

ANALIZA STATECZNOŚCI ZBOCZA W REJONIE KOŚCIOŁA ŚW. KATARZYNY W WARSZAWIE Z UWZGLĘDNIENIEM OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

Ryszard Kaczyński, Anna Bąkowska, Kamil Kielbasiński

Uniwersytet Warszawski

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest analiza stateczności zbocza wysoczyzny gliny lodowcowej w rejonie kościoła św. Katarzyny. W pracy porównano wyniki analizy stateczności skarpy metodami równowagi granicznej z metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie. Wykorzystując program GEOSLOPE, wykonano obliczenia współczynników stateczności klasycznymi, najczęściej stosowanymi metodami równowagi granicznej, do których należą metody: Felleniusa, Janbu oraz Bishopa. Stateczność skarpy metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie analizowano za pomocą programu Plaxis. Ponadto w pracy przedstawiono wpływ na stateczność zbocza obciążeń dynamicznych (drgań parasejsmicznych od ruchu kołowego).

Słowa kluczowe: stateczność skarp, metody paskowe, Fellenius, Bishop, metoda redukcji parametrów $c-\phi$, drgania parasejsmiczne

WSTĘP

Jedną z wielu przyczyn powstawania osuwisk są oddziaływania parasejsmiczne w sąsiedztwie dróg o dużym natężeniu ruchu. Problem dotyczy nie tylko terenów wyżynnych, ale również terenów nizinnych z rozbudowanymi dolinami rzecznyymi, gdzie deniwelacje terenu mogą sięgać od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów.

Duże koszty zaawansowanych analiz i brak jednoznacznych wytycznych badawczych często powodują, iż przypadki, w których należało uwzględnić obciążenia dynamiczne upraszczane są do przypadków statycznych.

Niniejsza praca przedstawia zagadnienia dotyczące stateczności zboczy ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływania obciążeń dynamicznych wywołanych ruchem kołowym.

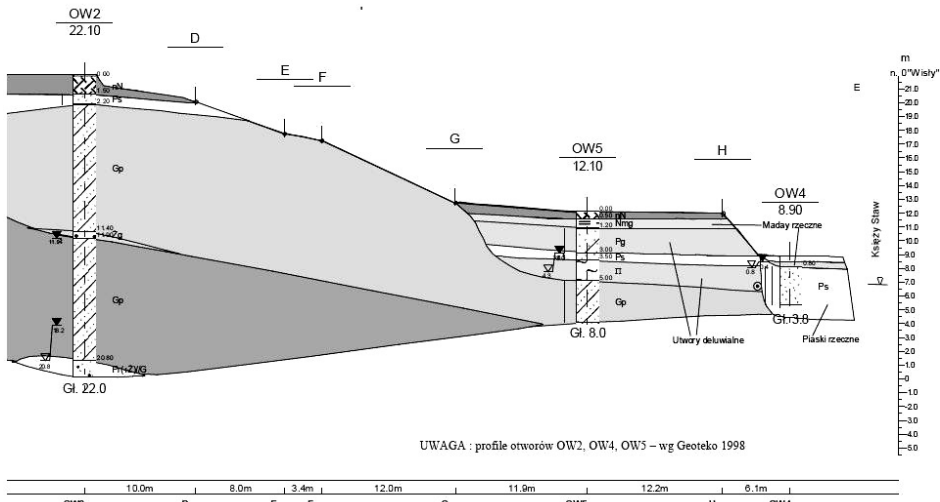
Jako teren badań wybrano fragment skarpy warszawskiej w pobliżu kościoła św. Katarzyny. Analizowany fragment skarpy charakteryzuje się skomplikowaną dwudzielną budową geologiczną, a ponadto od strony zachodniej graniczy z ruchliwą Doliną Służewiecką.

W wymienionym obszarze zlokalizowano geologiczne poletko badawcze Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie przeprowadzono specjalistyczne badania gruntów. Dobre rozpoznanie budowy geologicznej i duża liczba parametrów gruntowych określonych bezpośrednio z badań pozwoliło na sporządzenie wiarygodnego modelu zbocza. Dodatkowo, poza parametrami ośrodka gruntowego, wykonano badania geofizyczne z rejestracją drgań wywołanych ruchem kołowym, które pozwoliły oszacować obciążenia dynamiczne wpływające negatywnie na stateczność zbocza.

Do obliczeń wykorzystano programy GEOSLOPE oraz PLAXIS, które zostały udostępnione przez Instytut Techniki Budowlanej (Zakład Geotechniki i Fundamentowania) w ramach współpracy z Zakładem Geologii Inżynierskiej UW.

