

Prof. dr hab. inż. Jerzy Rojek
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa
e-mail: jrojek@ippt.pan.pl
tel. 600 202 430

Warszawa, 6.02.2021 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Gontarza
pt. „Modelowanie propagacji szczeliny w materiałach kruchych”

Podstawa: Pismo prof. dr. hab. inż. Wojciecha Franusa, przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej z dnia 17 grudnia 2020 r.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Gontarza pt. „Modelowanie propagacji szczeliny w materiałach kruchych” została przygotowana pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Jerzego Podgórskiego, prof. PL, w Katedrze Mechaniki Budowli Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Praca, o łącznej objętości 183 strony, składa się z 6 rozdziałów numerowanych, bibliografii obejmującej 116 pozycji, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz 3 załączników. Praca zaopatrzona jest w spis najważniejszych symboli i oznaczeń. Rozprawa doktorska jest przygotowana w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa i transport należącej do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych.

Praca poświęcona jest numerycznemu modelowaniu propagacji szczeliny przy pękaniu materiałów kruchych. Motywacją praktyczną jest możliwość przewidywania obciążenia niszczącego wywołującego pęknięcie konstrukcji budowlanych oraz trajektorii propagacji szczeliny. Motywacja praktyczna jest omówiona krótko we wstępie stanowiącym rozdział 1. Wstęp zawiera również krótkie omówienie zagadnienia badawczego oraz przedstawienie celu i zakresu pracy.

Rozdział 2 zawiera krótki opis podstawowych zagadnień mechaniki pęknięcia oraz przegląd literatury na temat modelowania numerycznego pęknięcia. Omówiono różne metody numeryczne, skupiając się na rozszerzonej metodzie elementów skończonych (ang. X-FEM – Extended Finite Element Method), która jest stosowana w niniejszej pracy. W podrozdziale 2.4 omówiono kryteria zniszczenia materiału, określające miejsce powstania szczeliny i kierunek jej propagacji. Podrozdział 2.5 poświęcono przeglądowi prac na temat analizy propagacji szczeliny rozszerzoną metodą elementów skończonych implementowaną w programie Abaqus z wykorzystaniem własnych procedur użytkownika.

W rozdziale 3 przeprowadzono analizę teoretyczną mechanizmu pęknięcia w próbie brazylijskiej oraz próbie wyciągania (ang. pull-out) kotwy zamocowanej w masywie skalnym.

W analizie próby brazylijskiej badano kryteria powstania szczeliny, miejsce inicjacji oraz wpływ trójosiowości na powstanie szczeliny. W analizie próby wyciągania kotwy skupiono się na określeniu trajektorii szczeliny oraz określeniu siły potrzebnej do wyrwania kotwy. Celem analizy teoretycznej było opracowanie teoretycznych założeń do własnego algorytmu wyznaczającego kierunek propagacji szczeliny oraz analiza teoretyczna zagadnień badanych doświadczalnie.

W rozdziale 4 przedstawiono badania doświadczalne. Badania doświadczalne obejmowały próby laboratoryjne (próbę jednoosiowego ściskania, próbę brazylijską, próbę rozłupywania próbki sześcienniej, próbę trójpunktowego zginania belki z karbem) oraz badania in situ wyciągania kotew. Badaniom poddano różne materiały: gips, różne odmiany piaskowca oraz porfir. Celem badań doświadczalnych było wyznaczenie właściwości konstytutywnych skał analizowanych numerycznie oraz uzyskanie danych do walidacji modeli numerycznych.

Kluczowym rozdziałem rozprawy jest rozdział 5, w którym przedstawiono autorską metodę analizy propagacji szczeliny modyfikujący algorytm rozszerzonej metody elementów skończonych (ang. X-FEM) w programie Abaqus. Przedstawiono wyniki analiz wybranych prób laboratoryjnych za pomocą standardowego algorytmu X-FEM i wykazano wadliwe działania standardowego algorytmu. Zbadano przyczynę niepoprawnych wyników i zaproponowano własną metodę wyznaczania trajektorii szczeliny. Opracowaną metodę implementowano za pomocą procedur użytkownika w programie Abaqus. Umożliwiono zastosowanie różnych kryteriów zniszczenia oraz zaproponowano modyfikację metody wyznaczania kierunku propagacji szczeliny. Opracowaną metodę zastosowano w symulacjach prób doświadczalnych uzyskując poprawę wyników w stosunku do standardowej metody.

