

Chorzów, 25.02.2022r.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Mutke
Zakład Geologii i Geofizyki
Główny Instytut Górnictwa
Katowice, Plac Gwarków 1

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Fuławki na temat: „*Częstotliwość dominująca oraz składowe rotacyjne drgań sejsmicznych w analizie stateczności skarp*”

Podstawa wykonania recenzji

Podstawą wykonania recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z dnia 8 grudnia 2021 roku oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki PW, Pana dr hab. inż. Roberta Króla, prof. uczelni.

Ocena oryginalności problemu badawczego

W rozprawie doktorskiej pt. „*Częstotliwość dominująca oraz składowe rotacyjne drgań sejsmicznych w analizie stateczności skarp*” doktorant podjął się badania bardzo istotnego zagadnienia, jakim jest analiza stateczności skarp, poddanych dodatkowym obciążeniom dynamicznym. Z taką sytuacją mamy do czynienia we wszystkich obszarach występowania trzęsień Ziemi oraz w zagłębieniach górniczych, w których prowadzona eksploatacja złóż minerałów indukuje zjawiska sejsmiczne. Co prawda w literaturze przedmiotu znajdziemy wiele badań dotyczących tego zagadnienia, jednak w większości przypadków obliczenia prowadzone są w pseudostatycznym układzie obciążeń (przyłożona maksymalna amplituda przyspieszenia) oraz w odniesieniu wyłącznie do drgań translacyjnych. Doktorant w swojej rozprawie uwzględnił dwa dodatkowe parametry definiujące obciążenie sejsmiczne, a mianowicie częstotliwość i czas trwania drgań. Dynamiczna zmiana współczynnika stateczności skarp FS, wyznaczona została dzięki zastosowaniu oryginalnego podejścia hybrydowego, bazującego na metodzie równowagi granicznej (MRG) oraz metodzie elementów skończonych (MES). Jednak przede wszystkim, doktorant po raz pierwszy w przedmiotowych obliczeniach, uwzględnił nie tylko przemieszczenia translacyjne, ale również rotacje, które są

nieodłącznym elementem pola falowego i mogą mieć istotny wpływ na zachowanie się skarpy. Obliczenia przeprowadził dla rzeczywistych drgań rotacyjnych od wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w obszarze LGOM. Wszystkie opisane wyżej problemy badawcze są zagadnieniami oryginalnymi, a niektóre prezentowane w rozprawie rozwiązania są całkowicie nowatorskie.

Układ pracy

Rozprawa doktorska posiada 227 stron objętości. Zawiera ona osiem głównych rozdziałów, spis literatury obejmujący 165 pozycji, spis tabel z 21 pozycjami i spis rysunków z 164 pozycjami. Tekst rozprawy poprzedzony jest jej streszczeniem w języku polskim oraz spisem treści.

W rozdziale 1 doktorant opisał ogólne zagadnienia wiążące się z aktywnością sejsmiczną i trzęsieniami Ziemi, opisem metod obliczania stateczności skarp oraz przedstawił cel pracy. Rozdział 2 to opis sejsmiczności LGOM i analiza parametrów drgań rejestrowanych na zaporze OUOW Żelazny Most. W kolejnym rozdziale III przedstawiono metody i urządzenia do monitorowania drgań. Rozdział IV to pierwszy istotny rozdział obliczeniowy dotyczący wpływu częstotliwości drgań na stateczność skarp. W rozdziale V przedstawione są wyniki pilotażowych pomiarów drgań rotacyjnych na dwóch stanowiskach sejsmicznych zainstalowanych w LGOM, a w rozdziale 6 przedstawiono wzory predykcyjne do szacowania prędkości kątowej drgań w monitorowanym obszarze. Rozdział 7 to jeden z najważniejszych rozdziałów w pracy, opisujący opracowaną metodykę badań oraz wyniki obliczeń wpływu drgań rotacyjnych na skarpy (amplitud prędkości kątowej oraz częstotliwości drgań rotacyjnych). Na uwagę zasługuje rozdział 8 w którym przeprowadzono dyskusję wyników oraz sformułowano wnioski podsumowujące wykonane badania.