CHARAKTERYSTYKA MODELI OBLICZENIOWYCH

Obszar badań położony jest na krawędzi wysoczyzny morenowej graniczącej z doliną Wisły. Morfologicznie jest to wzgórze kemowe wysokości około 22 m nad „0” Wisły. Od wschodniej strony zbocze wzgórza podzielone jest na dwa skłony, których nachylenie dochodzi do 45°. Wysokość zbocza w tym rejonie wynosi około 12 m. Największy udział w budowie zbocza mają gliny piaszczyste w stanie od półzwartego do twardeplastycznego. Budowę zbocza przedstawia przekrój geologiczno-inżynierski (rys. 1), na którego podstawie opracowano schematy obliczeniowe.

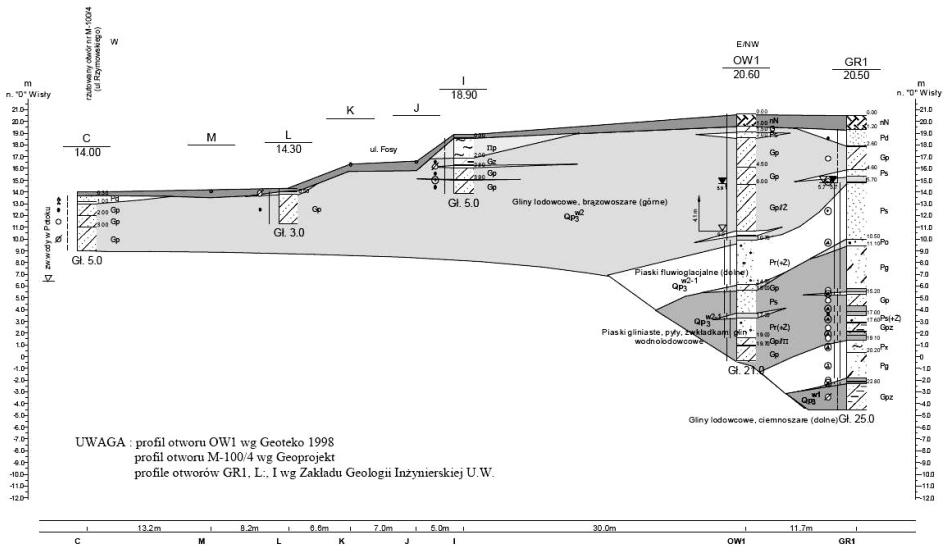


Rys. 1. Przekrój geologiczno-inżynierski przez wschodnią część zbocza: nN – nasyp niebudowlany, Nmg – namuł, Po – pospółka, Pog – pospółka gliniasta, Ż – żwir, Pr – piasek grubo, Ps – piasek średni, Pd – piasek drobny, Pp – piasek pylasty, Pg – piasek gliniasty, Π – pył, Gp – glina piaszczysta, G – glina

Fig. 1. Geological-engineering cross-section of the eastern slope: nN – embankment, Nmg – mud, Po – sand-gravel mix, Pog – clayey sand-gravel mix, Ż – gravel, Pr – coarse sand, Ps – medium sand, Pd – fine sand, Pp – silty sand, Pg – clayey sand, Π – silt, Gp, G – sandy clay

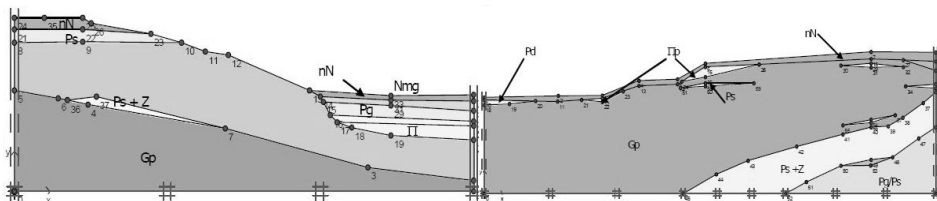
Strona zachodnia wzgórza różni się znacząco do strony wschodniej. Zastosowano tu skarpowanie zbocza, zmniejszając jednocześnie jego wysokość i nachylenie do 30° oraz zbudowano równoległe do skarpy po skłonie zbocza lokalną ulicę (rys. 2).

