

Wpłynęło dnia 21.01.2020
L. dz. 10.5/10.31.2.2020
podpis Dawny

Kraków, dnia 09.01.2020 r.

Prof. dr hab. inż. Roman Kinasz
Katedra Geomechaniki, Budownictwa
i Geotechniki
Wydział Górnictwa i Geoinżynierii
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Pawła Boronia** pod tytułem:
„Analiza odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wstrząsy parasejsmiczne pochodzenia górniczego z zastosowaniem metody wielopodporowego spektrum odpowiedzi”

1. Przedmiot i podstawa opracowania

Niniejsza recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr inż. **Pawła Boronia** pt. **„Analiza odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wstrząsy parasejsmiczne pochodzenia górniczego z zastosowaniem metody wielopodporowego spektrum odpowiedzi”** wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. **Joanny Dulińskiej** oraz promotora pomocniczego dr inż. **Doroty Jasińskiej** z Politechniki Krakowskiej. Podstawą opracowania recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 02.12.2019 r.

2. Podstawowe dane o pracy

Praca składa się z trzynastu rozdziałów zakończonych spisem literatury oraz streszczeniem w języku angielskim. Całość materiału przedstawiono na 198 stronach. Praca zawiera 97 wzorów, 82 rysunki, 21 tabel oraz przyłącza 149 pozycji literatury. Wzory, rysunki oraz tabele numerowane są w ramach rozdziałów.

3. Główne założenia i zakres pracy

Recenzowana praca składa się z dwunastu rozdziałów merytorycznych poprzedzonych Wstępem do pracy (rozdział 1) oraz z podsumowania i wniosków końcowych (rozdział 13), a także uzupełnionych spisem literatury. Praca zilustrowana została licznymi rysunkami oraz tabelami.

Otwierający pracę **Wstęp** (8 stron, 1 rysunek) podzielono na cztery podrozdziały.

Rozdział 1.1 pracy (**Opis i geneza problemu**) stanowi wstęp do tematu badania dynamicznej odpowiedzi pięcioprzęsłowego wiaduktu drogowego na nierównomierne parasejsmiczne wzbudzenie kinematyczne. Wymieniono w nim najważniejsze polskie podstawy prawne oceny wpływu drgań na środowisko i ochrony powierzchni oraz w Dyrektywach UE, a także omówiono genezę podjęcia tematyki.

W **Rozdziale 1.2 (Cele rozprawy doktorskiej)** sformułowano główne cele pracy doktorskiej. Jednym z podstawowych celów to rozeznanie możliwości i celowości zastosowania Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi do obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia

kinematyczne indukowane działalnością górniczą. Ze względu na osiągnięcie założonych celów głównych pracy, sformułowano zadania szczegółowe.

W **Rozdziale 1.3 (Tezy naukowe rozprawy)** sformułowano tezę główną: Zastosowanie w Metodzie Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi zmodyfikowanych funkcji spektralnych, opracowanych dla obszarów aktywności górniczej (GZW, LGOM), może posłużyć do oszacowania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia kinematyczne pochodzenia górniczego.

W **Rozdziale 1.4 (Zakres rozprawy doktorskiej)** podano dwa podstawowe zagadnienia pracy: zarówno teoretyczne podstawy poruszanych problemów, związanych z analizą odpowiedzi dynamicznej obiektów wielopodporowych na wymuszenie kinematyczne, jak i opis przeprowadzonych badań doświadczalnych wraz z analizą uzyskanych wyników. Dodatkowo, w pracy zamieszczono rezultaty symulacji numerycznych obiektów wielopodporowych, dotyczących określania odpowiedzi dynamicznej na nierównomierne wymuszenie kinematyczne pochodzenia górniczego.

Rozdział kończy omówienie struktury pracy.

