POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

Wrocław, 05.01.2015

dr hab. inż. Dariusz Łydżba, Prof. PWr
Katedra Geotechniki i Hydrotechniki, Budownictwa Podziemnego i Wodnego
Politechnika Wrocławska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Patrycji Jarczyk „Własności wytrzymałościowe i odkształceniowe nieciągłych ośrodków skalnych w świetle wyników badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych"

Podstawa opracowania recenzji: pismo nr RGBD/29/14/15, Dziekana Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, z dnia 03.11.2014 r.

1. Uwagi ogólne

Elementem charakterystycznym zagadnień mechaniki górotworu jest konieczność uwzględniania odmiennych cech mechanicznych: masywu skalnego oraz skały tworzącej ten masyw. Drastyczna różnica właściwości masywu skalnego oraz skały jest wynikiem obecności w masywie dyskretnych struktur w postaci powierzchni nieciągłości. Są one odpowiedzialne nie tylko za zmiany ilościowe charakterystyk mechanicznych masywu skalnego, ale również ich zmiany jakościowe w stosunku do charakterystyki mechanicznej skały bez powierzchni osłabienia. W ogólności wyróżnia się, ze względów obliczeniowych, dwa skrajne przypadki, tj.:

- w masywie skalnym istnieje ograniczona liczba rodzin powierzchni nieciągłości – rozwiązania poszukuje się z wykorzystaniem opisu ciągłego dla skały i równoczesnym uwzględnieniem obecności w tym ośrodku powierzchni nieciągłości w postaci warunków ciągłości wektorów: przemieszczenia oraz naprężenia na tych powierzchniach; w takim ujęciu skale przypisuje się właściwości mechaniczne „pomierzone" w laboratorium na próbkach skalnych natomiast powierzchniom nieciągłości parametry charakterystyczne dla tych powierzchni;
- w masywie skalnym nie jest możliwe wyodrębnienie ograniczonej rodziny powierzchni nieciągłości – masyw skalnych wraz z powierzchniami nieciągłości traktuje się jako „matematycznie wygładzone/uśrednione" kontinuum, przypisując mu jednocześnie tzw. zastępcze/efektywne (makroskopowe) właściwości mechaniczne. Wartości parametrów zastępczych masywu skalnego są, w ogólności, złożoną funkcją parametrów mechanicznych: skały oraz powierzchni nieciągłości jak również rozkładu przestrzennego tych nieciągłości w masywie skalnym. Procedura określania właściwości zastępczych w terminach właściwości składników struktury określana jest mianem „ciągłej mikromechaniki" lub „obliczeniowej mikromechaniki" – jeśli realizowana jest w postaci numerycznego

rozwiązywania zagadnienia brzegowego sformułowanego dla tzw. Reprezentatywnej Elementarnej Objętości.

Niniejsza rozprawa analizuje oraz weryfikuje wpływ obecności przestrzennych układów/struktur powierzchni nieciągłości na zastępcze/makroskopowe właściwości wytrzymałościowe oraz mechaniczne masywu skalnego. Ocenę jakościową oraz ilościową badanego problemu uzyskano poprzez systematyczne badania doświadczalne, w aparacie trójosiowego ściskania, mechanicznego zachowania się próbek skalnych osłabionych powierzchniami nieciągłości z „wymuszonym" kierunkiem ich orientacji oraz przez badania/symulacje numeryczne parametrów zastępczych próbek skalnych z „wymuszonymi" strukturami sieci nieciągłości, o różnym skomplikowaniu ich przestrzennego rozkładu. Symulacje numeryczne prowadzono z wykorzystaniem programu Metody Elementów Odrębnych UDEC.

Temat recenzowanej dysertacji doktorskiej jest aktualny, interesujący i trudny. Ujęcie problemu przedstawiono w ośmiu rozdziałach. W początkowych rozdziałach, mających charakter wprowadzająco-informacyjny, sformułowano cele rozprawy oraz omówiono stan aktualny wiedzy o zachowaniu się nieciągłych ośrodków skalnych. W pozostałych rozdziałach znajdują się głównie oryginalne wyniki i analizy autorki dysertacji, tj. badania laboratoryjne zachowania mechanicznego, w warunkach trójosiowego ściskania, próbek skalnych osłabionych nieciągłościami oraz badania teoretyczno-numeryczne wpływu „sieciowej struktury" nieciągłości ośrodka skalnego na jego globalne/makroskopowe zachowanie mechaniczne. Ponadto, recenzowaną rozprawę doktorską uzupełniają: podsumowanie, spis literatury oraz załącznik z „kartami" dokumentującymi wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych.