Modele obliczeniowe analizowanych zboczy przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Przekrój geologiczno-inżynierski przez południową część zbocza

Fig. 2. Geological-engineering cross-section of the western slope



Rys. 3. Przekroje obliczeniowe zboczy dla programu PLAXIS: a – zbocze wschodnie, b – zbocze zachodnie; nN – nasyp niebudowlany, Nmg – namuł, Ż – żwir, Ps – piasek średni, Pd – piasek drobny, Pp – pył piaszczysty, Pg – piasek gliniasty, P – pył, Gp – glina piaszczysta

Fig. 3. Analytical cross-section in PLAXIS software: a – eastern slope b – western slope; nN – embankment, Nmg – mud, Ż – gravel, Ps – medium sand, Pd – fine sand, Pp – sandy silt, Pg – clayey sand, P – silt, Gp – sandy clay

METODY ANALIZY STATECZNOŚCI

W celu określenia współczynników stateczności zboczy oraz oceny wpływu oddziaływań ruchu kołowego na stateczność przeprowadzono obliczenia uwzględniające obciążenia w warunkach statycznych i dynamicznych. Zarówno w jednym, jak

i w drugim przypadku zastosowano w obliczeniach metody równowagi granicznej, szerzej znane pod nazwą metody paskowe, oraz metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie, zwaną metodą redukcji parametrów $c-\phi$. Ze zbioru metod paskowych w obliczeniach wykorzystano trzy: metodę Felleniusa, uproszczoną metodę Bishopa oraz Janbu. Parametry fizyko-mechaniczne warstw geotechnicznych użyte w obliczeniach przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Obliczeniowe parametry fizyko-mechaniczne gruntów
Table 1. Analytical physical and mechanical parameters of soils

Typ gruntu Type of soil	Ciężar objętościowy $\gamma^{(t)}$ [kN·m ⁻³] Volume weight	Kąt tarcia wewnętrznego $\Phi^{(t)}$ [°] Angle of internal friction	Spójność $c^{(t)}$ [kPa] Cohesion	Moduł Younga E [MPa] Young's modulus	Współczynnik Poissona ν [–] Poisson's ratio
Nasyt Embankment	16,0	10,0	28,0	40,0	0,30
Namuły Muds	18,0	18,0	18,0	0,3	0,40
Torfy Peats	10,0	9,0	9,0	0,1	0,40
Piaski drobne i pylaste (osady zbczowe) Deluvial fine and silty sands	15,0	27,0	–	60,0	0,30
Piaski pylaste i drobnoziarniste fluwioglacjalne Fluvioglacial fine and silty sands	16,5	28,8	–	125,0	0,30
Piaski pylaste i drobnoziarniste rzeczne Fluvial fines and silty sands	15,8	27,5	–	60,0	0,30
Piaski średnioziarniste i gruboziarniste fluwioglacjalne Fluvioglacial coarse and medium sands	16,5	37,0	–	180,0	0,25
Piaski średnioziarniste i gruboziarniste rzeczne Fluvial coarse and medium sands	17,0	28,8	–	100,0	0,25
Gliny piaszczyste i piaski gliniaste lodowcowe Glacial sandy clays and clayey sands	19,9	24,0	40,0	80,0	0,25

ANALIZA STATECZNOŚCI W WARUNKACH STATYCZNYCH

Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem dotychczas sprawdzonych metod równowagi granicznej oraz metody redukcji wytrzymałości na ścinanie opartej na metodzie elementów skończonych. Obliczenia metodami równowagi granicznej przeprowadzono

programem GEOSLOPE. Procedura postępowania w obliczeniach programem GEOSLOPE przedstawia się następująco:

- opracowanie modelu możliwie dokładnie odwzorowującego zarówno geometrycznie, jak i materiałowo analizowane zbocze; parametry gruntów to ciężar objętościowy, spójność oraz kąt tarcia wewnętrznego,
- określenie linii ciśnień piezometrycznych,
- podział klina odłamu na szereg pionowych pasków, tak aby powierzchnia poślizgu, linia rozgraniczająca warstwy oraz linia zwierciadła wody mogły być przybliżone odcinkami prostymi,
- przeprowadzenie obliczeń dla jednej zdefiniowanej powierzchni poślizgu lub dla wielu powierzchni poślizgu wyznaczonych automatycznie w obszarze zdefiniowanym przez użytkownika; najczęściej przyjmowanymi kształtami dla powierzchni poślizgu są kształt kołowy i kształt spirali logarytmicznej,
- określenie współczynnika stateczności dla zdefiniowanej powierzchni poślizgu lub wyznaczenie tabeli współczynników dla szeregu powierzchni poślizgu i wybór najbardziej prawdopodobnej tzw. krytycznej powierzchni poślizgu,

Obliczenia za pomocą metod redukcji wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono za pomocą programu PLAXIS, gdzie metodyka określania współczynnika stateczności jest następująca:

