

Analiza numeryczna zachowania się skarpy gruntowej w warunkach zadanych wymuszeń dynamicznych

Numerical analysis of behaviour of ground slope under specified dynamic inputs

mgr inż. Paweł Okroj (ORCID: 0009-0009-9607-2458), Wibro-Projekt Tychy,
prof. dr hab. inż. Jacek Hulimka (ORCID: 0000-0002-7798-4277), Politechnika Śląska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3604

Streszczenie: W artykule przedstawiono proponowaną metodę szacowania stateczności skarp gruntowych narażonych na oddziaływania dynamiczne w efekcie prowadzonych w pobliżu prac. Omówiono założenia metody oraz sposób weryfikacji uzyskanych wyników metodą porównania efektów analizy MES z wynikami bezpośrednich pomiarów drgań wierzchniej płaszczyzny gruntu w pobliżu frontu prac. Proponowaną metodę zilustrowano wynikami przykładowych analiz dla dwóch różnych gruntów budujących skarpe.

Słowa kluczowe: skarpa, stateczność, wpływy dynamiczne, drgania, bezpieczeństwo, analiza MES.

Abstract: The paper presents a proposed method for estimating the stability of ground slopes subjected to dynamic inputs as a result of work carried out nearby. The assumptions of the method and the verification procedure of the obtained results by comparison of the effects of FEM analysis with the results of direct measurements of vibrations of the topsoil plane in the vicinity of the work front are discussed. The proposed method is illustrated with the results of exemplary analyses for two different soils forming the slope.

Keywords: slope, stability, dynamic inputs, vibration, safety, FEM analysis.

1. Wprowadzenie

Pomiary drgań mechanicznych są jedną z metod diagnostycznych, umożliwiających ocenę dynamicznego zachowania się budynków lub budowli inżynierskich narażonych na obciążenie zmienne w czasie, skutkujące pojawieniem się odpowiedzi dynamicznej tych obiektów [1]. W przypadku konstrukcji zbudowanych z materiałów przenoszących rozciąganie, bogata literatura proponuje wtedy mniej lub bardziej skomplikowane, adekwatne rozwiązania. W przypadku obiektów zbudowanych w całości z materiałów nieprzenoszących rozciągania, o istotnie zróżnicowanej płaszczyźnie wierzchniej (których reprezentantem może być tytułowa skarpa gruntowa), dla zamierzonego rozważania zjawiska wpływu dynamicznego aktualna literatura jest bardzo oszczędna. Nie może to jednak być powodem, by bazować wtedy tylko na przybliżeniach statycznych, bowiem wpływ zastępczego obciążenia statycznego różni się diametralnie od wpływu obciążenia dynamicznego [2]. Z tego powodu, podobnie jak dla układów opartych na wibroizolacji, podkreśla się za [2]: „...ocena wpływów obciążeń dynamicznych nigdy nie powinna być intuicyjna. Dlatego też kontrola i monitoring jest procedurą, którą należy wdrażać na obiektach, których stateczność może być zagrożona”. Przed wyborem sposobu analizy problemu warto mieć przed oczyma następujące stwierdzenie, zamieszczone w [2]: „...często przyjmowanym

uproszczeniem, pozwalającym na określenie stanu naprężenia, a nawet operowanie równaniami równowagi sił, jest założenie powierzchni poślizgu o określonym kształcie i przebiegu. Uproszczenie to może być jednak przyczyną powstania nawet bardzo poważnych błędów”. Konkludując, uważa się, że prawidłowo wykonana analiza skarpy obciążonej w sposób dynamiczny powinna być przeprowadzona z posłkowaniem się obliczeniami numerycznymi, co staje się już zwyczajowe nawet podczas analizy wpływów czysto statycznych lub obciążeń dynamicznych w ujęciu quasistatycznym [3]. Natomiast wspomniane na wstępie pomiary drgań powinny służyć zarówno prawidłowej identyfikacji przyjętego modelu numerycznego (model konstrukcji i model obciążenia), jak i ocenie faktycznych wpływów dynamicznych przekazywanych na analizowany obiekt, umożliwiając wiarygodne szacowanie jego stateczności.

Starając się uzupełnić istniejące w publikacjach luki w zakresie inżynierskiego szacowania stateczności skarp obciążonych wytypowanymi wpływami dynamicznymi, z uwzględnieniem analizy zjawisk fizycznych i prostym sposobem identyfikacji prawidłowości wykonanego modelu cyfrowego, proponuje się poniżej autorską metodę potraktowania tego zagadnienia. Przyjęte wnioski stanowią podstawę do bezpiecznego uzgodnienia funkcjonowania rozważanego obciążenia dynamicznego w danych warunkach.