W **Rozdziale 2 (Przegląd literatury i aktualnego stanu wiedzy w zakresie analizowanej tematyki)** pracy (8 stron, 1 tabela) dokonano przeglądu literaturowego który dotyczył uwzględnienia nierównomiernego wymuszenia kinematycznego w analizach dynamicznych obiektów różnego typu. Przytoczone pozycje, przedstawiały podejście różnych autorów do zagadnienia nierównomiernego wymuszenia kinematycznego. Analizę literaturową, przeprowadzono pod kątem porównania najczęściej stosowanych metod obliczeniowych. Przeanalizowano również, jaki wpływ na osiągane rezultaty mają efekty związane z nierównomiernością wymuszenia.

W **Rozdziale 3 (Charakterystyka wstrząsów górniczych występujących w głównych rejonach sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą w Polsce)** (6 stron, 2 rysunki, 2 tabele) krótko opisano obszary o największej intensywności występowania wstrząsów górniczych w Polsce – obszar GZW oraz LGOM.

W **Rozdziale 4 (Specyfika odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wymuszenia kinematyczne)** (14 stron, 1 rysunek) omówiono najczęściej stosowane modele wymuszenia kinematycznego – model wymuszenia równomiernego i model wymuszenia nierównomiernego. Przytoczono i wyjaśniono najczęstsze przyczyny występowania nierównomierności ruchu podłoża tj. utratę spójności fali, skończoną prędkość rozchodzenia się fali, złożone warunki gruntowe oraz redukcję amplitudy wraz z odległością od źródła drgań. Zaprezentowano również, jaki model wymuszenia kinematycznego przyjęto w pracy oraz opisano sposób uwzględnienia poszczególnych efektów nierównomierności w trakcie analizy.

Ostatnią częścią wprowadzenia teoretycznego są rozdziały 5 i 6, w których przedstawiono metody obliczeniowe, stosowane w analizach dynamicznych oraz omówiono założenia najbardziej popularnych metod obliczania odpowiedzi dynamicznej.

W **Rozdziale 5 (Metody obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli na wymuszenie kinematyczne)** (10 stron, 2 rysunki) przedstawiono zestaw podstawowych wzorów i algorytmów stosowanych w trakcie analizy z wykorzystaniem metody całkowania równań ruchu i Metody Spektrum Odpowiedzi (RSA).

W **Rozdziale 6 (Metoda Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi jako narzędzie do obliczeń odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wymuszenie kinematyczne indukowane aktywnością górniczą)** (6 stron) skupiono się na Metodzie Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi (MSRSA). Zaprezentowano najważniejsze wzory, a także opisano wszystkie parametry metody, niezbędne do prawidłowego zastosowania algorytmu metody w obliczeniach.

Najistotniejszy fragment rozprawy doktorskiej zajmują rezultaty pracy własnej autora (rozdziały 7 – 11), w których przedstawiono m.in. dobór sprzętu do badań, ich przebieg, a także narzędzia numeryczne służące do analizy i interpretacji danych pomiarowych.

W **Rozdziale 7 (Pięcioprzęsłowy wiadukt drogowy przyjęty do analiz doświadczalnych i numerycznych odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wymuszenia kinematyczne)** (12 stron, 10 rysunków, 3 tabele) znajdują się opis wybranego do analizy wiaduktu drogowego wraz z charakterystyką utworzonego modelu numerycznego.

W **Rozdziale 8 (Metodyka badań *in situ* analizowanego wiaduktu drogowego)** (46 stron, 26 rysunków, 6 tabel) przedstawiono program przeprowadzonych przez autora badań doświadczalnych *in situ*, który składał się z dwóch części. W tym rozdziale znajdują się część 1. - program badań wiaduktu drogowego.

W **Rozdziale 9 (Metodyka badań *in situ* wyznaczenia parametrów przyjętego modelu nierównomiernego wymuszenia kinematycznego)** (18 stron, 12 rysunków, 3 tabel3) znajdują się część 2. - program badań zjawiska propagacji fali w gruncie.

