

Wrocław, 19.10.2019

Prof. dr hab. inż. Dariusz Łydzba
Katedra Geotechniki, Hydrotechniki, Budownictwa Podziemnego i Wodnego
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wrocławska

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Macieja Trzeciaka
„Laboratory measurements and viscoelastic constitutive modeling
or rock creep with application to stress prediction in intraplate
sedimentary basins”**

Podstawa opracowania recenzji: pismo dr hab. Mariusza Majdańskiego, Zastępcy Dyrektora Instytutu Geofizyki PAN z dnia 18.06.2019.

1. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia modelowania reologicznych równań stanu skał występujących w bałtyckim basenie sedymentacyjnym, laboratoryjnej identyfikacji ich stałych materiałowych oraz predykcji stanu naprężenia w tych utworach w czasie ostatniego zlodowacenia.

Rozważane szczegółowo w niniejszej pracy równania konstytutywne skał to związki liniowej sprężystości oraz lepko-sprężystości uwzględniające anizotropię strukturalną tych utworów. Wartości stałych materiałowych oznaczono na podstawie testów kierunkowego ściskania oraz pełzania zrealizowanych w Laboratorium Mechaniki Skał Uniwersytetu Wisconsin-Madison. Predykcję stanu naprężenia dokonano wykorzystując profil litologiczny oraz zidentyfikowane laboratoryjnie wartości stałych materiałowych tych utworów.

Analizowany w dysertacji doktorskiej problem jest interesujący, ważny i aktualny. Ujęcie zagadnienia przedstawiono w siedmiu rozdziałach. W pierwszym rozdziale, mającym charakter wprowadzający, omówiono podstawowe zależności konstytutywne stosowane do opisu ośrodków skalnych. Kolejny rozdział szczegółowo omawia i rozważa związki konstytutywne lepko-sprężystości dla utworów osadowych wykazujących anizotropię strukturalną w postaci transversalnej izotropii. Rozdział trzeci prezentuje procedurę laboratoryjnej identyfikacji stałych materiałowych oraz wyznaczone wartości tych stałych dla skał z basenu bałtyckiego. W kolejnych rozdziałach dokonano omówienia zagadnień związanych z opisem i modelowaniem stanu naprężenia w litosferze. Przedstawiono, między innymi, źródła naprężeń w litosferze oraz wpływ właściwości reologicznych skał na stan naprężenia. W ostatnim rozdziale, wykorzystując zaproponowane związki lepko-sprężystości, dokonano oceny stanu naprężenia w basenie bałtyckim podczas ostatniego zlodowacenia.

Cała praca wraz ze spisem treści, streszczeniem oraz spisem literatury (241 pozycji) liczy łącznie 147 stron. Praca napisana jest w języku angielskim.

2. Treść pracy

Obecnie omówię krytycznie treść pracy.

Rozdział 1 W rozdziale tym autor dokonuje przeglądu i omówienia najczęściej wykorzystywanych postaci zależności konstytutywnych ośrodków skalnych. Rozpoczyna od prezentacji związków liniowej sprężystości dla materiału izotropowego dla którego omawia również ich postać z wykorzystaniem dekompozycji tensora odkształcenia na część objętościową oraz dewiatorową. Prezentację związków liniowej sprężystości kończy ich sformułowanie dla przypadku transwersalnej izotropii oraz dyskusja na temat termodynamicznych ograniczeń na wartości stałych materiałowych tych zależności. Kolejny prezentowany opis konstytutywny to liniowy związek płynięcia lepkiego wraz z prawem Arrheniusa zależności lepkości od temperatury. Omawiając kryteria wytrzymałości skał ograniczono prezentację tylko do tych najprostszych i równocześnie najstarszych, tj. warunku Treski, warunku Coulomba-Mohra, warunku Hubera-Misesa oraz warunku Druckera-Pragera. Kolejnym typem związków konstytutywnych omawianym w tym rozdziale są związki poro-sprężystości stanowiące opis konstytutywny deformacji sprężystych w pełni nasyconych płynem skał. Najwięcej uwagi autor poświęca związkom konstytutywnym lepko-sprężystości. Omawiane są modele: Maxwella, Kelvina-Voigta wraz z ich uogólnieniami oraz związki lepko-sprężystości dla materiałów z funkcją pełzania w postaci prawa potęgowego. W tym ostatnim przypadku szczególnie dużo miejsca poświęcono tzw. metodzie „frakcjonalnego Maxwella”. Jest to model stanowiący szeregowo połączony pojedynczy element sprężysty z elementem Scott-Blaira. Rozdział ten kończy ogólna/jakościowa dyskusja, bez prezentacji zależności konstytutywnych, procesu deformacji niesprężystej skał przy stałej wartości naprężenia.