- wybór modelu opisującego grunty; w analizie skarpy wybrano sprężysto-plastyczny model gruntu z warunkiem plastyczności Coulomba Mohra definiowany poza parametrami, takimi jak w przypadku metod paskowych, parametrami sprężystymi w postaci modułu Younga (E) i współczynnika Poissona (ν),
- opracowanie geometrii modelu oraz sporządzenie siatki elementów skończonych,
- obliczenie rozkładu naprężeń geostatycznych dla zadanych parametrów gruntowych,
- określenie rozkładu ciśnień porowych oraz stopnia nasycenia gruntów,
- obliczenia wytrzymałościowe dla zadanych rzeczywistych parametrów wejściowych,
- iteracyjne obliczenia wytrzymałościowe dla zredukowanych parametrów kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności zmniejszających wytrzymałość na ścinanie, aż do przekroczenia stanu granicznego i utraty stateczności układu równań,
- określenie współczynnika stateczności.

W celu oceny stateczności zbocza posłużono się dwiema metodami o różnych założeniach.

W metodach równowagi granicznej współczynnik stateczności (F) definiowany jest jako stosunek uogólnionej sumy sił utrzymujących, wywołanych tarcie i spójnością materiału (U_i), do sumy uogólnionych sił zsuwających (Z_i), które wywołane są siłami grawitacyjnymi i siłami filtracji:

$$F = \frac{\sum U_i}{\sum Z_i} \quad (1)$$

Współczynnik stateczności (SF) według metody redukcji wytrzymałości na ścinanie jest zdefiniowany jako stosunek wytrzymałości na ścinanie w stanie aktualnym do zredukowanej wytrzymałości na ścinanie w stanie równowagi granicznej:

$$SF = \frac{c + \sigma_n \cdot \tan \varphi}{c_r + \sigma_n \cdot \tan \varphi_r} \quad (2)$$

gdzie: c – spójność,

σ_n – naprężenia normalne do płaszczyzny ścinania w momencie zniszczenia gruntu,

φ – kąt tarcia wewnętrznego,

r – indeks oznaczający wartość parametru w stanie równowagi.

Redukcja parametrów wytrzymałościowych c i φ jest kontrolowana poprzez mnożnik ΣMsf , który jest zwiększany stopniowo, aż do uzyskania niestateczności układu równań:

$$\sum Msf = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} \quad (3)$$

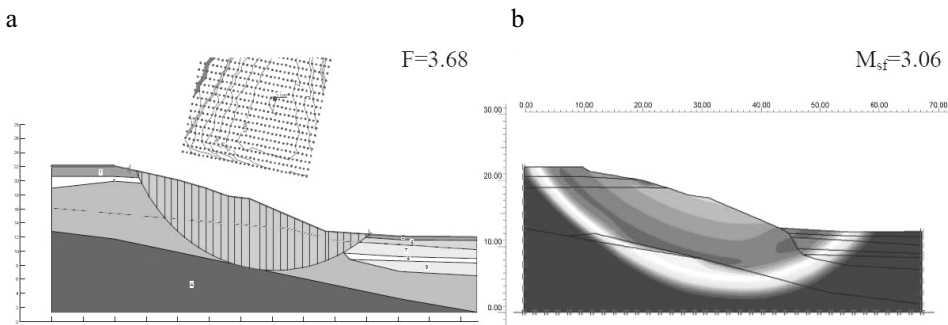
Za skarpe stateczną uważa się skarpe o współczynniku stateczności większym od jedności, natomiast współczynnik stateczności mniejszy od jedności określa skarpe niestateczną.

W odniesieniu do metod paskowych Wysokiński [2006] zaproponował następujący podział prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska:

- bardzo mało prawdopodobne w przypadku $F > 1,5$,
- mało prawdopodobne w przypadku F z zakresu 1,3–1,5,
- prawdopodobne w przypadku F z zakresu 1,0–1,3,
- bardzo prawdopodobne w przypadku $F < 1,0$.

W przypadku zarówno jednej, jak i drugiej metody wyznaczone krytyczne powierzchnie poślizgu miały podobny przebieg, co pozwoliło na porównanie wyników obliczeń (rys. 4).