W rozdziale 6 podsumowano pracę wymieniając najważniejsze wyniki rozprawy oraz wnioski wynikające z analizy osiągniętych wyników, jak również zarysowano możliwe kierunki dalszych prac.

W załącznikach przedstawiono szczegółowe wyniki badań doświadczalnych oraz kod źródłowy podprogramów realizujących własną metodę wyznaczania trajektorii szczeliny.

2. Ocena pracy

Tematyka pracy dotyczy złożonego i wciąż aktualnego zagadnienia badawczego. Aczkolwiek teoretyczne podstawy mechaniki pękania materiałów kruchych należą już do klasycznych zagadnień mechaniki to ich wykorzystanie w modelowaniu numerycznym jest wciąż otwartym zagadnieniem. W dalszym ciągu poszukuje się możliwości poprawy modeli numerycznych w celu lepszego przewidywania wystąpienia i rozwoju pęknięć w materiale oraz elementach konstrukcyjnych. Powszechnie stosowane programy obliczeniowe nieraz dają wyniki niezgodne z obserwacjami rzeczywistych procesów pękania. Stwierdzenie trudności w uzyskaniu poprawnej trajektorii szczeliny za pomocą algorytmu rozszerzonej metody elementów skończonych implementowanego w programie Abaqus było punktem wyjściowym w badaniach zawartych w ocenianej pracy. Głównym celem pracy jest opracowanie, implementacja i walidacja nowej metody przewidywania propagacji szczeliny. Krytycznie muszą odnieść się do sformułowania celu przez Kandydata. Cel pracy jest rozbity na kilka zadań. Niektóre z nich np. „Sprawdzenie działania symulacji pękania materiałów kruchych za pomocą metody X-FEM w systemie Abaqus” trudno uznać za cel rozprawy doktorskiej, zaś inne („stworzenie własnej metody ...”, „zaimplementowanie w autorskim algorytmie różnych kryteriów propagacji szczeliny”, „weryfikacja skuteczności własnej

metody”, „porównanie wybranych kryteriów propagacji szczeliny”) są pewnymi etapami osiągnięcia głównego celu.

Autor przedstawił dość obszerną analizę zagadnienia badawczego i stanu wiedzy, niemniej jednak pominął pewien istotny w moim przekonaniu aspekt, mianowicie milcząco założył model statyczny pęknięcia. W rzeczywistości jest to prawdziwe tylko do bardzo wolnego rozwoju szczeliny, podczas gdy np. w próbie brazylijskiej mamy do czynienia z bardzo szybkim procesem rozwoju szczeliny. Potwierdza to Doktorant informując o nieudanej próbie rejestracji procesu za pomocą szybkiej kamery. Dynamiczna mechanika pęknięcia jest obecnie obszarem intensywnych badań, również z zastosowaniem rozszerzonej metody elementów skończonych. Chociaż nie musi to być przedmiotem badań w niniejszej pracy, niemniej jednak jest to warte odnotowania przy analizie zagadnienia oraz przy formułowaniu założeń.

Pozytywnie oceniam pracę wykonaną w celu osiągnięcia założonego celu. Kandydat zidentyfikował przyczynę wadliwego działania algorytmu przewidywania propagacji szczeliny implementowanego w programie Abaqus. Stwierdził, że jest to spowodowane wykorzystaniem średniej wartości naprężeń w pobliżu wierzchołka szczeliny z punktów Gaussa w jednym elemencie. Zaproponował własną metodę przewidywania propagacji szczeliny na podstawie naprężeń z poszerzonego otoczenia zawierającego kilkadziesiąt punktów Gaussa. Opracował odpowiedni algorytm numeryczny wykorzystujący różne kryteria, implementował ten algorytm za pomocą procedur (podprogramów) użytkownika w programie Abaqus, a następnie przeprowadził walidację zaproponowanej metody z różnymi kryteriami propagacji szczeliny wykonując symulacje przeprowadzonych badań doświadczalnych: próby zginania trójpunktowej belki z karbem oraz próby wrywania kotwy. Analizy numeryczne pokazały lepsze działanie zaproponowanej metody w stosunku do standardowej metody w programie Abaqus. Pozwala to stwierdzić, że postawiony cel pracy został zrealizowany.

