

Wrocław, 29 listopada 2021 r.

mgr inż. Krzysztof Fuławka

Promotor: prof. dr hab. inż. Witold Pytel

Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Mertuszka

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Częstotliwość dominująca oraz składowe rotacyjne drgań sejsmicznych w analizie stateczności skarp

Zagadnienie prawidłowej oceny stateczności skarp i zboczy poddanych dodatkowym obciążeniom dynamicznym jest jednym z kluczowych problemów stawianych współczesnej geotechnice. Mimo, intensywnego rozwoju metod monitoringu stateczności obiektów geotechnicznych oraz ciągłego wzbogacania metod numerycznych o bardziej skomplikowane algorytmy obliczeniowe, katastrofalne w skutkach awarie skarp obserwowano w ostatniej dekadzie z częstotliwością większą niż trzy zdarzenia na rok. W związku z tym należy przeanalizować czy aktualnie stosowane metody szacowania ryzyka funkcjonowania tego typu obiektów z wykorzystaniem popularnych metod analizy stateczności skarp są rozwiązaniem wiarygodnym oraz czy dane, które są bazą do wykonania obliczeń w pełni odwzorowują rzeczywistą charakterystykę np. obciążenia sejsmicznego generowanego trzęsieniami ziemi czy wstrząsami górnictwami. Analizując aktualne osiągnięcia w zakresie obliczeń stateczności obiektów geotechnicznych można zaobserwować, że większość obliczeń wykonywanych jest w pseudostatycznym układzie obciążeń, tj. w oparciu wyłącznie o maksymalną amplitudę przyspieszenia/prędkości/przemieszczenia drgań sejsmicznych mimo faktu, iż dostępne są metody umożliwiające przeprowadzenie szczegółowej analizy numerycznej w układzie dynamicznym, zarówno w dwóch jak i trzech wymiarach. Co więcej, wszystkie obliczenia stateczności skarp wykonywane nie tylko w Polsce, ale również na całym świecie, bazują wyłącznie na translacyjnych składowych ruchu sejsmicznego. Obrót sejsmiczny jest w analizach tego typu całkowicie pomijany. Taka sytuacja wynika bezpośrednio z faktu, iż aparatura do bezpośrednich pomiarów sejsmicznego ruchu obrotowego jest od niedawna dostępna na rynku i brakuje jeszcze danych w zakresie wielkości obrotu sejsmicznego generowanego zarówno sejsmicznością indukowaną jak i naturalną.

W pierwszej części niniejszego opracowania dokonano analizy istotności wpływu częstotliwości dominującej drgań sejsmicznych na naprężenia i przemieszczenia w skarpie, w warunkach występowania górnictw wstrząsów sejsmicznych zlokalizowanych w bliskim polu falowym względem analizowanego obszaru, poprzez zastosowanie obliczeń dynamicznych w metodzie elementów skończonych. Następnie wykorzystując metodę planowania eksperymentu i metodę

statystyczną powierzchni odpowiedzi określono wpływ parametrów definiujących obciążenie sejsmiczne tj. amplitudy, czasu i częstotliwości na zmianę współczynnika stateczności (FS). Dynamiczna zmiana współczynnika FS, dla każdego z analizowanych układów, wyznaczona została dzięki zastosowaniu podejścia hybrydowego bazującego na metodzie równowagi granicznej (MRG) oraz metodzie elementów skończonych (MES). W oparciu o wyniki obliczeń numerycznych, analitycznych oraz analizy statystycznej opracowano procedurę wyznaczania dynamicznej zmiany współczynnika FS poprzez zastosowanie hybrydowego podejścia MRG-MES, będącej w zgodzie z Polskimi i Europejskimi regulacjami prawnymi.

W drugiej części opracowania przeanalizowano możliwość implementacji składowych rotacyjnych drgań sejsmicznych do obliczeń numerycznych. Informacje nt. wielkości obrotu sejsmicznego, częstotliwości dominującej składowych obrotowych drgań sejsmicznych oraz czasu trwania ruchu obrotowego indukowanego przejściem fali sejsmicznej określono w oparciu o wyniki pilotażowych, 11-miesięcznych pomiarów sejsmicznych przeprowadzonych rejonie LGOM w roku 2019. W sumie zarejestrowano 39 wstrząsów wysokoenergetycznych w odległościach epicentralnych od 300 m do 10 000 m. Na podstawie zebranych danych opracowano wzory predykcyjne, będące podstawą do szacowania wielkości obrotu w oparciu o informację w zakresie energii i odległości zdarzenia sejsmicznego od stanowisk pomiarowych. Wykorzystanie tych równań umożliwiło zasymulowanie rotacji obiektu na podstawie informacji o energii i lokalizacji wstrząsu. Następnie, wykorzystując równania Rayleigha, podjęto próby implementacji składowych rotacyjnych drgań do obliczeń numerycznych wykonanych metodą elementów skończonych w środowisku Nei Nastran. Ze względu na ograniczenia programowe, obrót sejsmiczny został uwzględniony w obliczeniach w sposób pośredni, tj. bazując na zapisie obrotowym, wyznaczono maksymalne wartości przemieszczeń translacyjnych wynikających z obserwowanego przechylenia gruntu, a te ostatecznie zostały wykorzystane w kodzie obliczeniowym. Dla wszystkich zarejestrowanych wstrząsów wysokoenergetycznych określono amplitudę przemieszczeń wynikających z zapisu rotacyjnego oraz wielkość przemieszczeń wynikających ze standardowych zapisów translacyjnych. Porównując oba wyniki, opracowano kryterium, determinujące istotność składowych rotacyjnych w analizie stateczności skarp w zależności od energii wstrząsu i częstotliwości dominującej drgań sejsmicznych. Ostatecznie wykazano, że istnieje możliwość pośredniego uwzględnienia składowych rotacyjnych drgań sejsmicznych w numerycznych kodach obliczeniowych, oraz że w przypadku wstrząsów o dużych energiach, rzędu E9 J i wyższych, charakteryzujących się niską częstotliwością dominującą drgań, składowe rotacyjne mogą pełnić kluczową rolę w analizie stateczności skarp, i nie powinny być pomijane.

Metody i procedury przedstawione w niniejszej pracy były opracowane dla warunków sejsmiczności indukowanej w warunkach LGOM, niemniej zaprezentowane podejście jest rozwiązaniem uniwersalnym i z powodzeniem może być wykorzystane do analiz stateczności w innych regionach występowania naturalnej bądź antropogenicznej aktywności sejsmicznej.

Krzysztof Fijałkowski