Na podstawie zebranych w trakcie badań wiaduktu danych, określono podstawowe charakterystyki dynamiczne badanego obiektu. Dane pomiarowe, wykorzystano również na etapie budowy modelu numerycznego – w procesie weryfikacji modelu. W drugiej części badań doświadczalnych, wyznaczono parametry związane z propagacją fali w gruncie.

Parametry te posłużyły do zdefiniowania modelu nierównomiernego wymuszenia kinematycznego.

W **Rozdziale 10 (Dane o wymuszeniach kinematycznych zastosowanych w analizach odpowiedzi dynamicznej wiaduktu)** (6 stron, 2 rysunki, 2 tabele) omówiono przyjęty model nierównomiernego wymuszenia w analizach odpowiedzi dynamicznej wiaduktu drogowego.

W **Rozdziale 11 (Analiza odpowiedzi dynamicznej wielopodporowego wiaduktu drogowego na wymuszenia parasejsmiczne pochodzenia górniczego)** (26 stron, 13 rysunków, 4 tabele) zaprezentowano analizy numeryczne pięcioprzęsłowego wiaduktu drogowego o długości 160 m, poddanego nierównomiernemu wymuszeniu kinematycznemu pochodzenia górniczego. W trakcie obliczeń, wyznaczona została odpowiedź dynamiczna wiaduktu na reprezentatywne wstrząsy górnicze pochodzące z terenu GZW oraz LGOM. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem metody całkowania równań ruchu, Spektrum Odpowiedzi i Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi. Obliczenia wykonano dla wariantu wymuszenia równomiernego i nierównomiernego. W przypadku modelu

nierównomiernego zastosowano kilka prędkości rozchodzenia się fali. Oprócz prędkości fali, uwzględniona została także funkcja koherencji oraz redukcja amplitud.

W **Rozdziale 12 (Wnioski z przeprowadzonych analiz porównawczych odpowiedzi dynamicznej wiaduktu na wstrząsy górnicze)** (4 strony) zamieszczono wnioski z analiz numerycznych porównawczych odpowiedzi dynamicznej wiaduktu na wstrząsy górnicze.

W **Rozdziale 13 (Podsumowanie i wnioski końcowe)** (6 stron) przedstawiono wnioski końcowe wynikające z przeprowadzonych badań, które stanowią odpowiedzi na postawione tezy rozprawy. Potwierdzona została prawdziwość postawionych tez naukowych, zaprezentowano oryginalne, moim zdaniem, elementy pracy, a także wskazano na dalsze kierunki pracy naukowej autora rozprawy doktorskiej.

Następnie w **Rozdziale 14** przedstawiono **spis literatury** który zawiera 149 pozycji, w tym specjalistyczne opracowania oraz wykorzystane Normy i akty prawne.

4. Uwagi językowe

Praca zawiera stosunkowo niewiele błędów językowych, niezręcznych sformułowań, usterek literowych, itp. Do nielicznych niedociągnięć należy zaliczyć:

- pominięte litery, interpunkcja (str. 9, 13, 161 i inne),
- różne napisanie terminu *in situ* (łac. na miejscu) łaciński zwrot oznaczający w dosłownym tłumaczeniu „w miejscu”: in-situ (str.12, 14 i prawie cała paca aż do rozdz.9).
- na rys. 5.1 układu przemieszczeń, jakich doznaje konstrukcja pod wpływem wymuszenia kinetycznego (str. 46) brak poszczególnych oznaczeń,
- stosowanie małych zamiast dużych liter (str. zaznaczyłem w tekście pracy),
- brak spisu ważniejszych oznaczeń na początku pracy, który ułatwił by czytanie pracy.

Nieliczne zauważone błędy stylistyczne i redakcyjne oraz w tytułach tabel i rysunków, a także w opisie rysunków zaznaczyłem w tekście pracy.