Przedstawiony układ pracy wydaje się być optymalny do rozwiązania postawionego celu pracy.

Należy z podkreślić, że w spisie literatury znajduje się kilka wartościowych pozycji, w których doktorant jest współautorem, publikowanych w czasopismach z *impact factor* lub na międzynarodowych konferencjach.

Ocena rozprawy doktorskiej

Doktorant nakreślił sobie ambitny cel pracy, którym jest *"określenie istotności wpływu częstotliwości dominującej drgań sejsmicznych oraz składowych obrotowych ruchu gruntu wymuszonego wskutek przejścia fali sejsmicznej na zachowanie skarp i zboczy z wykorzystaniem narzędzi do modelowania numerycznego, narzędzi statystycznych oraz rzeczywistych zapisów sejsmicznych wstrząsów wysokoenergetycznych zarejestrowanych w bliskim polu falowym"*. Weryfikację obliczeń stateczności skarp przeprowadzono w warunkach sejsmiczności LGOM, czyli

pod obciążeniem dynamicznym od zjawisk sejsmicznych indukowanych pracami górnictwami.

Należy jeszcze raz podkreślić, że funkcjonuje wiele metod obliczania stateczności skarp i duży wybór programów do analitycznego lub numerycznego modelowania zagadnienia (opisanych wyczerpująco przez doktoranta w rozdziale 1), ale praktycznie w literaturze przedmiotu opisane są obliczenia w układzie obciążeń statycznych, a w przypadku uwzględnienia obciążeń dynamicznych, rozwiązania ograniczają się głównie do pseudostatycznego układu obciążeń.

Doktorant opracował metodykę uwzględniania w obliczeniach stateczności skarp częstotliwość dominującą oraz czas trwania drgań, niezależnie od standardowych obliczeń pseudodynamicznych, uwzględniających tylko maksymalną amplitudę translacyjnego przyspieszenia/prędkości. Zastosował analizę zgodnie z zasadami planowania eksperymentu. Mgr inż. Krzysztof Fuławka przeprowadził obliczenia stateczności skarp stosując hybrydowe analityczno-numeryczne podejście, bazujące na metodzie (MRG) oraz metodzie (MES) i stosując opracowaną procedurę etapów określania współczynnika stateczności skarpy FS, z pośrednim uwzględnieniem częstotliwości drgań. Wykazał, że częstotliwość drgań ma istotny wpływ na zmiany naprężeń i przemieszczeń w obrębie skarpy, przy zachowaniu tej samej geometrii skarpy i własności materiałów z których jest zbudowana, natomiast czas trwania drgań ma wpływ niewielki. Dla analizowanego modelu skarpy obliczenia wykazały, że największe przemieszczenia miały miejsce w zakresie niskich częstotliwości 0.8-8Hz. Ten eksperyment obliczeniowy został dodatkowo potwierdzony obliczeniami w rozdziale 4.4, dla określonej geometrii skarpy i różnych częstotliwości drgań, ale przy amplitudach przyspieszenia w szerokim zakresie, tj. od 200 mm/s^2 do 3000 mm/s^2 .

Oryginalnym osiągnięciem doktoranta i pierwszym w świecie dla sejsmiczności indukowanej, jest wykonanie obliczeń wpływu drgań rotacyjnych na stateczność skarpy. W celu wykonania obliczeń, wprowadzono informacje na temat fal rotacyjnych do kodu obliczeniowego MES w programie Nei Nastran, wykorzystując parametry drgań zarejestrowane w LGOM. Uzyskany wynik modelowania wskazuje, że w przypadku niskich częstotliwości (rzędu 1 Hz) oraz dużych energii (rzędu $E9 \text{ J}$), przemieszczenia wynikające z zapisu rotacyjnego, były znacznie większe niż wyznaczone standardowymi metodami z zapisów translacyjnych.

Uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym

Wyniki obliczeń hybrydowych zostały wykorzystane do przeprowadzenia statystycznej analizy wpływu wybranych elementów (amplituda drgań, nachylenie skarpy, częstotliwość drgań i czas trwania drgań) na wartość współczynnika FS. Jednak przyłożone przyspieszenia wejściowe drgań PGA mieściły się jedynie w zakresie od 80 do 300 mm/s^2 . To bardzo małe obciążenia i prawdopodobnie

niezdolne wywołać większej reakcji w zachowaniu skarpy, co w zaplanowanym eksperymencie powoduje spadek współczynnika FS dla tego czynnika tylko o 0.2 i jego małą istotność. Czy zdaniem doktoranta zwiększenie zakresu wartości obciążenia PGA w powyższych badaniach, np. do 0.2g, mogłoby zmienić proporcje wpływu poszczególnych czynników na współczynnik stateczności FS?

Głębszej dyskusji i wyjaśnień wymagają wyniki pomiaru drgań rotacyjnych przy szybie R1. Przy zarejestrowanej amplitudzie prędkości drgań na poziomie $PGV=3.2$ mm/s od wstrząsu o energii $3.6E7$ J, prędkość drgań kątowych wyniosła aż $PRV=147$ mrad/s i jest to amplituda bardzo wysoka, praktycznie przekraczająca wartości znane z dotychczasowej literatury światowej. Takie wartości PRV wskazywałyby na sprzeczność, że drgania translacyjne PGV (niskie wartości) znalazły się już w polu dalekim, a wywołane nimi drgania rotacyjne (wysokie wartości PRV) są jeszcze w polu bliskim. Można przypuszczać, że lokalne miejsce instalacji czujnika wprowadziło tak dużą, nietypową odpowiedź prędkości kątowej drgań (np. reakcja postumentu). Proszę zwrócić uwagę, że na stanowisku VIIW zarejestrowano od wstrząsu $3.1E8$ J prędkość drgań wyższą, $PGV=4.5$ mm/s, a odpowiada jej prędkość kątowa drgań tylko $PRV=0.34$ mrad/s. Proszę doktoranta o ustosunkowanie się do powyższej uwagi oraz informacji dotyczącej miejsca pomiarowego i postumentu przy szybie R-1.

W rozdziale 6 recenzent zauważył kilka błędów, które należy poprawić przed publikacją wyników prezentowanych w rozprawie doktorskiej. Dotyczą one opisu rysunku 6.2 (powinno być składowych rotacyjnych a nie translacyjnych) oraz rysunków 6.5, 6.7, 6.13 i 6.15 na których oś pionowa powinna być opisana jako amplitudy prędkości obrotu (mrad/s).

Proszę o uściślenie informacji w jaki sposób doktorant wyznaczał parametr częstotliwości dominującej? Metodą odczytu wzrokowego maksymalnej wartości z wykresu FFT, czy stosując obliczenia wg. wybranej reguły matematycznej, np. wzoru na częstotliwość centralną ze spektrum Fouriera?

Ogólna ocena dysertacji

Niewątpliwie rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Fuławki wnosi nowatorskie rozwiązania do zagadnienia oceny stateczności skarp poddanych obciążeniu dynamicznemu. Opracowane przez doktoranta rozwiązania mogą być z powodzeniem wykorzystywane w codziennej praktyce prowadzonych obliczeń analitycznych i modelowań numerycznych. Odpowiadając na pytania ustawowe stwierdzam, że przedstawione w pracy badania stanowią oryginalne rozwiązane problemu naukowego. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą merytoryczną. Pokazał, że potrafi odpowiednio zaplanować badania, zaproponował nowe rozwiązania do uwzględniania częstotliwości drgań sejsmicznych na współczynnik stateczności

skarpy FS, a przede wszystkim do uwzględniania drgań rotacyjnych w procedurze obliczeniowej. W ten sposób udowodnił, że posiada umiejętności potrzebne do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Częstotliwość dominująca oraz składowe rotacyjne drgań sejsmicznych w analizie stateczności skarp*” jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Fuławki, spełnia warunki określone w art. 13, ustęp 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnoszę, aby Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, dopuściła Pana mgr inż. Krzysztofa Fuławkę do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

