

Prof. dr hab. inż. Andrzej Winnicki
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: andrzej@hypatia.l5.pk.edu.pl

Kraków, 8 marca 2021

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Gontarza
„Modelowanie propagacji szczelin w materiałach kruchych”

1. Podstawa opracowania

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Lubelskiej WP Prof. dr hab. inż. Wojciecha Franusa z dnia 17 grudnia 2020 informujące o powołaniu niżej podpisanego na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Gontarza; ustawa z dnia 14 marca 2003 (z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

2. Ocena doboru tematu

Analiza powstawania i propagacji rys w materiale jest stosunkowo młodą gałęzią mechaniki. Początki liniowej mechaniki pękania wywodzą się z prac Inglisa (1913) i Griffitha (1921). Dla materiałów quasi-kruchych (beton, skały) kontynuálne podejście do rozwoju rys można wiązać z pracą Rashida (1968), a opis w ramach nieliniowej mechaniki pękania z pracami Hilleborga (1976). Obecnie modelowanie numeryczne zarysowań w materiałach quasi-kruchych zarówno w ujęciu dyskretnym, jak i kontynuálním wraz z zagadnieniami efektu skali stanowi jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi mechaniki obliczeniowej. Temat podjęty przez Autora jest więc bardzo aktualny i dobrze wpisuje się we współczesny rozwój mechaniki obliczeniowej. Wybrany przez Autora dyskretny model rysy wymaga stosowania zaawansowanych metod numerycznych, takich jak X-FEM. Standardowe implementacje metody X-FEM w programach komercyjnych są zwykle dość uproszczone i nie zawsze poprawnie odwzorowują rzeczywiste zachowanie materiału. Podjęty przez Autora wysiłek opracowania własnych implementacji metody X-FEM wraz z ulepszonymi kryteriami inicjacji i propagacji rys należy więc ocenić bardzo pozytywnie.

3. Omówienie zawartości pracy

Recenzowana praca napisana jest w języku polskim, składa się z wykazu najważniejszych oznaczeń, sześciu rozdziałów, bibliografii, streszczeń w językach polskim i angielskim oraz 3 załączników. Praca liczy 183 strony, bibliografia zawiera 116 pozycji.

Rozdział 1 „Wstęp” jest wprowadzeniem do pracy, zawiera sformułowanie problemu naukowego i przedstawia zakres pracy. Nie są jawnie sformułowane tezy pracy, zamiast tego Autor wymienia cele pracy. W skrócie obejmują one:

- przetestowanie działania standardowej implementacji metody X-FEM w programie Abaqus,
- stworzenie autorskiego algorytmu opisu propagacji rysy i implementacja do programu Abaqus,
- uwzględnienie w autorskim algorytmie różnych kryteriów propagacji rysy,
- weryfikacja skuteczności autorskiego algorytmu i porównanie wybranych kryteriów propagacji rysy.

Rozdział zamyka przedstawienie zakresu pracy.

Rozdział 2 „Przegląd literatury” omawia piśmiennictwo związane z mechaniką pękania, analizą zarysowań w metodach numerycznych, stosowane kryteria inicjacji zarysowań oraz ostatnio opublikowane prace dotyczące numerycznego modelowania zarysowań w środowisku programu Abaqus. Opisując podstawy mechaniki pękania Autor ograniczył się do teorii Grifiitha, pojęcia współczynnika intensywności naprężenia, asymptotycznego rozwiązania Westergaarda dla naprężeń wokół wierzchołka rysy i modelu rysy kohezynnej Irwina-Dugdale’a. Z metod numerycznych Autor omawia metodę X-FEM, technikę wirtualnego zamykania rys (VCCT), elementy kohezynne, metodę usuwania elementów, kontynualne modele zarysowań (sprężysto-plastyczny model CDP, rysy rozmyte) oraz metodę elementów dyskretnych. Następnie Autor omawia kryteria propagacji rysy w ramach liniowej mechaniki pękania, w tym: kryterium Erdogana-Siha (maksymalnego naprężenia normalnego), lokalnej symetrii, minimalnej intensywności energii sprężystej, maksymalnej prędkości uwalniania energii, maksymalnej energii odkształcenia dylatacyjnego. Na końcu rozdziału Autor omawia nowe prace dotyczące modelowania rys metodą X-FEM w środowisku programu Abaqus o bardzo różnorodnym charakterze: materiały ortotropowe, zagadnienia delaminacji, zagadnienia zmęczeniowe.