2. Opis proponowanej metody

Stwierdzenie, że skarpa jest stateczna dla aktualnego zestawu obciążeń informuje, że w takim stanie obciążeń nie dojdzie do grawitacyjnego osuwania się mas ziemnych, a zatem powstawania osuwisk. Występują one wtedy, gdy nastąpi przekroczenie wytrzymałości gruntu na ścinanie wzdłuż dowolnej (ale ciągłej) powierzchni fragmentu masywu gruntowego, zwanej powierzchnią poślizgu [4]. Procesy takie mogą być wywołane siłami przyrody lub działalnością człowieka. Niniejsze opracowanie poświęcono efektowi jednej z aktywności człowieka, mianowicie prowadzeniu robót inżynierskich, w szczególności wibracyjnemu wbijaniu grodzic, powodującemu powstawanie fal parasejsmicznych lub – ogólniej – fal sprężystych i ich wpływowi na stateczność skarpy.

Miarą stateczności skarpy, przykładowo za pozycją [3], jest wartość globalnego wskaźnika stateczności, nazywanego dalej FOS. Jest on stosunkiem sumy sił utrzymujących skarpe (tarcie, spójność materiału) do sumy sił obciążenia (siły grawitacyjne, siły filtracji). Obecnie do obliczeń FOS stosuje się metody numeryczne, przykładowo algorytm SRM, polegający na stopniowym zmniejszaniu wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu (Φ_u , c_u) oraz niezwłocznym analizowaniu przemieszczeń węzłów modelu skarpy, aż do wykazania utraty jej stateczności [5]. W zależności od wymienionych niżej przedziałów wartości FOS możemy jednoznacznie określić, czy poddane analizie zbocze lub skarpa, uwzględniając charakterystyczne wartości materiałowe i obciążenia, znajdują się w stanie równowagi:

- FOS < 1,0 – zbocze lub skarpa niestateczne,
- FOS = 1,0 – zbocze lub skarpa w chwilowej stateczności,
- FOS > 1,0 – zbocze lub skarpa stateczne.

Nadwyżka wartości FOS ponad wartość: 1,0 (np. 1,30), w funkcji przeznaczenia badanego terenu i jego obciążenia, jest koniecznym współczynnikiem bezpieczeństwa [3].

Szersza dyskusja powinna być poświęcona wspomnianemu powyżej współczynnikowi bezpieczeństwa skarpy. Pozycja [6] informuje, że: „wskaźniki stateczności skarp i zboczy określone indywidualnie metodami podanymi w Polskich Normach nie powinny być mniejsze niż 1,50”. Biorąc pod uwagę fakt, że wytyczne te odnoszą się do „dróg publicznych”, a zatem struktur niezwykle odpowiedzialnych, obciążonych w sposób dynamiczny i wielocyklowy, można przyjąć podaną wartość wskaźnika stateczności jako miarodajną także dla obciążonych dynamicznie skarp ogólnego użytkowania. Jednak panuje przekonanie, wyrażone przykładowo w pracy [7], że proponowana wyżej wartość wskaźnika stateczności, w świetle wymogu stosowania przy obliczaniu tego wskaźnika obliczeniowych wartości sił i parametrów geotechnicznych, jest zdecydowanie zbyt konserwatywna. Wydaje się, że kompromisem może być zastosowanie się do wytycznych podanych w pozycji [8], mówiących: „W obliczeniach prowadzonych przy

zastosowaniu efektywnych parametrów charakterystycznych i wyznaczonym globalnym wskaźniku stateczności należy wykazać, że dla obiektów drogowych spełniony jest warunek $FS \geq 1,5$ ”. Należy wspomnieć, za pozycją [9], że w cytowanych wytycznych do ciężaru własnego gruntu stosowany jest częściowy współczynnik obciążeń równy 1,0, co eliminuje potrzebę interpretacji charakteru aktualnego wpływu ciężaru gruntu na jego stateczność. Jest to akceptowalne przy występowaniu obciążeń wyjątkowych, czy też awaryjnych [7]; wspomniany współczynnik częściowy sprawdza się też przy występowaniu obciążeń dynamicznych.

W pracy [2] sugerowane są dwa następujące sposoby uwzględnienia wpływu obciążenia dynamicznego na stateczność skarpy:

- rozważanie zagadnienia, bazujące na sprowadzeniu go do definicji drugiej zasady dynamiki Newtona – co jest rozwiązaniem szczególnym, dedykowanym gruntom mało wrażliwym na zjawiska sejsmiczne,
- rozważanie zagadnienia, bazujące na analizie rozchodzenia się fal sprężystych w ośrodku gruntowym – co jest rozwiązaniem ogólnym, bez względu na sejsmiczną wrażliwość gruntów.

