równomiernemu (niezmienione przebiegi czasowe przyspieszeń zarejestrowane podczas reprezentatywnych wstrząsów). Kolejno, bazując na wyznaczonych wcześniej parametrach modelu nierównomiernego wymuszenia kinematycznego, charakteryzujących obszar lokalizacji wiaduktu, przebiegi czasowe dla poszczególnych podpór odpowiadające takiemu wymuszeniu (rozdział 10 pracy).

W przypadku metod przybliżonych, Autor zbudował wzorcowe spektra odpowiedzi bazując na metodzie spektrum odpowiedzi (RSA), która umożliwia przeprowadzenie analizy z uwzględnieniem wyłącznie modelu równomiernego wymuszenia kinematycznego. Następnie, w celu uwzględnienia nierównomiernego wymuszenia kinematycznego zastosowanego w metodzie MSRSA, na tej podstawie zmodyfikował wyjściową funkcję spektrum odpowiedzi uzyskując funkcje spektralne dla poszczególnych podpór wiaduktu uwzględniające utratę koherencji, prędkość fali w podłożu pod budowlą, a także redukcję amplitudy na kolejnych podporach właściwą dla obu obszarów górniczych.

Ta część pracy również nie budzi zastrzeżeń, gdyż przyjęta metodologia z jednej strony pozwoliła na wygenerowanie sygnałów wejściowych charakteryzujących nierównomierne wymuszenie kinematyczne do pełnej analizy dynamicznej, a z drugiej strony adaptację metody MSRSA dla analizowanego obszaru i obiektu również z uwzględnieniem nierównomierności obciążenia.

Tak przygotowane dane wejściowe posłużyły Autorowi do przeprowadzenia serii symulacji numerycznych umożliwiających wielowariantową analizę odpowiedzi dynamicznej wielopodporowego wiaduktu drogowego na wymuszenia parasejsmiczne pochodzenia górniczego, której wyniki zostały przedstawione w rozdziale 11.

Wielowariantowość prowadzonych obliczeń pozwoliła Autorowi zrealizować założone cele pracy oraz udowodnić postawioną tezę. Realizacja ta polegała na wykonaniu serii obliczenia odpowiedzi dynamicznych wiaduktu na wstrząsy górnicze z zastosowaniem trzech wymienionych metod obliczeniowych przyjmując w przypadku pełnej analizy dynamicznej dwa zarejestrowane rzeczywiste przebiegi czasowe wstrząsów górniczych z obszaru GZW oraz LGOM, natomiast w przypadku analizy metodami przybliżonymi (RSA i MSRSA) – krzywe spektralne dla tych



obszarów. Obliczenia te przeprowadzono dla dwóch przyjętych wcześniej modeli wymuszenia kinematycznego: równomiernego i nierównomiernego, zaimplementowanego do warunków obszaru lokalizacji wiaduktu na podstawie przeprowadzonych eksperymentów terenowych. Umożliwiło to Autorowi ocenę wpływu nierównomierności wymuszenia na poziom odpowiedzi dynamicznej obiektu wielopodporowego oraz porównanie wielkości odpowiedzi dynamicznych wiaduktu na wstrząsy górnicze, otrzymanych z zastosowaniem różnych metod obliczeniowych i różnych modeli wymuszenia kinematycznego.

Jako miarę wielkości odpowiedzi dynamicznej wiaduktu na wstrząsy górnicze Autor przyjął naprężenie główne wskazujące poziom wyężenia w wybranych elementach konstrukcji. Zgodnie z deklaracją Autora, przebiegi czasowe naprężeń obliczone zostały w około 200 elementach siatki elementów skończonych zlokalizowanych w różnych elementach konstrukcyjnych wiaduktu, z czego z uwagi na ograniczoną objętość, w pracy zamieszczono dokładne analizy obejmujące jedynie 6 elementów.

Należy tutaj podkreślić olbrzymią ilość pracy jaką włożył Doktorant w trakcie prowadzenia obliczeń, a przede wszystkim interpretacji wyników, które, jak już wcześniej podkreślałem, w przypadku analiz dynamicznych, są czasochłonne i nietrywialne.

Wyniki analiz numerycznych, których podsumowanie zawiera rozdział 12, pozwoliły Autorowi sformułować końcowe wnioski szeroko opisane i przedyskutowane w rozdziale 13. Na tej podstawie Autor sformułował wnioski dowodzące postawionych w pracy tez.