Dotatkowo w obliczeniach przyjęto rezydualne parametry glin lodowcowych, budujących warstwy geotechniczne, charakteryzujące się największym udziałem w budowie analizowanych zboczy. Parametry rezydualne glin określono w badaniach laboratoryj-



Rys. 4. Prawdopodobne krzywe poślizgu dla zbocza wschodniego obliczone programem: a – GEOSLOPE (metoda Bishopa), b – PLAXIS (metoda redukcji parametrów c - ϕ); F , M_{sf} – współczynniki bezpieczeństwa

Fig. 4. Probable slide curves for the western slope computed in: a – GEOSLOPE software (Bishop's method), b – PLAXIS software (the method of the reduction of parameters c - ϕ); F , M_{sf} – factors of safety

nych, stosując aparaty bezpośredniego ścinania i pierścieniowy tzw. ring shear. Badane próbki charakteryzowały się spójnością rezydualną $c_r = 5$ kPa, natomiast wartości kąta tarcia wewnętrznego nie uległy zmianie. Zmniejszenie parametru spójności do wartości rezydualnej pozwoliło na obliczenia stateczności zboczy, w których uaktywniłyby się wszystkie istniejące nieciągłości. Także w tym przypadku wyniki analiz różnych metod przedstawiły niemal identyczne krytyczne powierzchnie poślizgu. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki analizy statycznej w postaci współczynników stateczności przy parametrach obliczeniowych i rezydualnych (z indeksem r)

Table 2. Static analysis results. Safety factor (with r index) computed with residual parameters

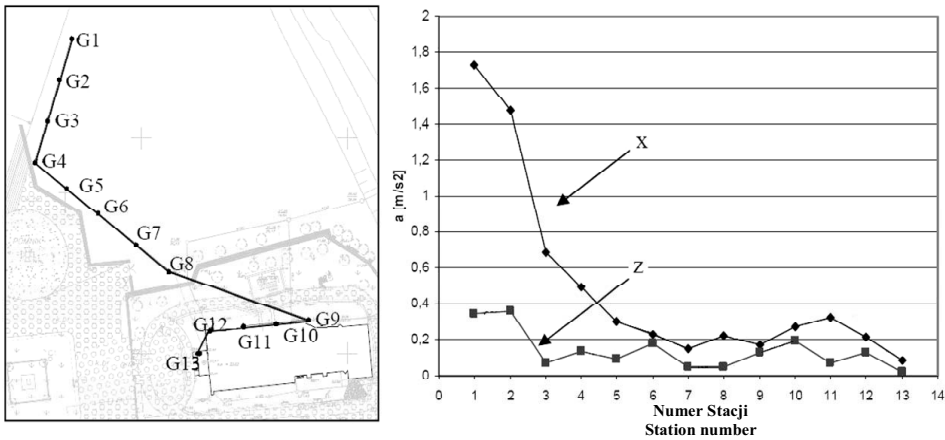
Zbocze Slope	Metoda – Method						M_{sf} [redukcja C-φ] [C-φ reduc- tion]	$M_{sf r}$ [redukcja C-φ] [C-φ reduc- tion]
	Fellenius	Bishop	Janbu	Fellenius _r	Bishop _r	Janbu _r		
Zbocze wschodnie Western slope	3,38	3,68	3,30	1,50	1,53	1,50	3,06	1,36
Zbocze zachodnie Easter slope	4,30	4,45	4,35	2,51	2,58	2,52	3,87	2,28

Z analizy przeprowadzonych obliczeń wynika, iż zarówno jedno, jak i drugie zbocze jest stateczne z dużym zapasem bezpieczeństwa. W przypadku metody redukcji parametrów c-φ należałoby obniżyć parametry geotechniczne gruntów ponad dwukrotnie, aby doprowadzić do niestateczności zbocza. W obliczeniach z uwzględnieniem parametrów rezydualnych otrzymane wartości współczynników stateczności są mniejsze o 40%, jednak prawdopodobieństwo redukcji parametrów gruntowych do parametrów rezydualnych jest bardzo małe.

ANALIZA STATECZNOŚCI W WARUNKACH DYNAMICZNYCH

Podstawą do uwzględnienia wpływów dynamicznych są pomiary sejsmiczne, które pozwalają określić maksymalne przyspieszenia drgań gruntu i ich zmienność przestrzenną. W tym celu wykonano pomiary drgań wywołanych ruchem kołowym w linii pokrywającej się z wyżej omawianym przekrojem zbocza zachodniego. Pomiary przeprowadzono w marcu 2007 roku przy współpracy z prof. P. Tuchołą. Zastosowana aparatura sejsmiczna pozwoliła na rejestrację drgań w 8-sekundowych odcinkach czasowych w trzech kierunkach na 13 stacjach pomiarowych.