W celu uogólnienia zagadnienia zdecydowano o prowadzeniu dalszych rozważań bazując na analizie rozchodzenia się fal, z wykonaniem zasadniczych obliczeń przy użyciu dedykowanego zagadnieniom geotechnicznym programu MIDAS GTS NX, wykorzystującego metodę elementów skończonych (MES). Tym samym konieczne jest zastąpienie ośrodka ciągłego (continuum), jakim jest w rzeczywistości model fizyczny całego gruntu, modelem dyskretnym. Wielkości fizyczne tego modelu nie są rozłożone w sposób ciągły, lecz są skupione w podobozszarach powstałych wskutek dyskretyzacji, co znacznie upraszcza zamierzone obliczenia.

Biorąc pod uwagę potrzebę weryfikacji stateczności skarpy, czyli określenia możliwego mechanizmu zniszczenia modelu konstrukcji, analiza obliczeniowa musi być prowadzona jako nieliniowa. Precyzyjny opis alternatywnych opcji analizy nieliniowej jest zawarty w pracy [10].

Starając się ograniczyć do akceptowalnej wielkości czas obliczeń oraz rozmiar pliku wynikowego przyjęto, że budowany będzie model dwukierunkowy (2D), a zatem obliczenia będą prowadzone w stanie: „Płaski Stan Odkształceń”. W celu uzyskania precyzji wyników porównywalnej z uzyskanymi z modelu trójwymiarowego (3D) postawiono za [8] założenie, że każdorazowo analizowany przekrój przez skarpe powinien być prostopadły do jej powierzchni (zachowanie liniowości skarpy w kierunku prostopadłym do przekroju). Budując geometrię charakterystycznego przekroju przez skarpe, należy pamiętać o tym, by wymiary podłoża pod skarpe oraz podział skarpy na elementy skończone przyjmować w funkcji jej wymiarów. Wielkość geometrii całego masywu gruntowego należy dobrać tak, by wykluczyć wpływ warunków brzegowych na wyniki.

Do opisu wszystkich materiałów gruntowych należy stosować model sprężysto-idealnie plastyczny z powierzchnią zniszczenia Coulomba-Mohra (w nawiązaniu do decyzji o prowadzeniu analizy nieliniowej), podobnie jak w pracy [5]. Geotechniczne parametry poszczególnych warstw należy pozyskiwać z dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla rozważanego rejonu, a w przypadku jej braku – na podstawie wartości podanych w pozycji [11], jako charakterystycznych. W przypadku występowania zawodnienia i braku sprawnie działających drenaży uwzględnić należy sugestie podane w pracach [2], [8], w tym:

- ustalenie, czy stateczność skarpy jest wymagana w warunkach krótko-, czy też długotrwałych, co ma wpływ na określenie warunków prowadzenia analizy (odpowiednio: „bez odpływu”/„z odpływem”),
- określenie parametrów geotechnicznych efektywnych, zamiast całkowitych.

Podparcie masywu powinno wykluczyć przemieszczenia pionowe oraz poziome, uwzględniając pochłanianie sygnałów na granicy jego podparć.

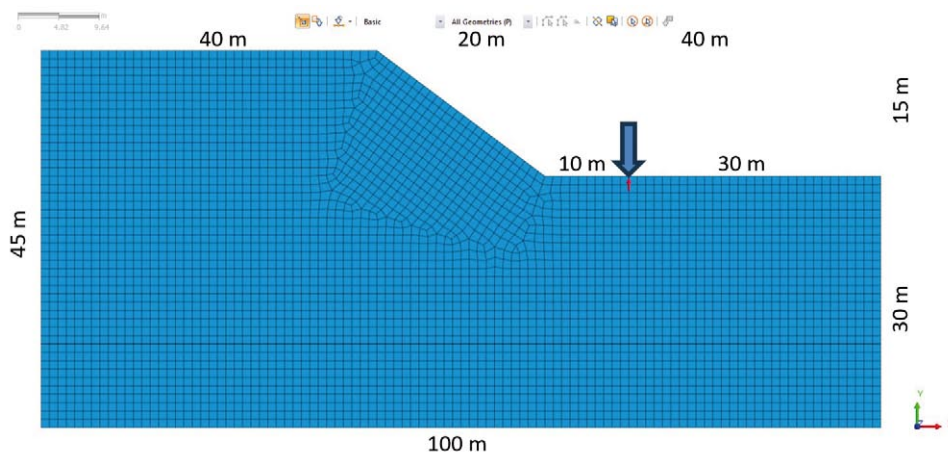
W ramach obciążeń należy rozważać ciężar własny, ewentualny ciężar naziomu oraz obciążenie dynamiczne (tu: wibracyjne wbijanie grodzic w gruncie), aplikowane w przewidzianej minimalnej odległości od podstawy skarpy. Znając zakres nominalnego widma sygnału wymuszającego, zadeklarować w nim należy jego wybrane pasma, dla których będą prowadzone obliczenia.