5. Uwagi szczegółowe

1. W przeglądzie literatury i aktualnego stanu wiedzy w zakresie analizowanej tematyki (rozdział 2) dokonano selektywnego wyboru prac o tematyce wyznaczenia odpowiedzi dynamicznej budowli na wymuszenie kinematyczne w postaci ruchu podłoża. Brakuje jednak bardziej szczegółowego omówienia niektórych prac takich jak: Ustawy i Normy obowiązujące w Polsce, a także w innych krajach oraz rozprawy doktorskie, niektóre pozycje literatury naukowej oraz fachowej.

Mimo tych uwag wybór zaprezentowanych prac należy ocenić jako właściwy, reprezentatywny i wystarczający.

2. Rozdział 3 (Charakterystyka wstrząsów górniczych występujących w głównych rejonach sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą w Polsce), który powstał na podstawie analizy wykonanych dotychczasowych badań innych naukowców, moim zdaniem, można było by połączyć z rozdziałem 2.

3. W Rozdziale 4 (Specyfika odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wymuszenia kinematyczne) podano również zebrane i przeanalizowane przez autora pracy szczególnie wartościowe, niezbędne do komputerowego modelowania najczęściej stosowane modele wymuszenia kinematycznego. Podrozdziały 4.1 i 4.2 zostały poświęcone analizie nierównomierności wymuszenia kinematycznego i przyczyn jej wystąpienia oraz modeli wymuszenia kinematycznego przyjmowane w analizach odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych poddanych wstrząsom podłoża. Te podrozdziały jak i rozdział 3 (Charakterystyka wstrząsów górniczych występujących w głównych rejonach sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą w Polsce) można byłoby podać w rozdziale 2 jako Przegląd literatury i aktualnego stanu wiedzy w zakresie analizowanej tematyki. Dopiero w podrozdziale 4.3 (Przyjęty w analizach własnych model wymuszenia kinematycznego) krótko opisano (na 2. stronach) dwa modele równomiernego i nierównomiernego wymuszenia kinematycznego w przeprowadzonych przez autora pracy analizach dotyczących obliczania odpowiedzi dynamicznej konstrukcji na wymuszenie wstrząsami parasejsmicznymi pochodzenia górniczego.
4. Rozdziały 5 i 6 dotyczących metod obliczeniowych, stosowanych w analizach dynamicznych, w których omówione zostały założenia najbardziej popularnych metod obliczania odpowiedzi dynamicznej, moim zdaniem, również można połączyć.
5. Należałoby wyjaśnić przyjęte oznaczenia we wzorach:
- s.35 wzór (4.9a i 4.9b) przyjęto oznaczenie Φ_i – kąt fazowy;
 - s.50 wzór (5.9) przyjęto oznaczenie Φ – macierz postaci drgań własnych;
 - s.51 wzór (5.11) Φ^T – brak opisanie, przy okazji co oznacza M , R oraz K i C we wzorach (5.1) - (5.7), a także C_{ss} i K_{ss} ;
 - s. 52 wzór (5.13) przyjęto oznaczenie Φ_i .
6. W rozdziale 7 na rys. 7.6 (str.67) na przekroju poprzecznym przęsła analizowanego wiaduktu źle podano wymiary szerokości przekroju: ogólny wymiar – 118,4cm, dwa powyżej 1184 i 1164 cm, czyli różnica wynosi 20 cm. Który z tych wymiarów jest poprawny?
7. Ustrój konstrukcyjny pomostu wspiera się na poszczególnych podporach za pomocą łożysk garbkowych (por. rys. 7.7). Łożyska garbkowe wykonano w postaci poduszki elastomerowej umieszczonej w cylindrycznej stalowej obudowie. Obudowę łożyska zwieńczono blachą ślizgową. Dzięki swojej budowie łożyska garbkowe, umożliwiają swobodny obrót wokół dowolnej osi, a także pozwalają na przesuw poziomy w określonym kierunku. Dalej Autor zaznacza: „Ze względu na ekonomikę i efektywność obliczeń, w modelu pominięte zostały elementy o dużej sztywności (stopy i płyty fundamentowe, przyczółki), które nie wpływają na charakterystyki dynamiczne obiektu ani na jego odpowiedź dynamiczną. Pominięty został również wpływ sprężystości podłoża oraz interakcja obiektu z podłożem. Warunki brzegowe