Analiza zapisów drgań w przekroju obliczeniowym pozwoliła na określenie maksymalnych przyspieszeń w danych stacjach pomiarowych i ich zmiany wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań (rys. 5). Jako dominujące w całym rejestrowanym spektrum można uznać drgania o częstotliwości z zakresu 24–32 Hz, gdyż częstotliwości w tym przedziale docierały najdalej wzdłuż analizowanego przekroju. Na podstawie prostej ekstrapolacji ustalono w przybliżeniu rozkład przyspieszeń w źródle drgań oraz w miejscach



Rys. 5. Lokalizacja stacji pomiarowych z wykresem przemieszczeń na kierunku osi x i z : x – kierunek drgań zgodny z osią x , z – kierunek drgań zgodny z osią z

Fig. 5. Localization of measuring stations with z and x direction acceleration graph: x – vibration in direction x , z – vibration in direction z

nieobjętych rejestracją, który był podstawą późniejszych analiz. Maksymalne przyspieszenia w przekroju skarpy wyniosły $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

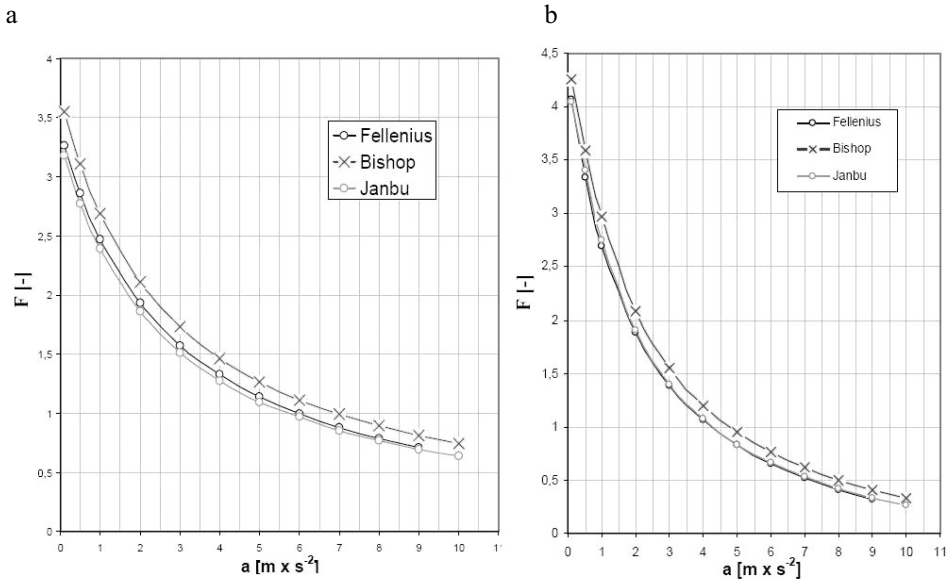
Wpływ obciążeń dynamicznych na stateczność zboczy można określić w różny sposób. Jednym ze sposobów jest analiza pseudostatyczna, która pozwala uwzględnić efekty wstrząsów parasejsmicznych poprzez dodatkowe siły bezwładności działające na poszczególne paski. Siły te, działające w płaszczyźnie poziomej i pionowej, są przyłożone w środku ciężkości każdego paska i zdefiniowane jako:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W; \quad F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W \quad (4)$$

gdzie: a_v , a_h – przyspieszenia pseudostatyczne,
 g – przyspieszenie ziemskie,
 W – ciężar paska.

W większości przypadków największy wpływ na stateczność zbocza mają przyspieszenia poziome, natomiast wpływ przyspieszeń pionowych jest niewielki i w praktyce zaniedbywany. W analizie stateczności skarpy w warunkach dynamicznych uwzględniono jedynie przyspieszenia poziome. Szacując wpływy dynamiczne na stateczność zbocza, przeanalizowano zależność współczynnika stateczności od przyspieszenia drgań z zakresu $0\text{--}10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Analizę przeprowadzono dla zbocza wschodniego i zachodniego, mimo iż tylko zbocze zachodnie sąsiaduje z ruchliwą arterią.

Wyniki obliczeń (rys. 6) wykazały, że wpływ obciążeń dynamicznych na stateczność zbocza nawet przy maksymalnych pomierzonych przyspieszeniach jest znikomy, a współczynnik stateczności zmniejsza się maksymalnie o 20%. Jak wynika z analizy, zbocze utraciłoby stateczność w przypadku drgań o przyspieszeniach większych niż $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