Tłumienie w modelu należy deklarować poprzez specyfikację tłumienia materiałowego oraz powiązanego z nim tłumienia proporcjonalnego. Należy tu zdawać sobie sprawę z faktu, że stosowany w programie algorytm macierzy tłumienia dopuszcza niedokładności podczas obliczania tłumienia modalnego [12], będące jednak, przy innych zastosowanych niedokładnościach, akceptowalne.

Obliczenia należy prowadzić w trybie nieliniowej (o czym już wspomniano) analizy całkowania równań ruchu dla wytypowanych, wyżej sugerowanych pasm częstotliwości.

Identyfikację prawidłowości modelu widma obciążenia należy prowadzić w przyjętym punkcie konstrukcji (przykładowo w narożnym punkcie korony skarpy), porównując widmo sygnału tam otrzymanego w ramach obliczeń, z założonym widmem wymuszenia.

Identyfikację prawidłowości przyjętego modelu cyfrowego konstrukcji z rzeczywistością należy prowadzić w przyjętym, łatwo dostępnym in situ punkcie konstrukcji (przykładowo w wybranym punkcie u podstawy skarpy), porównując amplitudę



Rys. 1. Geometria przekroju zamodelowanej skarpy

sygnału tam otrzymanego w ramach obliczeń z amplitudą pomiarową podczas prób robót, dodatkowo z weryfikacją widma. Istotną uwagą, jest konieczność stabilizowania stanowiska pomiarowego „sztywno” na wierzchniej płaszczyźnie gruntu.

3. Przykłady praktyczne

W celu praktycznego przedstawienia opisanej powyżej metody zaprezentowano dwa przykłady. Są one niemal identyczne, lecz różnią się między sobą parametrami gruntu budującego strukturę modelu. Zamodelowane zostały w programie MIDAS GTS NX i przedstawiają skarpy ziemną o wymiarach pokazanych na rysunku 1. Widać tam również lokalizację siły dynamicznej w stosunku do podstawy skarpy (opis w dalszym tekście).

Ponieważ przykłady nie nawiązują do faktycznej sytuacji, parametry geotechniczne ich struktur gruntowych (efektywne parametry charakterystyczne) przyjęto z literatury (tab. 1).

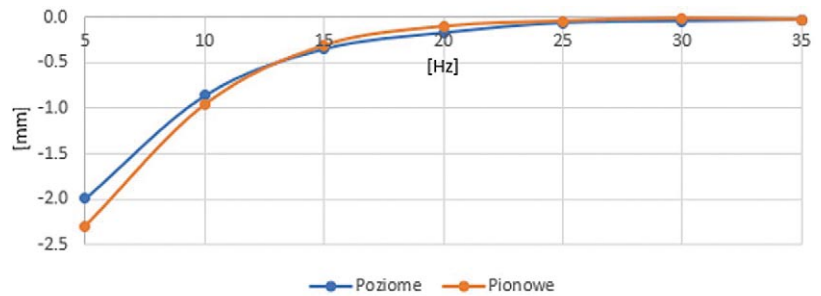
Tabela 1. Parametry geotechniczne przyjęte w rozpatrywanych modelach

	Model: IŁY	Model: GLINY
Struktura	ujednolicona	ujednolicona
Zawodnienie	brak	brak
Opis	iły pylaste twardoplastyczne	gliny zwięzłe twardoplastyczne
Model konstytutywny	Coulomb-Mohr	Coulomb-Mohr
Moduł Younga E [kPa]	17000	25000
Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	18,63	20,60
Współczynnik Poissona ν [-]	0,37	0,29
Spójność c_u [kPa]	55	30
Kąt tarcia wewnętrznego Φ_u [°]	12,0	17,5

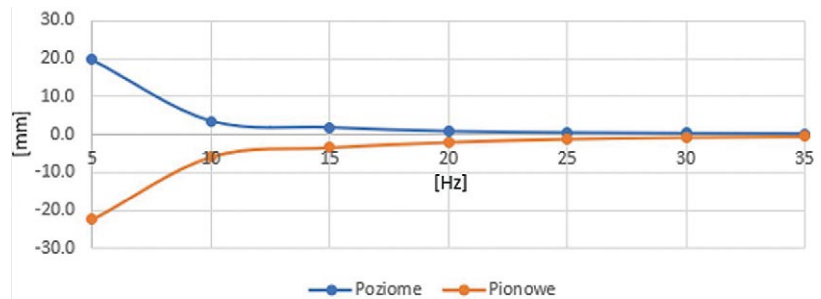
Podparcie masywu na wszystkich płaszczyznach bocznych oraz dolnej zamodelowano jako sprężyste, z tłumieniem na granicy linii podparć.

