

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Bydgoszcz, 23.06.2014

Adresat recenzji:

Rada Wydziału Budownictwa i Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Aleja Piastów 50, 70-311 Szczecin

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Małgorzaty Jarosińskiej**
pt. *„Detekcja uszkodzeń stalowo-betonowych belek zespolonych metodami
analizy modalnej”*

1. Podstawa formalna

Niniejszą Recenzję sporządzono na wniosek Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 14.05.2014 roku, pismo WBiA-A/126/2013/14 z dnia 16.05.2014 roku.

2. Podstawa prawna

- a. Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595), zwana dalej Ustawą.
- b. Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodach doktorskich i habilitacyjnych (Dz. U. Nr 15, poz. 128), zwanej dalej rozporządzeniem.

3. Sentencja recenzji

W opinii recenzenta przedłożona praca pt. „*Detekcja uszkodzeń stalowo-betonowych belek zespolonych metodami analizy modalnej*”, dalej zwana rozprawą, autorstwa mgr inż. Małgorzaty Jarosińskiej zwanej dalej doktorantką, spełnia warunki określone w art. 13 Ustawy i może zostać uznana za rozprawę doktorską w rozumieniu tej Ustawy. Dlatego recenzent wnosi o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Szczegółowe uzasadnienie powyższej opinii zawarte zostało w pkt. 4.2 niniejszej recenzji. Uzasadnienie wniosku końcowego przedstawia się w pkt. 5 recenzji.

4. Ocena rozprawy

4.1. Zawartość rozprawy

Rozprawa została przedłożona w formie zwięzłego, jednostronnego skryptu. Całość zawartości skryptu zamieszczona została na 125 stronach.

Treść zasadnicza rozprawy podzielona jest na 7 rozdziałów, a zamyka ją literatura (125 pozycji). Na treść rozprawy składają się ponadto wplecione w tekst wykresy, tablice, ilustracje i fotografie.

4.2. Ocena merytoryczna rozprawy

1. Przedmiotem rozprawy są stalowo-betonowe belki zespolone, a w szczególności wykrycie i lokalizacja uszkodzeń (detekcja) tych belek przy zastosowaniu analizy modalnej. Metoda ta jest podstawą do diagnostyki uszkodzeń (detekcji). W rozprawie dokonano analizy metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń belek na podstawie wyników symulacji numerycznych i badań doświadczalnych. Oceniono kilka metod niskoczęstotliwościowych do oceny stanu technicznego konstrukcji. Analizowano takie parametry jak: częstotliwość drgań własnych, współczynnik tłumienia modalnego, postacie (formy) drgań i tzw. współczynnik transferu energii.
2. Doktorantka po krótkim wprowadzeniu dokonała analizy stanu wiedzy, przeprowadziła badania, symulacje numeryczne itp. w celu wykazania prawidłowości postawionej tezy badawczej.
3. Celem pracy jest ocena skuteczności wybranych metod analizy modalnej do detekcji uszkodzeń stalowo-betonowych belek zespolonych.

Komentarz

Celem pracy powinno być raczej znalezienie efektywnej metody do detekcji lokalizacji uszkodzeń konstrukcji betonowych (tutaj: zespolonych belek stalowo-betonowych).

4. Tezę pracy sformułowano następująco:

„Ocena zmian parametrów modalnych może być skutecznym narzędziem detekcji i lokalizacji uszkodzeń stalowo-betonowych belek zespolonych. Efektywność pojedynczej metody diagnozowania uszkodzeń może być jednak zależna od czynników zewnętrznych oraz od stosowanej aparatury pomiarowej. Najlepszym sposobem wykrycia oraz precyzyjnego określenia miejsca uszkodzenia jest zastosowanie kilku metod jednocześnie. Dysponowanie zarówno wynikami badań doświadczalnych jak i modelem matematycznym może być efektywnym narzędziem lokalizacji uszkodzeń.”

Komentarz

Teza jest niejednoznaczna, gdyż po postawieniu tezy dokonano komentarza podając jakby nową tezę (podtezę): *„Dysponowanie zarówno wynikami badań doświadczalnych jak i modelem matematycznym może być efektywnym narzędziem lokalizacji uszkodzeń.”* Ta podteza jest oczywista i można ją przyjąć bez jakiegokolwiek dowodu.

5. Pierwszy rozdział pt. „Wprowadzenie” składa się z wstępu, opisu podstawowych parametrów modalnych (częstotliwości drgań własnych, postaci drgań własnych, wpływu warunków zewnętrznych na parametry modalne), filtracji modalnej i współczynnika transferu energii. Rozdział kończy się podsumowaniem.