Podsumowując należy stwierdzić, że przyjęte w pracy cele główne to jest weryfikacja możliwości i celowości zastosowania Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi do obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia kinematyczne indukowane działalnością górniczą jak też implementacja wzorcowych krzywych spektralnych, opisanych dla rejonów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) oraz Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) i zmodyfikowanych pod kątem zastosowania Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi, w analizie dynamicznej budowli wielopodporowych uwzględniającej nierównomierność wymuszenia kinematycznego oraz założone cele cząstkowe **zostały przez Doktoranta widzenia w pełni zrealizowane, a wynikające z nich tezy pracy, udowodnione.**

Należy tu pokreślić, że cele te zostały osiągnięte poprzez właściwy balans pomiędzy zaplanowanymi i przeprowadzonymi badaniami eksperymentalnymi a opisem teoretycznym i bazującymi na nim symulacjami numerycznymi, co powinno cechować każdą, dobrą jakościowo, pracę doktorską, szczególnie z dziedziny nauk inżynierjno-technicznych.

Jeśli chodzi o oryginalny wkład pracy Doktoranta, to został on szczegółowo wylistowany w postaci 8 elementów przedstawionych w podrozdziale 13.3. W związku z tym, że generalnie się z nimi zgadzam, co podkreślałem niezależnie w swojej recenzji, stwierdzam, że praca zawiera wiele elementów oryginalnych.



### 3. Uwagi krytyczne

Jak już wcześniej pisałem praca została wykonana bardzo kompleksowo, ujmując w zasadzie wszystkie te elementy, które powinny posłużyć do realizacji postawionych celów i udowodnienia tezy pracy. Czytając ją gruntownie nie znalazłem zasadniczych uchybień zarówno w przedstawieniu tematyki pracy, podejściu teoretycznym, jak też w obszarze szczegółowej realizacji celów, zarówno w warstwie eksperymentalnej jak i prowadzonych analiz numerycznych.

Niemniej jednak pozostaje u mnie niedosyt związany z praktycznie całkowitym pominięciem warunków gruntowych (w tym jego niejednorodności) i opisem wpływu tego czynnika na powstanie nierównomierności wymuszenia kinematycznego. Ośrodek gruntowy, jako podstawowe medium propagacji fali musi odgrywać i odgrywa w tej propagacji znaczącą rolę. Co prawda, Autor stwierdza, że z uwagi na istnienie w podłożu pod wiaduktem mało zróżnicowanych parametrów geotechnicznych (nie wymieniając jakich), zasadnym było pominięcie niejednorodności warunków gruntowych, niemniej jednak wcale nie oznacza to, że sztywność tych gruntów, jak też miąższość poszczególnych warstw pod kolejnymi podporami, były również zbliżone. Mogło to mieć wpływ na nierównomierność wymuszenia kinematycznego, nieuwzględnioną w przyjętym przez Autor modelu. W tym przypadku trochę usprawiedliwia Autora jego deklaracja uwzględnienia tego czynnika w dalszych pracach nad tą tematyką, przedstawiona w podrozdziale 13.4.

Druga uwaga krytyczna, już mniejszego kalibru, dotyczy braku jakiegokolwiek analizy dużej różnicy, w estymowanej i wyznaczonej doświadczalnie, częstotliwości drgań własnych wiaduktu, dla drugiej postaci tych drgań (Tabela 8.6). Różnica ta przekroczyła 30%, podczas gdy w pozostałych 8 przypadkach różnice te nie przekraczały 10% pokazując doskonałą zgodność pomiędzy wartościami pomierzonymi, a obliczonymi modelem numerycznym. Zasadnym byłoby głębsze przeanalizowanie przyczyn tak dużej różnicy w porównaniu z pozostałymi.

### 4. Uwagi natury redakcyjnej, drobne uchybienia

Układ pracy przyjęty przez Autora jest właściwy, choć może trochę razić duża ilość podrozdziałów wydzielających nawet małe fragmenty pracy (razem z rozdziałami głównymi naliczyłem ich 103, na 200 stron pracy!), niemniej jednak w trakcie czytania zbytnio to nie przeszkadza.

Praca jest napisana więcej niż poprawnym pod względem stylistycznym językiem, komunikatywnym, dobrze przekazującym uporządkowane myśli Autora, który sprawnie porusza się w realizowanej tematyce. Co jednak najbardziej kuleje w sferze redakcyjnej, to gramatyka związana ze zdecydowanie nadmiernym używaniem znaku interpunkcyjnego, jakim jest przecinek. Ilość miejsc, gdzie ten znak jest niepotrzebnie wstawiany jest tak duża, że odstąpiłem od ich przytaczania w recenzji, natomiast umieściłem je w tekście. Nie zmienia to wartości merytorycznej pracy, aczkolwiek w dużym stopniu utrudnia jej płynne czytanie.