W ramach obciążeń uwzględniono ciężar własny gruntu oraz obciążenie od siły dynamicznej, wynikającej z wibracyjnego pograżania grodzic. W niniejszym przykładzie rozważono tylko jedną rzędną oparcia stopy grodzicy – na powierzchni terenu, w określonej odległości od podstawy skarpy. Częstotliwość nominalna wibromłota rzędu 40 Hz oraz typowa możliwa redukcja tej częstotliwości w funkcji parametrów gruntu pozwoliły, by zakres obliczeń przyjętą w widełkach 15–35 Hz, ze skokiem co 5 Hz; w trakcie obliczeń zakres ten jednak rozszerzono o 5 oraz 10 Hz. Model obciążenia przyjęto jako sinusoidalny ze stałą liczbą obrotów i stałą siłą dynamiczną, ze specyfikacją czasu trwania takiego stanu ustalonego, z nagłym zatrzymaniem obrotów (bez wybiegu). Siłę niezrównoważoną przyjęto jako nominalną dla rodzaju wibromłota.

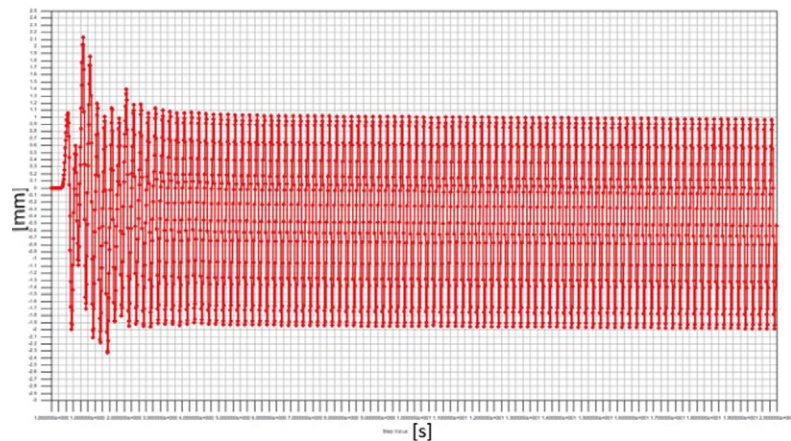
Przyjęto wartość współczynnika bezpieczeństwa skarpy jako 1,5. Tłumienie w modelu zadeklarowano jako materiałowe oraz proporcjonalne. Analizy obliczeniowe wykonano jako nieliniowe całkowanie równań ruchu. Obliczenia dla obydwu modeli prowadzono w podziale na etapy, sprawdzając przy tym ich „ciągłość” w trakcie analizy otrzymywanych wyników. Nie dokonano przy tym identyfikacji prawidłowości modelu cyfrowego z rzeczywistym obiektem (realizowaną zwykle na podstawie analizy wyników pomiaru drgań in situ), ponieważ jak już wspomniano, przykłady nie nawiązują do faktycznej sytuacji. Po wykonanych obliczeniach analiz czasowych w kolejnych pasmach (5–35 Hz, co 5 Hz) dla obydwu modeli (IŁY, GLINY), jeszcze przed szacowaniem stateczności odfiltrowano wyniki odpowiedzi dynamicznej punktu narożnego korony skarpy. Skatalogowano ją, specyfikując dla obu kierunków prostych (X – poziomo, Y – pionowo) oraz kierunku złożonego (X-Y) przemieszczenie osi wokół której odbywają się drgania względem położenia początkowego [mm] i ich amplitudę [mm]. Graficzną interpretację wyników, w zakresie przesunięć osi oraz odpowiadających im drgań w kierunkach prostych X i Y dla obydwu modeli (IŁY, GLINY) pokazano na rysunkach 2 i 3.