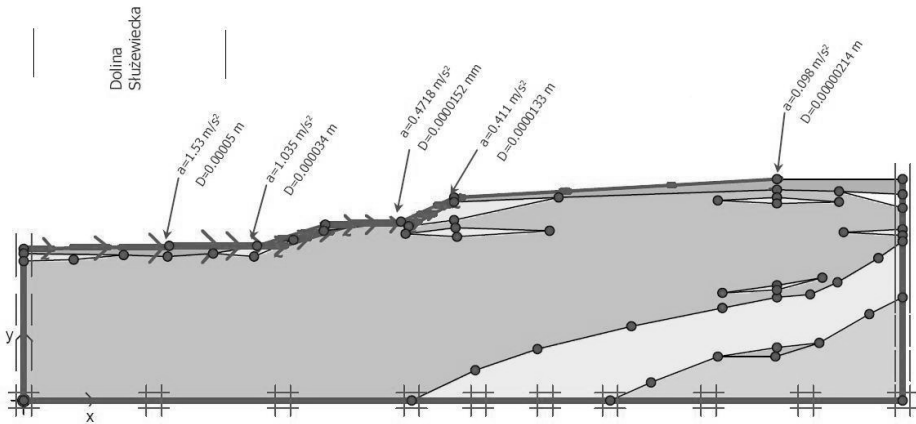
Rys. 6. Wykresy zależności współczynnika stateczności od przyspieszenia dla zbocza: a – wschodniego, b – zachodniego; F – współczynnik stateczności, a – przyspieszenie

Fig. 6. Relationship between safety factor and vibration acceleration: a – eastern slope, b – western slope; F – factor of safety, a – acceleration

Drugą metodą jest analiza przemieszczeń obliczonych metodą elementów skończonych, a dokładniej odkształceń ścinania w przekroju obliczeniowym. Dokonując analizy stateczności zbocza, można przyjąć, że w strefie poślizgu w warunkach równowagi granicznej zazwyczaj odkształcenia ścinania mieszczą się w przedziale 10–15% [Sigaran-Loria i in. 2007].

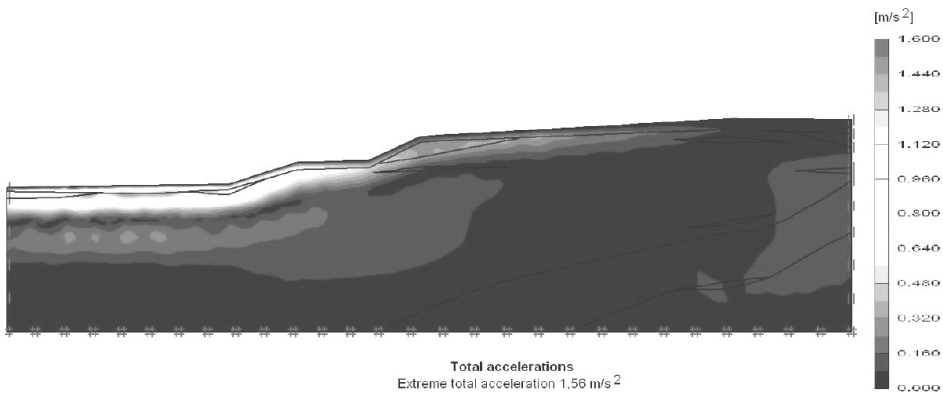
Metodyka obliczeń jest podobna do metodyki postępowania w przypadku analizy statycznej. W tym jednak przypadku, aby uwzględnić obciążenia dynamiczne, górną krawędź modelu skarpy dodatkowo obciąża się, zadając cyklicznie przemieszczenia o ustalonej stałej amplitudzie oraz dodatkowo na krawędziach modelu stosuje się warunki brzegowe z barierą tłumiącą. W celu określenia wpływu obciążeń dynamicznych na stateczność zbocza na wyżej wspomnianej krawędzi modelu założono przemieszczenia odpowiadające pomierzonym przemieszczeniom w trakcie pomiarów terenowych (rys. 7). Tłumienie drgań w modelu uwzględniono, stosując wpisany w program model tłumienia Rayleigha. Uzyskano w ten sposób model obrazujący rozkład przyspieszeń drgań cząstek (rys. 8). Wynikiem analizy był obraz odkształceń ścinania (rys. 9), gdzie maksymalne odkształcenia nie przekraczały 1,7%. Wskazuje to na niewielki wpływ obciążeń dynamicznych na stateczność analizowanego zbocza.

Trzecim sposobem na określenie wpływów obciążeń dynamicznych jest zastosowanie do modeli statycznych parametrów wytrzymałościowych gruntów uzyskanych z badań dynamicznych. Wymaga to dynamicznych badań wytrzymałościowych, w których można symulować rzeczywiste warunki pracy gruntu obciążonego dynamicznie. Metodyka oceny stateczności jest podobna do przedstawionej w niniejszym artykule. Obecnie tego typu prace prowadzone są na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.