Komentarz

Wyspecyfikowano parametry mogące służyć do analizy uszkodzeń konstrukcji. Brakuje natomiast przyjętej w pracy definicji terminu „detekcja”, metod diagnostyki, zwłaszcza metod nieniszczących, co podaje się w podsumowaniu. Nic nie wiadomo o faktycznych uszkodzeniach konstrukcji zespolonych belek stalowo-betonowych. Ważne jest jednak to, że w pracy dokonano specyfikacji parametrów modalnych, ich charakterystyki i obiektywności w kontekście poszukiwania uszkodzeń (str. 18÷20).

6. Drugi rozdział pt. „*Analiza modalna w zastosowaniu do diagnostyki uszkodzeń*” zawiera:

- opis praktycznego znaczenia analizy modalnej z podaniem rodzajów tej analizy
- krótki opis tłumienia (zadaniem recenzenta zbyt krótki i mało dokładny, nic nie wiadomo o jednostkach współczynników β i γ oraz sposobach ich pozyskiwania)
- analizę drgań swobodnych prowadzącą do wyznaczenia częstości drgań własnych ω_i i wektorów własnych, wprowadzono też bezwymiarowy współczynnik tłumienia modalnego ξ_i (uwaga recenzenta jest taka, że nie podano zależności ξ_i od wcześniej przyjętych współczynników β i γ)
- zdefiniowane współczynniki zgodności postaci drgań (brakuje komentarza do podanego wzoru, odniesienia do literatury)
- zdefiniowano krzywiznę postaci drgań (brakuje założeń odnośnie do słuszności zależności 2.21, wzór 2.22 to w istocie II. różnica skończona słuszna dla odpowiednio małego h , wzór 2.23 nie jest odpowiednio skomentowany)
- zdefiniowano współczynnik transferu energii z dokładną analizą i komentarzem

Rozdział kończy się podsumowaniem.

7. Trzeci rozdział pt. „*Badania doświadczalne*” zawiera:

- Przedstawiono dokładny opis obiektu badań, tj. dwie stalowo-betonowe belki zespolone. Belki różnią się rodzajem zespolenia.
- Potem zaprezentowano metodykę badań. W szczególności dokładnie opisano stanowisko doświadczalne z podaniem rozmieszczenia punktów pomiarowych (52 punkty pomiarowe). Wymuszenie drgań realizowano specjalnym młotkiem modalnym z przetwornikiem siły a odpowiedź układu (przyspieszenia w trzech kierunkach) rejestrowano za pomocą piezoelektrycznych czujników przyspieszeń. Do pomiaru sygnałów wykorzystano wielokanałowy analizator połączony ze stacją roboczą wyposażoną w odpowiednie oprogramowanie. Wymuszono drgania giętne belki i drgania osiowe. Do dalszych analiz przyjmowano wartości uśred-

nione (generowane automatycznie) a poprawność wykonanego eksperymentu weryfikowano poprzez analizę widma sygnału wymuszenia i funkcji koherencji sygnału wejściowego i wyjściowego. Na podstawie takiego doświadczenia otrzymano widmową (częstotliwościową) funkcje przejścia dla każdego punktu pomiarowego. Do wyznaczenia parametrów modelu modalnego wykorzystano algorytm Polymax zawarty w zastosowanym oprogramowaniu.

- Wreszcie podano wyniki badań belek bez uszkodzeń, tj. pięć pierwszych częstości drgań własnych i współczynniki drgań poszczególnych form (drgania giętne). Wyznaczono też częstość podstawową drgań osiowych.
- Rozdział kończy się krótkim podsumowaniem. Nie podjęto próby oceny dokładności otrzymanych wyników.