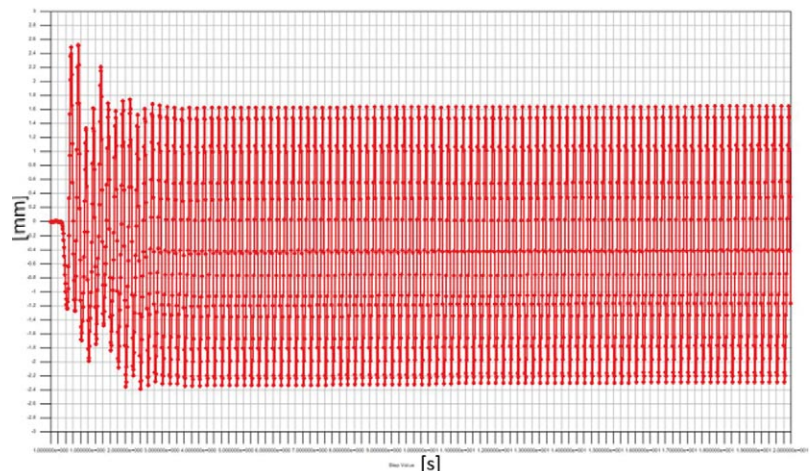
Rys. 2. Ekstremalne amplitudy przemieszczeń prostych podczas drgań ustalonych dla kolejnych pasm częstotliwości w modelu IŁY



Rys. 3. Ekstremalne amplitudy przemieszczeń prostych podczas drgań ustalonych dla kolejnych pasm częstotliwości w modelu GLINY



Rys. 4. Proces stabilizacji sygnału poziomego 5 Hz po 100 impulsach w modelu IŁY



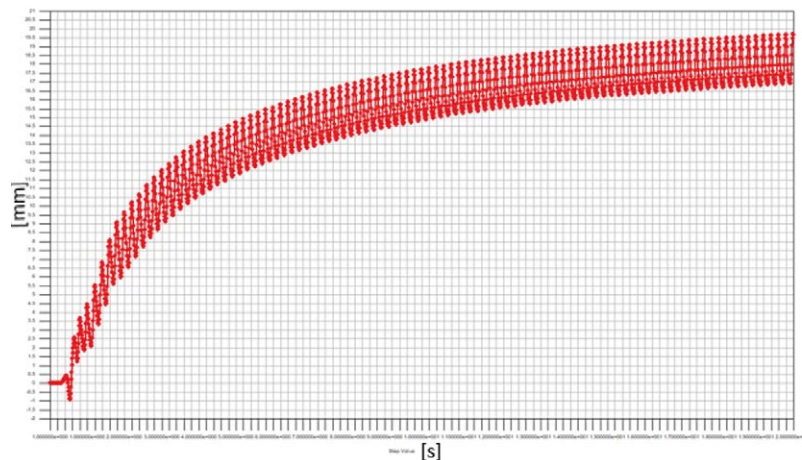
Rys. 5. Proces stabilizacji sygnału pionowego 5 Hz po 100 impulsach w modelu IŁY

Zamieszczone rysunki nie informują o procesie stabilizacji sygnału w punkcie ich analizy, a zatem o miarodajności tych wyników. Okazało się, że w jednym przypadku, mianowicie w paśmie 5 Hz dla modelu GLINY, w okresie 100 początkowych impulsów nie doszło do ustabilizowania się drgań ani w kierunku poziomym, ani w pionowym. Sytuację gdy sygnał w obydwu rozpatrywanych kierunkach jest już ustabilizowany przedstawiono na rysunkach 4 i 5, natomiast rysunki 6 i 7 są dowodem wyżej wspomnianego braku stabilizacji.

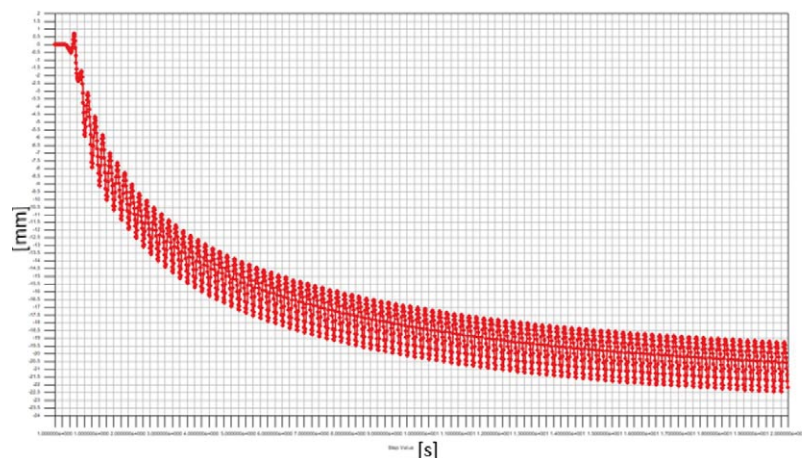
Po zakończeniu analizy statycznej oraz po zadeklarowanych czasach trwania nieliniowej analizy całkowania równań ruchu, wykonywane były analizy SRM (obliczenie aktualnej stateczności skarpy). Finalne szacowanie stateczności skarpy, poprzez specyfikację dla niej wartości FOS, opierało się na rozważaniu wyników przemieszczeń w kierunku złożonym X-Y punktu narożnego korony skarpy – co pokazują, wraz z komentarzem dotyczącym stabilizacji sygnału drganiowego, wartości w tabelach 2 i 3.