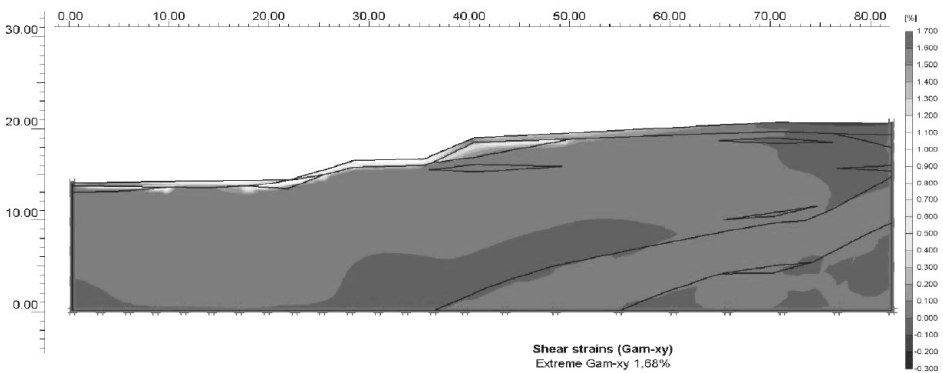
Rys. 7. Model zbocza zachodniego z rozkładem przemieszczeń na górnej krawędzi do obliczeń dynamicznych: a – przyspieszenie, D – przemieszczenie

Fig. 7. Eastern slope model for dynamic analysis with displacement setting on upper border: a – acceleration, D – displacement



Rys. 8. Rozkład przyspieszeń drgań w przekroju obliczeniowym

Fig. 8. Visualization of vibrations acceleration



Rys. 9. Obraz odkształceń ścinania w przekroju obliczeniowym

Fig. 9. Visualization of shear strains

WNIOSKI

Wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie możliwie wiernego modelu obliczeniowego wskazują, że:

1. Zbocza charakteryzują się dużym zapasem bezpieczeństwa.
2. Obciążenia dynamiczne mają niewielki wpływ na stateczność zboczy.
3. Zmiany w intensywności ruchu kołowego oraz pogorszenie nawierzchni, z uwagi na przeprowadzenie analizy dla obecnie istniejącego natężenia ruchu, będą miały duży wpływ na intensyfikację oddziaływań dynamicznych na omawiane skarpy i mogą zmieścić przedstawioną w tym artykule ocenę ich stateczności.

Podziękowania

Przeprowadzenie niniejszych badań było możliwe dzięki finansowego wsparciu Dziekana Wydziału Geologii – w ramach badań własnych (BW-1761/7), oraz Komitetu Badań Naukowych – w ramach w ramach Projektu Badawczego nr 4 T12B 062 28 „Stan skonsolidowania i mikrostruktury glin zlodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa – Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości”. Za udzielone wsparcie składamy serdeczne podziękowania.

PIŚMIENNICTWO

- Dokumentacja geologiczno-inżynierska dotycząca oceny stateczności podłoża w rejonie kościoła p.w. św. Katarzyny w Warszawie, 1998. Geoteko, Warszawa.
- Kaczyński R., Bąkowska A., Kiełbasiński K., 2008. Warunki geologiczno-inżynierskie w rejonie kościoła św. Katarzyny. *Acta Sci. Pol., Architectura* 7(1), 19–26.
- Kaczyński R. i inni, 2005–2008. Stan skonsolidowania i mikrostruktury glin zlodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa – Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości. Grant KBN No 4T12B06228, Etap I i II.
- Sigaran-Loria C., Kaynia M., Hack R., 2007. Slope stability under earthquakes: A sensitivity analysis. Materiały konferencyjne ICEGE, Thessaloniki – Greece 2007.
- Wysokiński L., 2006. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki 424/2006. Ocena stateczności skarp i zboczy. ITB, Warszawa.

SLOPE STABILITY ANALYSIS OF ST. KATARZYNA CHURCH AREA IN WARSAW, INCLUDING DYNAMIS LOADING

Abstract. Stability of tills slope in St. Katarzyna Church area was analyzed in the paper. Factors of safety from limit equilibrium methods and from $c-\phi$ reduction method were compared. Slope/W software was used to calculate factors of safety from basic limit equilibrium methods: Fellenius (or Ordinary) method, Bishop's method and Janbu's method. Plaxis software was used to calculate the factor of safety from $c-\phi$ reduction method. Slope stability analysis was done for static conditions, as well as for dynamic conditions (dynamic loading due to traffic).

Key words: slope stability, limit equilibrium methods, Fellenius method, Bishop's method, Janbu's method, $c-\phi$ reduction method, dynamic loading

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.03.2008