Rozdział napisany jest zwięźle i jasno. Recenzent czuje jednak pewien niedosyt prezentacji. Autor odwołuje się, między innymi, do skomplikowanych procesów takich jak wzrost i propagacja defektów w mikrostrukturze materiału, międzyziarnowe ciśnieniowe rozpuszczanie kontaktów i równocześnie „zapomina” o uznanych już teoriach: plastycznego płynięcia czy lepko-plastyczności.

Rozdział 2 poświęcony jest szczegółowej prezentacji związków konstytutywnych lepko-sprężystości. Autor rozpoczyna od ogólnego sformułowania, z wykorzystaniem operatora splotu i funkcji tensorowych czwartego rzędu: pełzania oraz relaksacji. Prezentowane jest również opcjonalne sformułowanie z wykorzystaniem, zależnego od czasu, współczynnika Poissona. Następnie omawiane są związki lepko-sprężystości dla materiału w którym tylko składowe dewiatorowe tensora naprężenia ulegają relaksacji. Szczególnego podkreślenia zasługuje wyprowadzenie, w tym rozdziale, związków lepko-sprężystości dla materiału transwersalnie izotropowego. Autor zaproponował dekompozycję deformacji na część objętościową, dewiatorową oraz mieszaną. Wzorując się na związkach sprężystości zaproponował, w przestrzeni transformacji Laplace'a, związki lepko-sprężystości dla materiału anizotropowego w którym deformacje objętościowe są sprężyste.

Rozdział napisany przejrzyście. Nie mam krytycznych uwag merytorycznych. Uwagi dotyczą jedynie prezentacji, tj. autor stosuje notację indeksową więc zaskakująca jest

zależność (2.31) wykorzystująca inną notację. Przez całą pracę autor stosuje umowę sumacyjną ale nigdzie w pracy nie ma o tym wzmianki.

Rozdział 3 prezentuje oryginalne wyniki badań laboratoryjnych zrealizowanych przez autora w Laboratorium Mechaniki Skał Uniwersytetu Wisconsin-Madison. W badaniach tych próbki analizowanych skał poddawane były testom trójosiowego „sprężystego” ściskania oraz pełzania. Badania realizowane były dla różnych orientacji próbek, tj. równoległe oraz prostopadłe do płaszczyzn warstwowania. Oznaczone zostały wartości modułów Younga, w kierunku prostopadłym oraz równoległym do warstwowania, oraz wartości współczynnika Poissona. Następnie realizowano testy pełzania, dla pięciu różnych poziomów naprężenia różnicowego. Analogicznie jak dla „sprężystości”, próbki różnicowano ze względu na orientację płaszczyzn warstwowania. Identyfikację stałych materiałowych zrealizowano dla metody frakcjonalnego Maxwella. Do identyfikacji stałych materiałowych autor wykorzystał trzy podejścia, tj. z jednym elementem Scotta-Blaira oraz z szeregowym połączeniem elementu sprężystego z elementem Scotta-Blaira przy różnych historiach „wymuszenia” naprężenia. Nie udało się autorowi oznaczyć jednak wszystkich funkcji potrzebnych do pełnego opisu lepkosprężystości w przypadku transwersalnej izotropii. Udało się natomiast zidentyfikować wartość współczynnika Poissona w funkcji czasu trwania procesu.

Rozdział napisany jest bardzo klarownie. Nie znalazłem błędów merytorycznych. W prezentacji autor powinien wyraźnie podkreślić, że transwersalna izotropia to założenie „robocze”. Podczas obciążenia początkowa strukturalna transwersalna izotropia może być „zaburzana” przez anizotropię wywołaną stanem naprężenia (ang. induced anisotropy). Autor nie podaje również jakiej wielkości próbki były użyte do badań. Jest to istotne w przypadku próbek z wyraźnym warstwowaniem – wyniki eksperymentu może „zaburzać” tzw. efekt brzegu. Stałe materiałowe modelu frakcjonalnego Maxwella zostały wyznaczone w trzech, jakościowo różnych, podejściach. Skutkuje to znaczącymi różnicami w wartościach tych stałych. Ponadto badania laboratoryjne obarczone są również błędami pomiarowymi. Wydaje się wskazane sprawdzenie stabilności/wrażliwości procedury identyfikacji stałych materiałowych tego modelu.

Kolejne rozdziały pracy dotyczą zagadnień oceny stanu naprężenia w uwarstwionych, lepkosprężystych basenach sedymentacyjnych poddanych działaniu obciążeń tektonicznych oraz lodowcowych. Tę część pracy rozpoczyna rozdział czwarty w którym autor przywołuje podstawowe zjawiska/źródła naprężeń w litosferze. Omawiane są, między innymi, naprężenia: tektoniczne, zginające jak również naprężenia resztkowe. Następnie prezentowane są metody pomiarów „in situ” składowych naprężenia. W rozdziale tym autor przywołuje znane metody prezentując, bez zbędnych wzorów, ich podstawowe właściwości.