Wnioski z wyników wykonanych obliczeń z przypomnieniem, że uzyskano je dla przypadku gruntów niezawodnionych zaprezentowano poniżej.

- Jeśli spada spójność gruntu (tymczasowo zaniebując wpływ wymuszającej



Rys. 6. Proces stabilizacji sygnału poziomego 5 Hz po 100 impulsach w modelu GLINY



Rys. 7. Proces stabilizacji sygnału pionowego 5 Hz po 100 impulsach w modelu GLINY

Tabela 2. Wyniki analizy SRM dla modelu: IŁY

Specyfikacja przypadku obciążenia	Styczna stateczność skarpy FOS/ przemieszczenia [mm]	Stabilizacja sygnału po 100 impulsach	Dynamiczna stateczność skarpy FOS/ przemieszczenia [mm]
Statyka	1,76/164	-	-
Dynamika: 5 Hz	-	Występuje (rys. 4, 5)	1,10/5,7
Dynamika: 10 Hz	-	Występuje	1,40/26,8
Dynamika: 15 Hz	-	Występuje	1,72/163,6
Dynamika: 20 Hz	-	Występuje	1,74/181,5
Dynamika: 25 Hz	-	Występuje	1,74/169,1
Dynamika: 30 Hz	-	Występuje	1,74/165,8
Dynamika: 35 Hz	-	Występuje	1,76/193,8

Tabela 3. Wyniki analizy SRM dla modelu: GLINY

Specyfikacja przypadku obciążenia	Styczna stateczność skarpy FOS/ przemieszczenia [mm]	Stabilizacja sygnału po 100 impulsach	Dynamiczna stateczność skarpy FOS/ przemieszczenia [mm]
Statyka	1,34/107	-	-
Dynamika: 5 Hz	-	Brak (rys 6, 7)	1,04/30,7
Dynamika: 10 Hz	-	Występuje	1,24/66,7
Dynamika: 15 Hz	-	Występuje	1,32/112,6
Dynamika: 20 Hz	-	Występuje	1,32/115,1
Dynamika: 25 Hz	-	Występuje	1,34/139,7
Dynamika: 30 Hz	-	Występuje	1,34/136,7
Dynamika: 35 Hz	-	Występuje	1,34/139,7

częstotliwości sygnału), rośnie odległość położenia osi wokół której odbywają się drgania punktu narożnego korony skarpy w kierunku spadku skarpy, tu: $+X/w$ kierunku grawitacyjnym, $-Y$ (oznaczenia według rysunku 1), przy porównywalnej wartości amplitud drgań. Zatem, im mniejsza jest spójność, tym bardziej zgubny na stateczność skarpy jest wpływ grawitacji. Przy odpowiednio niskiej spójności gruntu, dodatkowo przy istotnej „stromości” skarpy, dużo wcześniej traci ona swą stateczność na skutek „zsunięcia” się jej górnego fragmentu, niż może dojść do uplastycznienia jej przekroju.

- Jeśli spada częstotliwość wymuszającego sygnału dynamicznego (rozważając zakres 5–35 Hz), tymczasowo zaniebując wpływ spójności gruntu, to rośnie odległość położenia osi wokół której odbywają się drgania punktu narożnego korony skarpy w kierunku spadku skarpy, tu: $+X/w$ kierunku grawitacyjnym, $-Y$ (oznaczenia wg rysunku 1), przy rosnącej wartości amplitud drgań. Zatem, im mniejsza jest częstotliwość sygnału dynamicznego (rozważając zakres 5–35 Hz), tym bardziej zgubny na stateczność skarpy jest wpływ grawitacji. Przy odpowiednio niskiej częstotliwości sygnału, dodatkowo przy istotnej „stromości” skarpy, dużo wcześniej traci ona swą stateczność na skutek „zsunięcia” się jej górnego fragmentu, niż może dojść do uplastycznienia jej przekroju.

- Podsumowując i uogólniając powyższe dwie uwagi można uznać, że:

- jednoczesne występowanie niskiej spójności gruntu oraz niskiej wymuszającej częstotliwości sygnału (w rozpatrywanym tu zakresie) sprzyja odpowiednio niskiej odporności skarpy, objawiającej się utratą stateczności na skutek zsunienia się górnego jej fragmentu, zanim pojawi się uplastycznienie jej przekroju;

- jednoczesne występowanie wysokiej spójności gruntu oraz wysokiej wymuszającej częstotliwości sygnału (w rozpatrywanym tu zakresie) sprzyja odpowiednio wysokiej odporności skarpy, objawiającej się utratą stateczności dopiero na skutek uplastycznienia jej przekroju.