Rozdział 3 „Analiza teoretyczna” zawiera oryginalne rozważania Autora dotyczące dwóch ważnych testów eksperymentalnych: tzw. próby brazylijskiej rozciągania (wytrzymałość na rozciąganie badana metodą rozłupywania próbki) i tworzenia się rysy w teście wrywania kotwy z materiału (test „pull-out”). Autor przeprowadził szczegółową analizę stanu naprężenia w próbie brazylijskiej wykorzystując znane rozwiązania teoretyczne dla zagadnienia 2-wymiarowego przy obciążeniu przyłożonym w formie punktowej (Flamant, Hertz) i przy obciążeniu rozłożonym (Hondros), a także przeprowadzając własne symulacje numeryczne dla zagadnienia 3-wymiarowego i tarczy prostokątnej. Dla analizy inicjacji zarysowań Autor wybrał kryteria wytrzymałościowe Druckera-Pragera, Coulomba-Mohra, Rankina i Ottosena-Podgórskiego. Przeprowadzone analizy doprowadziły Autora do dwóch ważnych wniosków: a) w większości przypadków stan największego wyężenia nie występuje w punkcie środkowym

przekroju próbki tylko jest przesunięty bliżej punktu przyłożenia siły, dokładna lokalizacja miejsca o największym stanie wyężenia zależy od stosunku wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na rozciąganie założonych przy analizie danej hipotezy wytrzymałościowej, b) naprężenie poziome rozciągające w miejscu największego wyężenia jest mniejsze od wytrzymałości na rozciąganie. Stosunek naprężenia poziomego rozciągającego do wytrzymałości na rozciąganie jest funkcją założonego stosunku wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na rozciąganie. Powyższe wnioski nie dotyczą hipotezy Rankina – przy jej zastosowaniu inicjacja zarysowania jest zawsze w punkcie środkowym przekroju, a naprężenie poziome rozciągające jest wprost równe wytrzymałości betonu na rozciąganie. Druga część rozdziału dotyczy analizy teoretycznej nośności granicznej kotwy wyrwanej z materiału quasi-krucho (test „pull-out”). Autor przyjmując jako znany kąt zarysowania (pomierzony doświadczalnie na stożku wyrwanego materiału) oszacował wartość siły niszczącej przy wykorzystaniu modelu rysy kohezyjnej Barenblatta. Dodatkowo obliczył siłę niszcząca przy wykorzystaniu wzorów liniowej mechaniki pęknięcia dla znanej wartości krytycznej współczynnika intensywności naprężeń w Modzie I.

Rozdział 4 „Badania laboratoryjne” opisuje przeprowadzone badania doświadczalne na próbkach z gipsu i skał (porfir, piaskowiec). Badania na próbkach gipsowych miały na celu weryfikację doświadczalną analiz teoretycznych przeprowadzonych dla testu brazylijskiego. Autor zbadał wytrzymałość na ściskanie (kostki sześciennie), moduł Younga i współczynnik Poissona, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (trójpunktowe zginanie) i wytrzymałość na rozciąganie w teście brazylijskim. Dodatkowo przeprowadzono badania współczynnika tarcia i wykonano zdjęcia testu brazylijskiego szybko kamerą dla zbadania inicjacji i rozwoju rysy wraz z obciążeniem. Badania dla 4 rodzajów skał dotyczyły wykonania in-situ testu „pull-out”. Dla skał wykonano także badania wytrzymałości, modułu Younga i współczynnika Poissona na próbkach kostkowych, badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (trójpunktowe zginanie) i wytrzymałość na rozciąganie w teście brazylijskim. W badaniach trójpunktowego zginania dla beleczek z nacięciami wykorzystując wzory z liniowej mechaniki pęknięcia Autor ustalił krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń w Modzie I i odpowiadającą wartość energii pęknięcia.