- zastosowane na każdej podporze reprezentują sztywne podparcie”. Jaki ma wpływ przyjęte uproszczenia modelu na wyniki końcowe obliczeń?
8. W podrozdziale 8.5 na str.81 pracy (Zastosowane źródło drgań) podano, że „... wzbudzenie drgań wiaduktu zrealizowano przy użyciu trzech różnych źródeł. Podczas badań, posłużono się: 1 - wymuszeniem generowanym za pomocą generatora drgań, 2 - wymuszeniem pochodzącym od typowej eksploatacji wiaduktu (ruchu pojazdów po wiadukcie), a także 3 - wymuszeniem powstającym na skutek synchronicznych podskoków grupy ludzi na prześle środkowym ...”. Wg jakiej procedury czy Normy przyjęto program badania dla 2. i 3. rodzaju wymuszenia?
 9. Dla podpisu rys.8.26 (str.117) Współczynnik MAC (*Modal Assurance Criterion*) dla pionowych (a) i poziomych (b) postaci drgań własnych uzyskanych doświadczalnie i numerycznie. **Nie podano gdzie są doświadczalnie a gdzie uzyskane numerycznie**. Co prawda niżej w tabeli 8.6 podano porównanie częstotliwości drgań własnych uzyskanych doświadczalnie i obliczonych numerycznie.
 10. Należałoby podać schemat modelu nierównomiernego wymuszenia kinetycznego, który uwzględnia efekty związane z nierównomiernością ruchu podłoża tj. skończona prędkość fali, redukcja amplitudy drgań wraz z odległością od ich źródła, zmienne warunki gruntowe, a także utrata spójności fali.
 11. Wg analizy wyników wpływu uwzględnienia nierównomierności wymuszenia na poziom odpowiedzi dynamicznej wyznaczonej metodą RSA oraz MSRSA w przęsłach konstrukcji (tab. 11.3 s.167) różnica pomiędzy naprężeniami wynosi od -4,7 do -38,1%, a w strefach podporowych różnica wynosi od +25 do +42% (tab. 11.4 s.172). Czyli maksymalnie dla elementów w przęsłach różnica wynosi -38%, a dla elementów podporowych - +42%. Jaka przyczyna takiego odchylenia wyników uzyskanych przy obliczeniach metodami RSA i MSRSA?
 12. Do przeprowadzonej analizy wyników obliczeń odpowiedzi dynamicznej wielopodporowego wiaduktu drogowego na wymuszenia parasejsmiczne pochodzenia górniczego uzyskanych przy obliczeniach metodami RSA i MSRSA można dodać do porównania wyniki dokładnej analizy THA (analiza jakościowa i ilościowa w rozdz. 11).
 13. Na końcu pracy przedstawiono spis literatury polskiej i zagranicznej oraz norm i przepisów. Cytowana w pracy literatura mogłaby, moim zdaniem, być rozszerzona o doświadczenia badaczy krajowych oraz ze wschodniej Europy (np., DBN Ukrainy oraz SNiP w Rosji), a także inne kraje. Na przykład:
 - Normy: PN-EN 1990:2004/A1:2005 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji; PN-EN 1991-1-1:2002 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje, Część 1-1: Obciążenia ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach; PN-EN 1991-2: 2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje, Część 2: Obciążenia ruchome mostów; PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, PN-85/S-10030 „Obiekty mostowe. Obciążenia”.
 - Akty prawne: § 328.1. Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz

specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz. U. Nr 139, poz. 1169): W zakładzie górniczym wybierającym złożę (pokład) lub jego części zagrożone tąpnięciami projektuje się i prowadzi roboty górnicze w sposób ograniczający powstawanie nadmiernej koncentracji naprężeń w górotworze..