- Dodatkowo, wraz ze wzrostem wymuszającej częstotliwości sygnału (w rozpatrywanym tu zakresie), bez względu na wartość spójności gruntu, stateczność skarpy rośnie i staje się coraz bardziej porównywalna z jej statecznością rozważaną bez istnienia siły dynamicznej, czyli w warunkach obciążeń statycznych, jakkolwiek przy nieco większych przemieszczeniach.

- Nawiązując do celu niniejszego tekstu, czyli do inżynierskiego oszacowania stateczności skarpy obciążonej wytypowanymi wpływami dynamicznymi, wartości obliczonych wskaźników FOS podane w tabelach 3 i 4 należy porównać z wartością przyjętego współczynnika bezpieczeństwa skarpy (tu wstępnie przyjęto wartość 1,5). Częstotliwości z tabeli, dla których obliczony wskaźnik FOS jest mniejszy od przyjętego współczynnika bezpieczeństwa, trwale eliminują je z zakresu dopuszczalnych częstotliwości pracy

obciążenia dynamicznego, co powinno być restrykcyjnie kontrolowane podczas monitoringu drgań w trakcie trwania robót. Natomiast pozostałe częstotliwości mogą być dopuszczone do pracy jako bezpieczne dla skarpy, podczas trwania tych robót.

- W praktyce prawidłowość wykonanych analiz numerycznych powinna być każdorazowo potwierdzona w drodze porównania amplitud wyliczonych z pomierzonymi w podczas trwania robót, w odpowiednio przyjętym punkcie pomiarowym w pobliżu miejsca prowadzenia prac. W przypadku braku odpowiedniej zgodności należy zweryfikować parametry gruntu i powtórzyć obliczenia – do momentu uzyskania satysfakcjonującej zgodności.

4. Podsumowanie

Zaproponowana metoda analizy zachowania się skarpy gruntowej jest odpowiedzią na potrzebę inżynierskiego szacowania jej stateczności, w obliczu istnienia w sąsiedztwie wymuszeń dynamicznych (przykładowo robót inżynierskich, generujących drgania mechaniczne podłoża gruntowego). Czynnikiem gwarantującym poprawność tej metody jest możliwość prostej identyfikacji prawidłowości przyjętego modelu cyfrowego z rzeczywistym obiektem i jego wymuszeniem, poprzez wzajemne porównanie ich odpowiedzi dynamicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ciesielski R. i inni, Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna), ITB, Warszawa, 1993
- [2] Jermolowicz P., Praktyczne aspekty w określaniu stateczności skarp wykopów i nasypów pod obciążeniem statycznym i dynamicznym, Magazyn Autostrady, Katowice, 2015
- [3] Pilecka E., Moskal M., Stateczność osuwiska drogowego przed i po zabezpieczeniu w świetle obliczeń numerycznych, Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe Bezpieczeństwo i ekologia 6/2017, Radom
- [4] Pilecka E., Kogut J., Zagrożenia dla infrastruktury transportu drogowego na skutek wystąpienia ruchów masowych, TTS Technika Transportu Szybnego, Radom, 2015
- [5] Sękowski J., Sternik K., Analiza stateczności skarpy tymczasowego wykopu w sąsiedztwie istniejącej zabudowy, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 276, OWPR Rzeszów, 2011
- [6] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. 43, poz. 430)
- [7] Kłosiński B. i inni, O wymaganiach dotyczących stateczności skarp i zboczy, Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Problematyka osuwisk w budownictwie komunikacyjnym. Część I. Zakopane, 2009
- [8] Cała M. i inni., Wytyczne do oceny stateczności skarp nasypów i wykopów w szczególnych warunkach geologiczno-inżynierskich, a także przy wykonywaniu budowli drogowych na terenach górniczych, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków, 2018
- [9] PN-EN 1997–1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – część 1: zasady ogólne
- [10] Labocha S., Skotny Ł., Liniowa i nieliniowa analiza MES. GM System, Wrocław, 2014
- [11] Wiłun Z., Zarys geotechniki, WKŁ, Warszawa, 1987
- [12] Hozsza K. i inni, Rozszerzenie możliwości zastosowania tłumienia modalnego w diagnostyce dużych obiektów, Diagnostyka 1(37)/2006, Politechnika Warszawska/Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Warszawa, 2006