Cała praca wraz ze spisem treści, wykazem symboli i oznaczeń oraz spisem literatury (93 pozycje) oraz załącznikiem (80 kart dokumentujących wyniki symulacji numerycznych) liczy łącznie 250 stron.

2. Treść pracy

Obecnie omówię krytycznie treść pracy.

Rozdział 1 uzasadnia celowość podjęcia się tytułowych badań oraz przedstawia cele i zakres pracy. Rozprawa dotyczy oceny zastępczych/makroskopowych właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych nieciągłych ośrodków skalnych. Analiza prowadzona będzie w oparciu o systematyczne badania laboratoryjne i symulacje komputerowe. Sformułowano następujące cele szczegółowe, tj.:

a) ocena wpływu ciśnienia okólnego i orientacji nieciągłości względem kierunków działania obciążenia zewnętrznego na zachowanie się mechaniczne spękanych skał,
b) sformułowanie równań opisujących zależność wytrzymałości granicznej od ciśnienia okólnego dla różnych strukturalnych typów górotworu.

Zakres pracy obejmuje:

a) ocenę wpływu ciśnienia okólnego na zachowanie mechaniczne badanych skał na podstawie testów laboratoryjnych na konwencjonalne trójosiowe ściskanie próbek skalnych przeciętych pod różnymi kątami względem kierunków obciążenia,

b) ocenę wpływu ciśnienia okólnego na zachowanie mechaniczne badanych skał na podstawie symulacji komputerowych testów na trójosiowe ściskanie różnych numerycznych modeli strukturalnych spękanych masywów skalnych,
c) ocenę wpływu struktury geometrycznej powierzchni nieciągłości na właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe spękanych próbek skalnych.

Rozdział ten napisany jest zwięźle i jasno. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 2 jest podstawowy celem zrozumienia dalszych rozważań prezentowanych w pracy. Przedstawia on aktualny stan wiedzy o zachowaniu się nieciągłych ośrodków skalnych. Wyróżniono w nim trzy, jakościowo różne, grupy prac, tj.: prezentujące wyniki i analizy uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych prowadzonych na spękanych skałach oraz materiałach kompozytowych, przedstawiające wyniki i analizy otrzymane na bazie symulacji numerycznych mechanicznego zachowanie się spękanych próbek skalnych oraz prace proponujące zależności na wartości parametrów zastępczych spękanego masywu skalnego w terminach jakościowej oceny masywu skalnego (RMR, RQD, GSI) stosowanych w klasyfikacjach geomechanicznych.

Omówione prace badawcze wybrane zostały przez autorkę wzorowo a dokonany przegląd – jego zakres – bardzo dobrze.

Rozdział ten prezentuje materiał podstawowy/konieczny do zrozumienia celu, zasadności i zakresu prac badawczych recenzowanej rozprawy doktorskiej. Uwzględnienie tego rozdziału w rozprawie, zdaniem recenzenta, jest bezwzględnie zasadne. Sposób przekazu ma jednak charakter odrobinę zbyt „encyklopedycznego", autorka nie wykorzystała możliwości nadania mu bardziej własnej interpretacji i ujednoliconej prezentacji, co w konsekwencji, zdaniem recenzenta, czyni ten rozdział odrobinę trudnym do „śledzenia".

Uwagi krytyczne odnoszą się głównie do strony edytorskiej, tj.:

- ✓ wielokrotnie używane są różne metody opisu orientacji kierunków płaszczyzn nieciągłości, tj. czasami nachylenie płaszczyzn nieciągłości odnosi się do osi poziomej a czasami do osi pionowej – zawsze stosowany jest jednak ten sam symbol kąta, co czyni pewne trudności w śledzeniu rozważań;
- ✓ na stronie 21 (poniżej wzoru 2.13) wyjaśniając znaczenie stosowanych funkcji Autorka pisze „...*prawdopodobne funkcje gęstości*" a powinno być „...*funkcje gęstości prawdopodobieństwa*";
- ✓ Autorka powinna również unikać maniery polegającej na ograniczaniu się do podawania jedynie warunku plastyczności/wytrzymałości bez podawania prawa plastycznego płynięcia przy omawianiu prac dotyczących symulacji numerycznych w zakresie niesprężystym. Prawo plastycznego płynięcia jest równie ważne jak warunek plastyczności.