Rozdział 5 „Analiza numeryczna” opisuje testy numeryczne i analizy parametryczne dla trzech wybranych doświadczeń: trójpunktowego zginania belki z nacięciem, czteropunktowego zginania belki z pojedynczym nacięciem (tzw. belka Schlangena o nietypowej konfiguracji geometrycznej i obciążeniu) i testu „pull-out”. W pierwszej kolejności Autor podjął próbę obliczeń przy wykorzystaniu standardowej implementacji metody X-FEM do programu Abaqus. Implementacja ta zakłada lokalne kryterium rozwoju rysy – przekroczenie maksymalnych naprężeń rozciągających obliczanych jako średnia arytmetyczna z punktów Gaussa w danym elemencie. Kierunek propagacji rysy jest prostopadły do kierunku maksymalnych naprężeń rozciągających. Otrzymane wyniki były zadawalające wyłącznie

dla belki Schlangena. Dla trójpunktowego zginania i testu „pull-out” zaobserwowano nieprawidłowy rozwój zarysowania w zaawansowanych stanach obciążenia – zawijanie się szczeliny nie mające motywacji fizycznej. W celu poprawy wyników Autor opracował własne kryteria rozwoju i kierunku propagacji rysy. Kryteria te mają dalej charakter lokalny, ale są znacznie bardziej rozbudowane. Dla kryterium maksymalnych naprężeń głównych odczytuje się maksymalne naprężenia rozciągające w kilkudziesięciu punktach Gaussa najbliższych wierzchołkowi rysy i uśrednia się je do jednego promienia (zakładając zmianę naprężeń wraz z promieniem zgodnie z asymptotycznym rozwiązaniem Westergaarda). Następnie tworzona jest funkcja aproksymacyjna (wielomian odpowiedniego stopnia) opisująca maksymalne naprężenie rozciągające w funkcji kąta w stosunku do bieżącego kierunku rysy. Jako kąt propagacji rysy przyjmowane jest minimum funkcji aproksymacyjnej – w tym celu znajdowane jest miejsce zerowe pierwszej pochodnej wielomianu metodą bisekcji. Jako modyfikację tego kryterium Autor zaproponował następnie przyjęcie funkcji wyężenia z hipotezy Ottosena-Podgórskiego zamiast maksymalnych naprężeń rozciągających. W podobny sposób, ale bazując na aproksymacji przemieszczeń Autor zaproponował kryterium minimalnych przemieszczeń oraz kryterium wykorzystujące analityczne sformułowanie kryterium Erdogana-Siha (współczynniki intensywności w Modzie I i II występujące we wzorze analitycznym wyliczane są w oparciu o stan przemieszczeń). Dwa ostatnie zaproponowane kryteria Autor wykorzystuje wyłącznie do ustalenia kierunku propagacji rysy, jako kryterium rozwoju rysy przyjmując swoje kryterium maksymalnych naprężeń głównych. Wszystkie cztery zaproponowane kryteria zostały zweryfikowane na trzech omówionych uprzednio testach. W opinii recenzenta autorska wersja kryterium maksymalnych naprężeń głównych i kryterium Ottosena-Podgórskiego prowadzi do zadowalających w sensie jakościowym wyników, dwa pozostałe kryteria bazujące na aproksymacji przemieszczeń dają wyniki przypadkowe: poprawne w pewnych przypadkach, w innych całkowicie błędne. Autor wykonał także wstępne analizy numeryczne zależności otrzymywanych wyników od gęstości siatki otrzymując poprawne rezultaty.

Rozdział 6 „Podsumowanie i wnioski ogólne” stanowi rekapitulację poprzednich pięciu rozdziałów. Jako kierunki dalszych działań Autor wymienia udoskonalenie dwóch ostatnich własnych kryteriów dla kierunków propagacji rys (w obecnej formie nie dają one zadowalających rezultatów), implementację innych kryteriów, symulację innych testów, uogólnienie stosowanego podejścia na przypadek 3-wymiarowy (co zdaniem recenzenta będzie bardzo trudne), wreszcie rezygnację z Abaqusa i budowę własnego programu MES zorientowanego na metodę X-FEM.