Rozdział piąty to przegląd metod predykcji stanu naprężenia w litosferze. Większość z tych metod bazuje na rozwiązaniu „uproszczonego” zadania brzegowego. Metody te różnicuje typ przyjętych związków konstytutywnych oraz warunków brzegowych. Większość z nich wykorzystuje liniowe związki sprężystości, lepkosprężystości lub porosprężystości. Rozwiązanie uzyskiwane jest przez „nałożenie” dodatkowych

ograniczeń na stan odkształcenia lub na wartość uogólnionego naprężenia – siła tektoniczna.

Rozdziały czwarty i piąty mają charakter przeglądu. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział szósty prezentuje autorską metodę modelowania stanu naprężenia w uwarstwionym sprężysto-lepkim masywie skalnym. Jako pierwsze zagadnienie autor rozważa stan naprężenia wywołany poziomą składową prędkości odkształcenia. Analizowany jest ośrodek liniowo sprężysty, liniowo lepki, ośrodek lepko-sprężysty Maxwella oraz frakcyjny model Maxwella. Uzyskane rozwiązania jednoznacznie wskazują na konieczność uwzględniania cech lepkich skał przy ocenie stanu naprężenia w litosferze. Kolejne analizy tego rozdziału dotyczą stanu naprężenia wywołanego „siłą tektoniczną”. Ponownie autor rozwiązuje sekwencję zagadnień brzegowych różnicowanych zastosowanym opisem matematycznym skał. Następnie formułuje nowe podejście w którym stan naprężenia jest konsekwencją występowania układu warstw o różnych właściwościach mechanicznych oraz lepkich. Ostateczne rozwiązanie jest konsekwencją zastosowania uogólnionej analogii Alfrey’a do rozwiązania „sprężystego”. W rozdziale tym formułuje ponadto rozwiązanie w warunkach płaskiego stanu odkształcenia. Zostanie ono wykorzystane w rozważaniach przedstawionych w ostatnim rozdziale pracy.

Rozdział napisany jest przejrzyście. Analizowane zagadnienia brzegowe nie są skomplikowane. Przedstawione rozwiązania nie budzą zastrzeżeń. Nie mam uwag krytycznych.

Rozdział 7 prezentuje autorskie rozwiązanie predykcji stanu naprężenia w sedymentacyjnym basenie bałtyckim wywołanym ostatnim zlodowaceniem. W zagadnieniu wykorzystano uproszczony profil litologiczny z właściwościami mechanicznymi i lepkimi skał oznaczonymi przez autora dysertacji w badaniach laboratoryjnych. Przyjęto izotropię właściwości wszystkich utworów skalnych tworzących profil litologiczny. Rozwiązanie uzyskano przyjmując właściwości skał jako liniowo sprężyste lub według frakcyjnego modelu Maxwella. Jako „wymuszenie” przyjęto proces zlodowacenia. Uzyskane rozwiązanie nie budzi zastrzeżeń. Szkoda, że autor nie dokonał analizy wrażliwości rozwiązania, tzn. jaki wpływ mają błędy oznaczenia stałych materiałowych modelu frakcyjnego Maxwella na ostateczne rozwiązanie, tj. predykcję stanu naprężenia w litosferze.

3. Ocena pracy

Recenzowana praca dotyczy zagadnienia niezwykle interesującego i ważnego, tj.: predykcji stanu naprężenia w litosferze. Autor zaproponował oryginalną metodę predykcji stanu naprężenia w bałtyckim basenie osadowym. Bazuje ona na uwzględnieniu w charakterystyce deformacyjnej skał ich cech lepkich w postaci związku konstytutywnego odpowiadającego frakcyjnemu modelowi Maxwella. Parametry skał autor wyznaczył wykonując sekwencję badań laboratoryjnych trójosiowego ściskania oraz pełzania. Badania te przeprowadził w Laboratorium Mechaniki Skał Uniwersytetu Wisconsin-Madison.

Przedstawione rozważania teoretyczne i analityczne, badania laboratoryjne, wykonane analizy porównawcze są oryginalnym osiągnięciem Autora. Prezentowane w pracy wyniki i stwierdzenia stanowią oryginalne rozwiązania problemu naukowego.

Recenzowana praca doktorska potwierdza również wiedzę autora z zakresu dyscypliny naukowej: Nauki o ziemi i Środowisku oraz Jego gotowość do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Wyszczególnione przez recenzenta, przy omawianiu treści rozprawy, uwagi krytyczne czynią jedynie pewien „niedosyt” co do prezentacji ale nie mają wpływu na jakość sformułowanych w dysertacji wniosków końcowych oraz na ostateczną bardzo pozytywną ocenę recenzowanej pracy.

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 i wnioskuję o dopuszczenie mgr Macieja Trzeciaka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt. "Laboratory measurements and viscoelastic constitutive modeling of rock creep with application to stress prediction in interplate sedimentary basins".

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'S. L. L. L.', is centered on the page. The signature is written in a cursive, flowing style.