Na podkreślenie zasługuje połączenie badań teoretycznych i doświadczalnych w rozprawie. Wszystkie parametry materiałowe zostały wyznaczone na podstawie własnych badań laboratoryjnych, a otrzymane w symulacji wyniki zostały skonfrontowane z wynikami badań przeprowadzonych w laboratorium oraz in situ.

Przy pozytywnej ocenie ogólnej, praca ma pewne niedociągnięcia, nasuwają się uwagi krytyczne o charakterze ogólnym i szczegółowym.

Uwagi krytyczne o charakterze ogólnym:

1. Praca jest ograniczona do jednego programu. Abaqus jest programem uznanym i powszechnie stosowanym w badaniach naukowych, jednak przydatne byłoby zbadanie jak analogiczne problemy rozwiązywane są w innych programach np. w Ansysie, COMSOL-u lub w programach akademickich np. GetFEM++.
2. Terminologia nie jest zgodna z terminologią stosowaną w polskim piśmiennictwie naukowym poświęconym zagadnieniom poruszonym w rozprawie, np.
 - a) typy/schematy obciążenia szczeliny nazywane są: moda I, moda II, moda III (rys. 2.2)
 - b) procedury (podprogramy) nazywane są subrutynami
 - c) próby wytrzymałościowe nazywane są testami

d) zamiast stosować polskie przyjęte terminy autor stosuje terminy angielskie, np. test „pull-out” zamiast próby wyciągania (wrywania)

e) remeshing zamiast zmiana siatki

3. Poprawność językowa

a) w tekście są błędy językowe np. str. 10 „Stworzona ... metoda ... będzie umożliwiać .. na prawidłowe symulowanie ...”

b) nadużywane są cudzysłowy, np. metoda „brazylijska” zamiast po prostu próba brazylijska

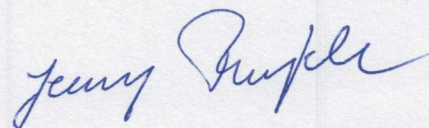
Uwagi krytyczne o charakterze szczegółowym:

1. Str. 8. Autor bardzo ostrożnie podchodzi do swoich dokonań: „Niniejsza praca jest **opisem próby rozwinięcia metody** symulowania szczeliny w programie Abaqus”, dlaczego nie „**opisem rozwinięcia metody**”?
2. Str. 39: „nie można tej próby traktować jako zadania opisanego płaskim stanem naprężenia, znaczenie ma też trójosiowy stan naprężenia w obszarze powierzchni czołowych próbki”. Trójosiowość stanu naprężenia jest większa w środku długości próbki niż na powierzchni czołowej, por. rys. 3.13
3. Str. 42: „Powyższe analizy dotyczą płaskiego stanu naprężenia, który jest daleki od rzeczywistości, gdyż walec ma niedużą wysokość względem średnicy”. To właśnie przy małym stosunku wysokości do średnicy (cienka tarcz) stan naprężenia jest najbardziej zbliżony do płaskiego stanu naprężenia.
4. Rys. 2.11, powinno być „osłabienie” zamiast „zmiękczenie”
5. Rys. 3.13, Wartości na osiach powinny mieć podane jednostki
6. Str. 53: „najwyższe naprężenia występują w podstawie walca”, aby było jaśniej należałoby napisać „najwyższe naprężenia rozciągające występują w podstawie walca”, naprężenia ściskające są w ogólności wyższe co do wartości bezwzględnej w tej próbie
7. Str. 57: „metoda **determinowania** kierunku propagacji szczeliny”, według Słownika Języka Polskiego „determinować” znaczy „wpływać w sposób decydujący na coś”
8. Str. 87: „Wielkość siatki **wacha się** od 2 do 15 mm”, błąd ortograficzny!
9. Str. 88: „...została wygenerowana ona w sposób chaotyczny”, raczej w sposób losowy
10. Str. 109: „Naprężenia sprowadzane są do jednego promienia”. Na czym polega operacja „sprowadzenia naprężeń do jednego promienia”?

Przedstawione uwagi krytyczne, nie podważają ogólnie pozytywnej oceny merytorycznej rozprawy.

3. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opisane osiągnięcia oraz ich oryginalny charakter, stwierdzam, że mgr inż. Jakub Gontarz jest autorem rozprawy, w której przedstawił oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego z dyscypliny inżynieria lądowa i transport w zakresie mechaniki materiałów i konstrukcji, wykazał się ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport oraz pokazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że recenzowana praca mgr. inż. Jakuba Gontarza spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Jerzy Rojek