Załącznik 1 podaje szczegółowe wyniki badań próbek gipsowych, Załącznik 2 badań próbek z piaskowca i porfiru, a w Załączniku 3 przedstawione są kody źródłowe autorskich podprogramów w języku Fortran wprowadzonych do programu Abaqus.

4. Ogólna ocena pracy

Największą zaletą pracy jest krytyczna analiza standardowej implementacji metody X-FEM w Abaqusie przeprowadzona na podstawie testów numerycznych dla trzech wybranych doświadczeń, a następnie opracowanie i implementacja do programu Abaqus czterech własnych, oryginalnych kryteriów rozwoju i kierunku propagacji rysy wraz z ich przetestowaniem na tych samych doświadczeniach. Przeprowadzone z sukcesem przez Autora zadanie wymagało nie tylko wiedzy teoretycznej z zakresu liniowej mechaniki pęknięcia, ale także znacznych umiejętności programistycznych. Autor musiał samodzielnie zdobyć wiedzę o strukturze wewnętrznej programu Abaqus i we właściwy sposób wykorzystać te podprogramy, które program pozwala zastępować procedurami własnymi użytkownika. Dodatkową wartością pracy jest zamieszczenie pełnych wersji kodów źródłowych autorskich podprogramów w języku Fortran. W Rozdziale 5 w sposób szczegółowy opisano strukturę i działanie autorskich podprogramów – umożliwia to zainteresowanym czytelnikom podjęcia ich modyfikacji i może stanowić wzorzec dla tworzenia własnych podprogramów. Podsumowując należy stwierdzić, że Autor w pełni zrealizował cele pracy, które sformułował w Rozdziale 1.

Dodatkowo bardzo interesujące są wyniki analizy teoretycznej przedstawionej w Rozdziale 3. Pokazują one, że tylko przy użyciu hipotezy wyężeniowej Rankina wyniki testu brazylijskiego mogą być utożsamiane z wytrzymałością betonu na rozciąganie. W przypadku stosowania innych hipotez widać wyraźnie wpływ złożonego stanu naprężenia i prawidłowa interpretacja wyników doświadczalnych wymaga pogłębionej wiedzy teoretycznej.

Wartościowa jest także analiza teoretyczna próby „pull-out” przeprowadzona w Rozdziale 3. Demonstruje ona, że wykorzystując teorię rysy kohezyjnej w ujęciu Barenblatta lub konkurencyjnie oszacowanie współczynnika intensywności naprężeń w liniowej mechanice pęknięcia można przy pewnych założeniach upraszczających otrzymać dobre oszacowanie otrzymanej eksperymentalnie siły niszczącej w formie wzorów zamkniętych bez potrzeby stosowania zaawansowanych symulacji numerycznych.

5. Komentarze i pytania

Przegląd literatury (Rozdział 2) jest przeprowadzony w sposób chaotyczny i pobieżny. Przy omawianiu modeli numerycznych (punkt 2.3) nie ma jasnego omówienia podstaw teoretycznych – brak jest rozróżnienia, że przedstawione modele dotyczą trzech różnych opisów zjawiska: rysy dyskretnej (prowadzącej do osobliwości w naprężeniach), rysy kohezyjnej, kontynualnego osłabienia materiału. Punkt 2.5 stanowi omówienie przypadkowego zbioru modeli materiału o bardzo różnym charakterze – jedynym ich punktem wspólnym jest implementacja w Abaqusie i niedawny czas publikacji.

Czy ostatni wiersz wzoru (2.32) jest poprawny?

Niezrozumiałe jest nazywanie kryterium Ottosena-Podgórskiego „najdokładniejszym” (Rozdział 3). Co Autor przez to rozumie?

Wzór (3.5) jest dla recenzenta całkowicie niezrozumiały.

Opis obliczania współczynnika intensywności naprężeń i następnie na jego podstawie szacowanie siły niszczącej dany wzorami (3.33-3.35) jest niezrozumiały. Autor nie wyjaśnia pochodzenia wzorów i brak jest odwołania się do literatury.