8. Czwarty rozdział pt. „*Modele matematyczne belek*” zawiera:

- Do analizy wybrano Metodę Szytywnych Elementów Skończonych (SES), stąd na wstępie przedstawiono podstawy tej metody.
- Następnie przedstawiono modele SES rozpatrywanych belek zespolonych. Tak płytę betonową, jak i belkę stalową potraktowano według teorii belek. Zaproponowano system łączenia sztywnych elementów skończonych (SES) za pomocą elementów sprężysto-tłumiących (EST). Zaproponowano też model zespolenia w rozpatrywanych obu belkach.
- Potem podano formuły ustalania współczynników macierzy bezwładności i sztywności.
- Przy opisie własności tłumiących słusznie wspomina się o tarcu wewnętrznych, tłumieniu zewnętrznym (warunki zewnętrzne) i tarcu konstrukcyjnym (jest to inaczej ujęte niż to przedstawiono wcześniej na str. 23, 24). Wzory (4.11) i (4.12) wymagają odpowiedniego komentarza.
- Kolejnym elementem tego rozdziału jest identyfikacja parametrów modelu, tj. podano procedurę identyfikacji parametrycznej (odnoszącej się do sztywności i właściwości tłumiących).
- Potem przeprowadzono obliczenia numeryczne i zestawiono wyniki dla belek bez uszkodzeń.

- Ostatecznie dokonano porównania wyników z badań doświadczalnych i wyników z analiz numerycznych. Błąd nie przekroczył 1% w przypadku częstotliwości drgań giętnych. Stwierdzono dużą zgodność osiągniętych rezultatów.
9. Piąty rozdział pt. „*Symulacja uszkodzeń*” zawiera:
- Opisano symulowane, faktyczne uszkodzenia belek (dokładnie to opisano i zilustrowano).
 - Przedstawiono wpływ faktycznych uszkodzeń na częstotliwości drgań własnych i współczynnik tłumienia modalnego. W tym celu dokonano pomiarów w ramach zaprogramowanego eksperymentu doświadczalnego oraz na podstawie obliczeń numerycznych.
 - Przedstawiono wyniki pomiarów wynikających z doświadczenia i z symulacji numerycznych, ale nie dokonano w tym rozdziale analizy wyników.
10. Szósty rozdział pt. „*Diagnostyka uszkodzeń belek zespolonych*” zawiera:
- Wpierw podano słusznie, że diagnostyka uszkodzeń polega na detekcji, lokalizacji, identyfikacji uszkodzenia oraz prognozowaniu bezpiecznego czasu użytkowania konstrukcji. Przedstawiono też pewien komentarz, dyspozycje odnoszące się do przeprowadzonej dalej analizy.
 - Następnie przedstawiono częstotliwość drgań własnych i współczynnik tłumienia, współczynnik zgodności drgań (kształtu postaci drgań), globalny współczynnik transferu energii. Otrzymano wysoką zgodność zmian częstotliwości drgań własnych, w przypadku współczynnika tłumienia takiego podobieństwa nie uzyskano (tendencja wzrostu współczynnika tłumienia wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia), w przypadku współczynnika zgodności postaci drgań nie zauważono dużej wrażliwości na wprowadzone uszkodzenia, a w przypadku globalnego współczynnika transferu energii zauważono większą wrażliwość na wprowadzone zmiany niż w przypadku analizy zmian częstotliwości.

- Kolejnym elementem jest lokalizacja uszkodzeń. W związku z tym analizowano współczynnik zgodności postaci drgań, co pozwoliło skutecznie zlokalizować uszkodzenia. Potem analizie poddano krzywiznę postaci drgań. Wyniki tej analizy wykazują na stosunkowo małą efektywność współczynnika CDF, zaproponowano więc zwiększenie liczby czujników (chodzi o zwiększenie gęstości siatki pomiarowej). Wreszcie analizowano współczynnik transferu energii, z czego wynikała stosunkowo duża wrażliwość na uszkodzenia.
 - Rozdział kończy się syntetycznym podsumowaniem. Podano, że:
 - częstotliwość drgań własnych analizowanych belek obniżała się wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia
 - współczynnik tłumienia modalnego wzrasta wraz ze wzrostem uszkodzeń zwłaszcza dotyczyło to zespolenia płyty z belką
 - najbardziej wrażliwym na uszkodzenia okazał się współczynnik transferu energii
 - wśród technik lokalizujących uszkodzenie, efektywny okazał się współczynnik analizujący zgodność postaci drgań PMAC
 - analizowano także praktyczną przydatność analizy dotyczącej krzywizny postaci drgań i transferu energii
11. W rozdziale siódmym pt. „*Wnioski końcowe oraz kierunki dalszych prac*” odniesiono się do następującej problematyki:
- Odniesiono się do celu pracy podając, że największą wrażliwość na uszkodzenia wykazał współczynnik transferu energii.
 - Jeżeli chodzi o lokalizację uszkodzeń największą wrażliwość wykazano w przypadku stosowania współczynnika transferu energii.
 - Lokalizację uszkodzenia zespolenia belki z płytą najlepiej wykazał współczynnik zgodności drgań PMAC.
 - Ostatecznie sformułowano postulaty odnoszące się do dalszych dociekań naukowych.