- Literatura fachowa: Instrukcja ITB, Instrukcja nr 325. Projektowanie budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej podlegających wpływom wstrząsów górniczych. Warszawa 1993 r., Instrukcja nr 364/2000. Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. Warszawa 2000r., Instrukcja nr 391/2003. Projektowanie budynków podlegających wpływom wstrząsów górniczych. Warszawa 2003, Instrukcja nr 416/2006. Projektowanie budynków na terenach górniczych. Warszawa 2006.
- Literatura naukowa:
 - Jankowiak I., Siekierski W. Obciążenia stałe i obciążenia taborem na mostach drogowych wg PN-EN. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej / Politechnika Poznańska, Nr 8, 2010
 - Opracowanie metody określania wpływu wstrząsów (tąpnięć) w górotworze na stan naprężeniowo-odkształceniowy wyrobisk korytarzowych wraz z kryterium dynamicznej utraty ich stateczności : praca zbiorowa / pod red. Mirosława Chudka. Gliwice : Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007
 - Maciąg E., Interakcja układu budynek - podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym, Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Vol. 17, No 4, 1979.
 - Вовк О. А., Шевчук Н. А., Ткачук К. Н. Некоторые вопросы сейсмобезопасности подземных и поверхностных сооружений при внезапных динамических проявлениях // Вісник НТУУ «КПІ». Гірництво: збірник наукових праць. – 2014. – Вип. 24. – С. 11–19.
- Rozprawy doktorskie: - Szafrąński M. Oddziaływania taboru na mosty kolejowe przy zmiennych parametrach ruchu. Gdańsk 2013,
 - Mrozek D. Nieliniowa analiza numeryczna dynamicznej odpowiedzi uszkodzonych budynków. Gliwice 2010r. i inne.
- 14. Bardzo cennym, moim zdaniem, byłoby podanie w pracy rozdziału „Rekomendacji dla diagnostyki i projektowania konstrukcji budowli wielopodporowych (wiaduktów wieloprzęsłowych) na terenach objętych eksploatacją górnictwem”.

6. Ocena pracy

1) Układ pracy oraz strona redakcyjna są, ogólnie rzecz biorąc, poprawne. Doktorant formułuje cel i zakres swojej pracy na tle aktualnego stanu wiedzy, podaje metodykę badań, podaje i opisuje dokumentalnie wyniki swoich badań, oraz przeprowadza ich analizę. Pewnym mankamentem redakcyjnym pracy, moim zdaniem, jest to, że objętość poszczególnych rozdziałów pracy nie jest jednakowa: rozdział 1 i 2 – 8 stron, reszta rozdziałów (rozdział 3 – 6 stron, rozdział 4 – 14 stron, rozdział 5 – 10

stron, rozdział 6 – 6 stron, rozdział 7 – 12 stron, rozdział 8 – 46 stron, rozdział 9 – 18 stron, rozdział 10 – 12 stron, rozdział 11 – 26 stron, rozdział 12 – 4 strony, rozdział 13 – 6 stron). Niektóre, moim zdaniem, można było by połączyć.

2) Rozprawa doktorska obejmuje zarówno teoretyczne podstawy poruszanych problemów, związanych z analizą odpowiedzi dynamicznej obiektów wielopodporowych na wymuszenie kinematyczne, jak i opis przeprowadzonych badań doświadczalnych wraz z analizą uzyskanych wyników. Dodatkowo, w pracy zamieszczono rezultaty symulacji numerycznych obiektów wielopodporowych, dotyczących określania odpowiedzi dynamicznej na nierównomierne wymuszenie kinematyczne pochodzenia górniczego.

3) W zakresie merytorycznym w pracy przeprowadzono badania dynamicznej odpowiedzi pięcioprzęsłowego wiaduktu drogowego na nierównomierne parasejsmiczne wymuszenie kinematyczne. Badania obejmowały badania *in situ* analizowanego wiaduktu i analizę numeryczną. Przeprowadzone badania *in situ* miały na celu wykazanie możliwości i celowości zastosowania Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi (MSRSA) do obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia kinematyczne indukowane działalnością górniczą.