W Rozdziale 4 Autor utożsamia wyniki otrzymywane z testu trójpunktowego zginania z wytrzymałością na rozciąganie. W literaturze przedmiotu od dawna istnieje rozróżnienie pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie w teście bezpośrednim (direct tension strength), a wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu (flexure tension strength, w terminologii amerykańskiej modulus of rupture). Ta ostatnia jest znacznie wyższa ponieważ przy zginaniu po inicjacji zarysowań w skrajnym włóknie rozciągany przekroju następuje faza stabilnego wzrostu rysy przy wciąż jeszcze wzrastającym obciążeniu.

W Rozdziałach 3 i 4 brak jest dyskusji wpływu szerokości przekładek dociskowych na wyniki testu brazylijskiego. Analizy teoretyczne i wyniki eksperymentalne wskazują, że jest to bardzo ważny parametr wpływający na nośność i charakter zniszczenia.

Rozdział 5 jest napisany w sposób nieprzejrzysty. Podstawy teoretyczne oryginalnych autorskich kryteriów rozwoju i kierunku propagacji rys są przemieszane ze szczegółami implementacji i kodowania w języku Fortran.

Dlaczego w zagadnieniu płaskim Autor używa wzoru (5.1)?

Niezrozumiałe są podstawy teoretyczne autorskiego kryterium maksymalnych naprężeń głównych (punkt 5.3.2). Już sama nazwa sugeruje, że jest to jakaś odmiana kryterium Erdogana-Siha. Jednakże w oryginalnym kryterium Erdogana-Siha (omówionym poprawnie w Rozdziale 2) poszukuje się **maksymalnej** wartości naprężenia głównego w funkcji kąta theta, gdy tymczasem Autor poszukuje **minimum** funkcji (patrz opis na stronie 109). Recenzent nie rozumie podstaw fizycznych tego algorytmu. Niezrozumiałe są też przebiegi naprężenia głównego na Rys. 5.22 i 5.23. Według Autora biorą się one z transformacji rozwiązania Westergaarda (podanego dla składowych naprężenia w układzie osi x-y) do kierunków głównych. Jednak postać naprężeń w układzie biegunowym, używana przy sformułowaniu kryterium Erdogana-Siha sugeruje inny przebieg funkcji. Dodatkowo przy powtórnym opisie w Rozdziale 5 oryginalnego kryterium Erdogana-Siha (punkt 5.3.5) Autor używa pojęcia „minimum lokalne”.

W Rozdziale 5 brakuje informacji co do sposobu sterowania używanego w testach numerycznych: przyrostem siły, przemieszczenia czy może rozwartością rysy (CMOD). W przypadku belki Schlangena w celu uzyskania zakresu pokrytycznego należy w specjalny sposób dobrać sterujące przemieszczenie – pisze o tym Schlangen w swoim doktoracie.

6. Ocena strony formalnej

Praca jest napisana na zadowalającym poziomie formalnym. Słabą stroną jest język Autora – często nieprecyzyjny i używający wyrażen żargonowych: „wymiały i sposób obciążenia próbki pobrano z pracy..”, „naprężenia są pobierane z punktów Gaussa”, „subrutyna”. Część norm w bibliografii ma niepełny opis.

7. Wniosek końcowy

Zgodnie z uwagami przedstawionym w punkcie „Ogólna ocena rozprawy” w swojej pracy doktorskiej Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego wykazując się wiedzą z zakresu modelowania numerycznego, opisu teoretycznego powstawania i propagacji rys w materiałach quasi-kruchych oraz technik eksperymentalnych. Recenzent stwierdza, że praca doktorska mgr inż. Jakuba Gontarza „Modelowanie propagacji szczelin w materiałach kruchych” spełnia wszystkie wymagania formalne i merytoryczne określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 (z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Uzyskane przez Autora wyniki w zakresie opisu teoretycznego i komputerowych symulacji stanowią oryginalny i wartościowy wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport. Recenzent wnosi o dopuszczenie Autora do publicznej obrony pracy.



Andrzej Winnicki