Poniżej wylistowałem drobne uchybienia językowe oraz braki w pozycjach literatury. Uwagi te, w formie komentarzy, również zamieściłem w tekście pracy.

- Str. 18 – błąd w nazwisku Cuia w Tabeli 2–1. Jest Coia.
- Str. 22 – jest „der Kiureghian”, powinno być „Der Kiureghian”.
- Str. 32 – coherency zamiast koherency.
- Str. 39 – jest Richart, 1970, powinno być Richart i in, 1970 a.

- Str. 39 – jest „Railegha”, a powinno być „Rayleigha”
- Str. 44 – Jankowski 2006 – 2006a, czy 2006b? – wydaje się, że 2006b.
- Str. 50 – jest „ruch” powinno być „ruchu”.
- Str. 51 – jest „schematu”, powinno być „schemat”.
- Str. 52 – jest „postaci” powinno być „postacie”.
- Str. 58 – jest „stopi”, powinno być „stopni”.
- Str. 62 – jest „postacie”, powinno być „postaci”.
- Str. 65 – jest „wiadukt”, powinno być „wiaduktu”.
- Str. 90 – jest „zarejestrowany”, powinno być „zarejestrowanych”.
- Str. 93 – jest „musza” powinno być „muszą”.
- Str. 107 – niepotrzebne „w”.
- Str. 109 – jest „za razem” powinno być „zarazem”.
- Str. 121 – jest „pomiarów” powinno być „pomiar”.
- Str. 174 – jest „w rozdziale 10” powinno być „w rozdziale 11”.
- Str. 147 – niepotrzebny wyraz „aby”.
- Spis literatury: poz. 117 Fourier zamiast fourier.
- Nie ma w spisie literatury pracy Jankowski, 2000.
- Brak w spisie literatury pracy Korzec i Świdziński, 2018 – powołanie na str. 27.
- Błąd w referencji 81 w spisie literatury. Rok podano przed nazwiskiem trzeciego z autorów pracy.

Nie ma odniesienia w tekście pracy do następujących artykułów ujętych w spisie literatury

- Feng Y., Zhou D., Jian X., 2014, Time–history analysis of terminal 2 of the Chengdu Shuangliu airport under multi–support and multi–dimension seismic excitation, 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Frontiers of Earthquake Engineering, Alaska, USA.
- Fontara I., Titirla M., Wuttke F., Athanatopoulou A., Manolis G., Sextos A., 2015, Multiple support excitation of a bridge based on BEM analysis of the subsoil–structure–interaction phenomenon, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece.
- Hindy A., Novak M., 1980, Response of pipelines to random ground motion, Journal of the Engineering Mechanics Division, 106, 339–360.
- Maheri M., Ghaffar–Zadeh H., 2002, Asynchronous and non–uniform support excitation analysis of large structures, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 4, 63–74.
- Mylonakis G., Papastamatiou D., Psycharis J., Mahmoud K., 2001, Simplified modeling of bridge response on soft soil to nonuniform seismic excitation, Journal of Bridge Engineering, November/December, 587–597.

## 5. Wniosek końcowy

Mgr inż. Paweł Boroń przedstawił jako rozprawę doktorską pracę zawierającą oryginalne wyniki i poszerzającą wiedzę na temat wpływu nierównomierności wymuszenia kinematycznego na odpowiedź dynamiczną konstrukcji wielkogabarytowych poddanych obciążeniom parasejsmicznym pochodzenia górniczego. Lektura pracy wskazuje na bardzo dobre predyspozycje Autora w zakresie wykonywania samodzielnych prac naukowych o charakterze zarówno

eksperymentalnym jak i teoretycznym oraz modelowania numerycznego. Wyniki przedstawione w rozprawie są bardzo interesujące zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Na podkreślenie zasługuje szczególnie ten drugi aspekt, gdyż uzyskane przez Doktoranta wyniki wskazują na możliwość popełniania błędów projektowych przy projektowaniu konstrukcji wielkogabarytowych poddanych wymuszeniom dynamicznym indukowanym działalnością górniczą, jak też pozwalają na bezpieczne projektowanie przyszłych tego typu obiektów wykorzystując zaproponowaną i zweryfikowaną przez Autora metodę MSRSA.

Wobec powyższego stwierdzam, że **recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Boronia spełnia w pełni wymogi stawiane pracom doktorskim w myśl Ustawy 595 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami).**

Rozprawa stanowi oryginalną propozycję rozwiązania i rozwinięcia problemu naukowego oraz wykazuje dostateczny poziom wiedzy teoretycznej kandydata w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Tym samym wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Waldemar Świdziński