Komentarz

Nie odniesiono się w sposób jawny do tezy naukowej pracy.

4.3. Uwagi recenzenta

4.3.1. Uwagi o charakterze polemicznym

1. Cel i teza pracy nie są jednoznacznie postawione. Wnioski końcowe też nie są dostatecznie dobrze odniesione do tych elementów (tj. celu i tezy).
2. Brakuje specyfikacji i opisu metod diagnostyki konstrukcji budowlanych, zwłaszcza z użyciem metod nieniszczących (o czym jest mowa w podsumowaniu rozdziału pierwszego).
3. Brakuje jakichkolwiek danych o najczęstszych uszkodzeniach rzeczywistych konstrukcji stalowo-betonowych belek zespolonych.
4. Opis tłumienia drgań zawarty w rozdziale drugim jest mało staranny i w zasadzie nie koresponduje z współczynnikiem tłumienia modalnego, który stosuje się w faktycznej analizie uszkodzeń.
5. W rozdziale drugim zdefiniowano współczynnik zgodności postaci drgań i miarę odnoszącą się do analizy krzywizny postaci drgań, ale nie podano założeń odnoszących się do słuszności podanych wzorów itp.
6. Brakuje wyspecyfikowania elementów oryginalnych z odpowiednim uzasadnieniem.
7. Warto pokusić się o próbę przeniesienia tego typu diagnostyki wprost na rzeczywiste obiekty budowlane. Brakuje w pracy danych na ten temat.

4.3.2. Uwagi redakcyjne

1. Pod względem redakcyjnym praca napisana jest bardzo dobrze. Recenzent nie wnosi w tym zakresie uwag.
2. W niektórych, nielicznych przypadkach brakuje odsyłaczy, stąd nie wiadomo, czy podane rozstrzygnięcie jest oryginalne, czy zapożyczone, np. wzór (2.20) na str. 27.
3. Zestawienie bibliografii jest niejednorodne, gdyż wymieszono poważne publikacje naukowe powszechnie dostępne (np. pozycja [20]) z referatami na konferencjach lub sympozjach naukowych (np. pozycja [1], [12]) (ciekawe, gdzie te materiały opublikowano, gdzie tych referatów szukać?), rękopisami (np. pozycie [2], [47], [114], [125]).

5. Uzasadnienie wniosku końcowego recenzji

W uzasadnieniu Sentencji recenzji zawartej w pkt. 3 podaje się następujące istotne elementy:

1. Część merytoryczna pracy opracowana jest bardzo dobrze i logicznie zestawiona, ponieważ zawartość i układ rozprawy są następujące:
 - część teoretyczna z wprowadzeniem i przeglądem literatury kończąca się podsumowaniem
 - podstawy teoretyczne analizy modalnej ze zdefiniowaniem parametrów modalnych, które dalej wykorzystuje się w pracy; całość kończy się podsumowaniem
 - badania doświadczalne zawierające opis obiektu badań, metodykę badań, przeprowadzone badania; wszystko kończy się podsumowaniem
 - opracowanie modelu obliczeniowego belek z wykorzystaniem sztywnych elementów skończonych, przeprowadzenie obliczeń z identyfikacją parametrów modalnych, porównanie wyników badań doświadczalnych z wynikami obliczeń numerycznych, całość kończy się podsumowaniem
 - symulacja uszkodzeń na potrzeby badań doświadczalnych i analiz numerycznych
 - diagnostyka belek uszkodzonych z wykorzystaniem przygotowanego wcześniej algorytmu, zawierająca wykrycie uszkodzeń i lokalizację uszkodzeń; całość kończy się podsumowaniem
 - wnioski końcowe z zaleceniami odnoszącymi się do dalszych prac badawczych w przedmiotowym zakresie
2. Podjęta tematyka dotycząca diagnostyki konstrukcji budowlanych z wykorzystaniem zwłaszcza metod nieniszczących (nieinwazyjnych) jest bardzo aktualna, ważna ponieważ umożliwia szybko i pewnie zdiagnozować obiekt budowlany. Wszystko to ma związek z bezpieczeństwem konstrukcji budowlanej i bezpieczeństwem użytkowania obiektu.
3. Podjęta tematyka ma zdecydowanie charakter pracy naukowej.

A. Polkorecki