Rozdział 3 przedstawia oryginalne autorskie wyniki badań laboratoryjnych, w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania, cylindrycznych próbek skalnych osłabionych pojedynczą powierzchnią nieciągłości. W badaniach wykorzystano piaskowiec drobnoziarnisty towarzyszący pokładom węgla w kopalni „Jastrzębie". W testach wykorzystano:

1. dwie „rodziny" próbek, tj.:
   a) z powierzchnią osłabienia o ściankach „gładkich" wytworzonych w wyniku przecięcia próbki skalnej tarczą diamentową,

b) z powierzchnią osłabienia o ściankach „chropowatych" wytworzoną na skutek przecięcia próbki skalnej tarczą diamentową i „bombardowaniu" ścianek powierzchni nieciągłości piaskiem kwarcowym;

2. każdą „rodzinę" próbek różnicowano dodatkowo ze względu na kąt orientacji powierzchni nieciągłości względem osi próbki. Uwzględniono trzy orientacje płaszczyzn osłabienia, tj. 30^0, 45^0 oraz 60^0 w obrębie każdej „rodziny";
3. badania w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania prowadzono dla sześciu różnych wartości ciśnienia okólnego, tj.: 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa oraz 30 MPa.

Celem tego programu badawczego była ilościowa i jakościowa identyfikacja wpływu obecności płaszczyzny osłabienia, różnicowanych przez orientację oraz chropowatość, na makroskopową „odpowiedź" (charakterystykę mechaniczną) próbki w zakresie różnych wartości ciśnienia okólnego. Analizie poddano uzyskane/wyznaczone w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania:

1. charakterystyki naprężenie różnicowe - przemieszczenie,
2. zależności naprężenie różnicowe - ciśnienie okólne uzyskane dla różnych punktów charakterystyk mechanicznych, tj.: dla punktu odpowiadającego początkowi poślizgu w płaszczyźnie osłabienia, dla punktów odpowiadających kolejno przemieszczeniu pionowemu równemu: 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm oraz 2.5 mm,
3. zależności liniowych współczynników sztywności podłużnej, dla charkterystyk bimodalnych, od wartości ciśnienia okólnego,
4. zależności, w funkcji ciśnienia okólnego, współczynników sztywności podłużnej liniowego oraz siecznego, dla charakterystyk w których zniszczeniu próbki towarzyszyło makro-pęknięcie.

W konsekwencji, przeprowadzony program badawczy pozwolił Autorce sformułować, między innymi, następujące stwierdzenia:

1. wytrzymałość próbek rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego; kinetyka tego wzrostu jest funkcją chropowatości ścianek płaszczyzny osłabienia oraz orientacji płaszczyzny osłabienia,
2. chropowatość ścianek nieciągłości powoduje obniżenie zastępczej wytrzymałości próbki; największe spadki tej wytrzymałości odpowiadają największemu kątowi orientacji płaszczyzny osłabienia (60^0); przy orientacji 30^0 wpływ chropowatości na zastępczą wytrzymałość próbki jest, praktycznie, pomijalny,
3. chropowatość ścianek nieciągłości ma duży wpływ na zastępczą sztywność podłużną próbek w stanie „przedpoślizgowym"; próbki z chropowatą płaszczyzną osłabienia charakteryzuje zastępcza sztywność o około 30-50% mniejsza w stosunku do próbek z „gładką" powierzchnią osłabienia,
4. zależnie od kąta orientacji płaszczyzny osłabienia zastępcza charakterystyka próbki jest zdeterminowana przez charakterystykę powierzchni nieciągłości (kąty orientacji 30^0 oraz 45^0 od osi pionowej próbki) bądź przez charakterystykę samej skały (kąt orientacji 60^0).

Oceniając ten rozdział należy podkreślić, że prezentuje on oryginalne wyniki i analizy badań doświadczalnych autorki dysertacji. Nie mam uwag krytycznych. Rozdział oceniam bardzo pozytywnie.