4) Potwierdzono możliwość zastosowania wzorcowych funkcji spektrum odpowiedzi opisanych dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) i Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) w algorytmie metody MSRSA. Eksperymenty pozwoliły określić właściwości dynamiczne obiektu, takie jak częstotliwości drgań własnych wiaduktu drogowego, postaci drgań własnych, parametry tłumienia, które wykorzystano do walidacji modelu numerycznego. Pomiar *in situ* zostały również wdrożone w celu określenia charakterystyki nierównomiernego modelu ruchu gruntu (prędkość przejścia fali w podłożu pod budowlą, parametry funkcji koherencji i poziom redukcji amplitudy drgań).

5) W numerycznej analizie metodą elementów skończonych dynamicznej odpowiedzi wiaduktu na wstrząs górniczy uwzględniono modele wymuszenia kinematycznego jednorodnego i nierównomiernego. Obliczenia odpowiedzi dynamicznej wiaduktu na wymuszenie górnicze przeprowadzono przy użyciu trzech różnych metod obliczeniowych: pełnej analizy dynamicznej, z wykorzystaniem metody całkowania równań ruchu (THA), klasycznej metody spektrum odpowiedzi (RSA) i metody wielopodporowego spektrum odpowiedzi (MSRSA). W przypadku pełnej analizy dynamicznej wzbudzenia kinematyczne reprezentowane były przez przyspieszenia podpór pobrane z rzeczywistego zarejestrowanego wstrząsu górniczego. Nierównomierny model wymuszenia dodatkowo uwzględniał główne skutki nierównomierności ruchu gruntu: efekt przejścia fali, efekt niespójności i efekt tłumienia. Wymuszenie kinematyczne stosowane w metodach RSA i MSRSA w oparciu o wzorcowe funkcje spektrum odpowiedzi z GZW i LGOM. Wzorcowe funkcje spektrum odpowiedzi w metodzie MSRSA zostały dodatkowo zmodyfikowane przez wdrożenie wspomnianych wcześniej efektów niejednorodności.

6) Wyniki analiz numerycznych potwierdziły, że Metodę Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi można zastosować do obliczenia dynamicznej odpowiedzi konstrukcji wielopodporowych na nierównomierne wymuszenie górnicze. Ponadto wyniki wskazują, że niejednorodne efekty miały znaczący wpływ na poziom odpowiedzi dynamicznej. Parametry nierównomiernego wymuszenia, takie jak prędkość fali lub

funkcja koherencji, miały znaczący wpływ na rozwiązanie i powinny być ustalane na podstawie lokalnych warunków gruntowych. Porównanie wyników z pełnej analizy dynamicznej, metody spektrum odpowiedzi i metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi pokazuje, że RSA poprawnie szacuje rozwiązanie tylko w przypadku modelu równomiernego wymuszenia i może prowadzić do niedoszacowania rozwiązania w przypadku nierównomiernego wymuszenia.

7) Metoda MSRSA pozwoliła na bardziej dokładne (zachowawcze w porównaniu z rozwiązaniem THA) oszacowanie maksymalnego poziomu odpowiedzi dynamicznej konstrukcji, gdy uwzględniono efekty niejednorodności. Zatem, w przeciwieństwie do RSA, metodę MSRSA można zastosować do oszacowania odpowiedzi dynamicznej konstrukcji wielopodporowych poddanych nierównomiernemu wymuszeniu wstrząsów górniczych.

8) Rezultatem przedstawionej pracy jest przeprowadzenie analizy porównawczej odpowiedzi dynamicznych budowli wielopodporowej, wyznaczonych za pomocą różnych metod obliczeniowych (THA, RSA oraz MSRSA), mającej na celu określenie możliwości stosowania tych metod w analizie odpowiedzi na nierównomierne wymuszenie górnicze. Przeprowadzona została także weryfikacja doświadczalna trójwymiarowego modelu numerycznego wybranego do analizy wiaduktu drogowego.