W rozdziale 4 autorka dokonała oceny ilościowej struktury geometrycznej powierzchni nieciągłości. Analizowane były, podobnie jak w poprzednim rozdziale, powierzchnia „gładka" wytworzona cięciem tarczą diamentową oraz „chropowata", która po cięciu piłą diamentową poddana była „piaskowaniu" piaskiem kwarcowym, celem zwiększenia jej chropowatości. Informację o strukturze powierzchni nieciągłości uzyskano z jej skanów profilometrem laserowym. Skanowano najpierw powierzchnię gładką a następnie powierzchnię tę poddawano „bombardowaniu" piaskiem kwarcowym i następnie ponownie skanowano profilometrem laserowym. Taki program badawczy zapewnił wykonanie skanów tego samego obszaru powierzchni „gładkiej" oraz „chropowatej". Do oceny struktury geometrycznej powierzchni wykorzystano klasyczne miary stosowane w tribologii, tj.: średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości rzędnych profilu, średnia kwadratowa rzędnych profilu, wysokość najwyższego wzniesienia oraz głębokość najniższego wgłębienia profilu, całkowitą wysokość profilu oraz współczynniki asymetrii oraz nachylenia (kurtozy) profilu.

Rozdział ten napisany jest zwięźle i jasno. Uwaga krytyczna dotyczy ponownie strony edytorskiej pracy, tj. wzory na współczynnik asymetrii profilu oraz współczynnik spłaszczenia rozkładu profilu (kurtoza) są niepełne – w pracy przedstawiono je odpowiednio jako momenty zwykłe 3-go oraz 4-go rzędu a są one funkcjami momentów centralnych 2-go, 3-go oraz 4-go rzędu.

Rozdziały 5 i 6 stanowią wstęp do analiz prowadzonych w rozdziale 7, tj. symulacji numerycznych testu trójosiowego ściskania spękanych próbek skalnych. W symulacjach numerycznych Autorka wykorzystuje Metodę Elementów Odrębnych, stosując program UDEC. W rozdziale 5 przedstawia, więc w sposób skondensowany podstawy metody elementów odrębnych oraz podstawowe właściwości programu UDEC. W rozdziale 6 sprecyzowane zostają modele strukturalne próbek skalnych, które analizowane będą, przez wykonanie sekwencji symulacji numerycznych, w rozdziale 7. Autorka wyróżnia 10 modeli strukturalnych o różnym poziomie skomplikowania rozkładu powierzchni nieciągłości – najbardziej rozbudowany zawiera ponad 170 powierzchni nieciągłości w próbce skalnej oraz ponad 80 elementów bloków o różnej wielkości. Sprecyzowane są w tym rozdziale również równania konstytutywne dla powierzchni nieciągłości oraz dla materiału skalnego. Jako warunek plastyczności przyjęto kryterium Coulomba-Mohra a prawo plastycznego płynięcia – w postaci niestowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia. Deformacje plastyczne modelowane są w ujęciu teorii plastyczności z osłabieniem. Założono liniowe osłabienie w funkcji zakumulowanej wartości dewiatorowego odkształcenia plastycznego.

Jedyne uwagi krytyczne dotyczą, podobnie jak w poprzednich rozdziałach, strony edytorskiej i prezentacji. W szczególności, Autorka używa pewnej maniery w stosowanej przez siebie terminologii pisząc wielokrotnie „... *po przekroczeniu wytrzymałości...*" – jednakże wytrzymałości nie można przekroczyć a jedynie można ją osiągnąć i tak powinno być napisane w pracy. Autorka używa również pojęć: *współczynnik sprężystości objętościowej* oraz *współczynnik sprężystości postaciowej* - w literaturze przedmiotu te stałe materiałowe określa się najczęściej mianem modułów.