9) Założone w pracy cele zostały osiągnięte poprzez szczegółowe zestawienie również wartościowych, niezbędnych do opracowania modeli komputerowych, danych wejściowych oraz szczegółowe omówienie stosowanych w pracy doktorskiej programów komputerowych.

10) Wysoko oceniam naukowy i praktyczny walor badań eksperymentalnych opisanych w rozdziałach 7–11, w których przedstawiono m.in. dobór sprzętu do badań, ich przebieg, a także narzędzia numeryczne służące do analizy oraz interpretacji danych pomiarowych.

11) Przedstawiony w pracy przegląd aktualnego stanu wiedzy a zwłaszcza jego analiza potwierdzają naukowe kwalifikacje Doktoranta.

Rozprawa doktorska potwierdza szeroką wiedzę Doktoranta w zakresie obliczania odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenia kinematyczne indukowane działalnością górniczą z wykorzystaniem zaawansowanej Metody Wielopodporowego Spektrum Odpowiedzi.

7. Pytania recenzenta do Doktoranta z prośbą o merytoryczne ustosunkowanie się do nich podczas obrony pracy doktorskiej

W związku z przywołanymi wcześniej uwagami recenzent będzie wdzięczny za ustosunkowanie się Doktoranta podczas obrony do następujących pytań szczegółowych:

1. Jakie projektowe spektrum odpowiedzi przyjęto w analizie dla terenów GZW i LGOM i czy są one zgodne z podejściem stosowanym w EC 8?
2. Szczegółowo wyjaśnić na czym polega przyjęty na rys. 5.1 (s.46 pracy) układ przemieszczeń jakich doznaje konstrukcja pod wpływem wymuszenia kinematycznego.

3. Czy zdaniem Autora można wykorzystać do analizy numerycznej wiaduktu program ABAQUS oparty na MES oraz czy możliwe jest podejście probabilistyczne uwzględniające wszystkie spośród omawiane wyżej efekty nierównomierności: efekty związane z nierównomiernością ruchu podłoża tj. skończona prędkość fali, redukcja amplitudy drgań wraz z odległością od ich źródła, zmienne warunki gruntowe, a także utrata spójności fali?

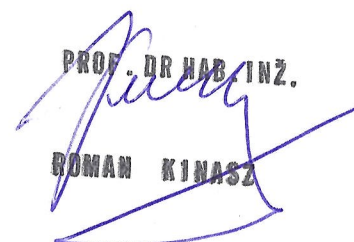
8. Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Boronia stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego. Praca wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie „budownictwo” i ma również duże znaczenie praktyczne oraz dydaktyczne. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki i umiejętnością przeprowadzania analiz naukowych. Doktorant wskazał również kierunki dalszych badań, co świadczy o Jego odpowiednim przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uważam, że główny cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty, a teza pracy obroniona. Uwagi krytyczne wymienione w punktach 4 i 5 nie obniżają bardzo dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej bardzo wysokiej oceny dysertacji. Pomimo tych uwag rozprawa jest bardzo interesująca z naukowego punktu widzenia i posiada wysoką wartość naukową oraz praktyczną. Mam nadzieję, że przedstawione przez mnie uwagi krytyczne choć w części będą pomocne Autorowi w prowadzeniu dalszych badań naukowych i w przygotowywaniu artykułów do czasopism naukowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Pawła Boronia pt. „Analiza odpowiedzi dynamicznej budowli wielopodporowych na wstrząsy parasejsmiczne pochodzenia górniczego z zastosowaniem metody wielopodporowego spektrum odpowiedzi” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U. Nr 65, poz. 595, wraz z późniejszymi zmianami).

W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

PROF. DR HAB. INŻ.

ROMAN KINASZ