Rozdział 7 to „obliczeniowa mikromechanika". W rozdziale tym przedstawione są oryginalne wyniki dotyczące oceny zastępczych parametrów mechanicznych próbek

skalnych. W szczególności, stosując program UDEC, Autorka dysertacji analizuje 10 struktur geometrycznych rozkładu spękań w próbkach poddanych konwencjonalnemu trójosiowemu ściskaniu. Dla każdej struktury wykonano symulacje numeryczne dla 7 różnych wartości ciśnienia okólnego, tj. 0.1 MPa, 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa oraz 30 MPa. W wyniku obliczeń uzyskano „zastępcze/efektywne odpowiedzi" analizowanych struktur. Uzyskane zastępcze właściwości wytrzymałościowe oraz odkształceniowe (moduły sztywności podłużnej) zostały następnie poddane szczegółowej analizie, między innymi w funkcji miar mikrostrukturalnych jak liczba powierzchni styków w próbce, liczba elementów bloków w próbce oraz wielkości bloków w próbce.

Rozdział ten prezentuje oryginalne rozwiązania, wyniki oraz analizy autorki dysertacji. Osiągnięciami tego rozdziału są, między innymi, ilościowe i jakościowe identyfikacje:

1. roli ciśnienia okólnego na wartości zastępcze wytrzymałości oraz modułów sztywności modeli strukturalnych masywu skalnego,
2. zależności na zastępczą wytrzymałość oraz moduł sztywności w funkcji miar mikrostrukturalnych rozważanych struktur geometrycznych próbek skalnych,
3. związków na stałe materiałowe uogólnionego warunku wytrzymałościowego Hoeka-Browna w terminach miar mikrostrukturalnych rozważanych struktur geometrycznych, tj.: liczbą bloków, liczbą styków i wielkością bloków.

Rozdział ten oceniam bardzo pozytywnie. Zawiera on oryginalne rozwiązania i wyniki autorki dysertacji. Pewien niedosyt recenzenta stanowi brak opisu metodologii generacji modeli strukturalnych górotworu. O ile modele 0, 1c, 2, 3 są oczywiste to już pozostałe modele strukturalne, tj. 4a, 4b, 5, 6, 7 oraz 8 już takie oczywiste nie są. Nie podważa to oczywiście w żaden sposób, jakości uzyskanych w tym rozdziale wyników, powoduje jednak pewien niedosyt.

Rozdział ostatni recenzowanej pracy dokonuje podsumowania rozważań niniejszej pracy.

3. Ocena pracy

Recenzowana praca dotyczy zagadnienia ważnego, aktualnego, trudnego i niezwykle interesującego, tj. oceny wpływu powierzchni spękań/nieciągłości na zastępcze/makroskopowe własności wytrzymałościowe i odkształceniowe spękanych masywów skalnych. Rola spękań na charakterystyki mechaniczne próbek skalnych jest najpierw zidentyfikowana na podstawie badań doświadczalnych w aparacie trójosiowego ściskania. Następnie, wykorzystując Metodę Elementów Odrębnych, Autorka dokonuje procesu oceny zastępczych/efektywnych właściwości spękanych próbek skalnych. Jako Reprezentatywna Elementarna Objętość rozważanych jest w pracy 10 struktur geometrycznych spękań próbki.

Przedstawione w pracy badania doświadczalne, symulacje numeryczne, rozważania oraz ich wyniki jak również przeprowadzone analizy jakościowe oraz ilościowe są oryginalnym osiągnięciem Autorki. Stanowią oryginalne rozwiązania w specjalności: mechanika górotworu oraz dyscyplinie: górnictwo i geologia inżynierska.

Zastosowanie systematyczne badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych pozwoliło autorce jednoznacznie, w sposób ścisły oraz obiektywny wskazać/udowodnić wpływ właściwości powierzchni nieciągłości oraz ich przestrzennego rozkładu na zastępcze/makroskopowe właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe nieciągłych ośrodków skalnych

Recenzowana praca doktorska dowodzi również szerokiej wiedzy Autorki tak w zakresie badań doświadczalnych jak i teoretycznych/numerycznych i potwierdza Jej gotowość do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Wyszczególnione przez recenzenta, przy omawianiu treści rozprawy, uwagi krytyczne dotyczą jedynie prezentacji prowadzonych rozważań i nie mają wpływu na jakość sformułowanych w dysertacji wniosków końcowych i stwierdzeń.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że oceniana rozprawa doktorska spełnia wymogi Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami (Dz.U. z 2005 r., nr 164, poz. 1365; Dz.U. z 2011 r., nr 84, poz. 455) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Patrycji Jarczyk do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt. "Własności wytrzymałościowe i odkształceniowe nieciągłych ośrodków skalnych w świetle wyników badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych".

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach