

Waldemar St. Szajna
Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski

NUMERYCZNA ANALIZA STATECZNOŚCI SKARP PODCZAS WYKONYWANIA WYKOPU W GRUNTACH ZABURZONYCH GLACITEKTONICZNIE

NUMERICAL ANALYSIS OF SLOPE STABILITY DURING EXCAVATION IN GLACITECTONICALLY DEFORMED SOILS

Streszczenie: W pracy przedstawiono zastosowanie metody elementów skończonych do analizy stateczności zboczy jako alternatywę w stosunku do tradycyjnych metod równowagi granicznej. Przyjęto sprężysto-plastyczny model konstytutywny gruntu. Przy takim podejściu powierzchnia poślizgu tworzy się samoczynnie w tych obszarach gdzie naprężenia styczne przekraczają wytrzymałość gruntu na ścinanie. Ta zaleta jest szczególnie widoczna w przypadkach skomplikowanego układu warstw gruntu np. w gruntach zaburzonych glacitektonicznie. W pracy zamieszczono symulację zachowania zboczy podczas wykonywania wykopu.

Summary: The paper presents an application of the finite element method for slope stability analysis as an alternative to traditional methods of limit equilibrium. An elasto-plastic constitutive model of soil is taken into account. Slope failure produced by finite element approach occurs naturally in the zones where shear stresses exceeds shear strength of the soil. The benefits of the method are especially visible in the cases of a complicated arrangement of soil layers e.g. in glacitectonically deformed soils. A simulation of the slope behavior during an excavation process is presented.

WSTĘP

W analizie stateczności zboczy dominują obecnie dwa kierunki: wykorzystanie metod równowagi granicznej oraz stosowanie metody elementów skończonych. Pierwsza grupa metod nazwana dalej klasyczną, stosowana jest bardzo szeroko przez inżynierów w projektowaniu i sprawdzaniu stateczności skarp. Do najbardziej rozpowszechnionych metod tej grupy należą metody: Felleniusa, Bishopa, Janbu (Wiłun 1982). Wykorzystuje się w nich analizę warunków równowagi bryły osuwającej się wzdłuż przyjętej powierzchni poślizgu. Cechą charakterystyczną metod klasycznych jest założenie podziału osuwającej się bryły odłamu na paski. Poszczególne metody różnią się przede wszystkim sposobem przyjmowania oddziaływań pomiędzy paskami. Metoda Felleniusa spełnia jedynie równanie równowagi momentów. W metodzie Bishopa oprócz warunku równowagi momentów spełnione jest także równanie równowagi sił

pionowych. W obu metodach przyjmuje się uproszczony, kołowy kształt powierzchni poślizgu. Obydwie metody stosowane są przede wszystkim w obliczeniach „ręcznych”.

Zastosowanie komputerów miało duży wpływ na modyfikację metod klasycznych polegającą na: możliwości spełnienia wszystkich równań równowagi oraz możliwości bardziej swobodnego przyjmowania kształtowanie powierzchni poślizgu. W metodzie Janbu spełnione są równania równowagi momentów, sił pionowych i poziomych, a powierzchnia poślizgu może mieć dowolny kształt. Szerokie porównanie metod klasycznych przedstawił w swej pracy (Duncan 1996). Autor wskazuje na metodę Spencera jako najbardziej obiecującą, pozbawioną problemów numerycznych przy jej realizacji. Wspólną wadą powyższych metod jest rozpatrywanie jedynie równań statyki a pomijanie analizy odkształceń i równań zgodności przemieszczeń. Uniemożliwia to określenie stanu przemieszczeń w układzie.

Pewną próbę uzupełnienia niedomagań metod klasycznych przedstawił (Krahn 2003). Proponuje on wykorzystanie metody elementów skończonych do określenia początkowego stanu naprężenia w skarpie. Wyznacza go przyjmując liniowy związek naprężeń i odkształceń. Po wyznaczeniu stanu naprężenia ułatwione jest określenie oddziaływań pomiędzy paskami bryły odłamu. Dalsza analiza skarpy przebiega podobnie jak w metodach klasycznych, czyli sprowadza się do poszukiwania powierzchni odłamu i sprawdzania równań równowagi. Stąd w momencie utraty stateczności stan naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w zboczu nie jest znany. Wątpliwości budzi także zastosowanie liniowo-sprężystego modelu gruntu.

Pełną analizę stateczności skarp metodą elementów skończonych przedstawiono w pracy (Griffiths, Lane 1999). Zastosowano sprężysto-plastyczny model gruntu z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. Autorzy rozwiązują zadanie nośności granicznej masywu o geometrii odpowiadającej profilowi skarpy metodą przyrostowo-iteracyjną. W każdym przyroście a raczej kroku, zmniejszane są zastępcze parametry wytrzymałości gruntu. Zastępcza kohezja oraz zastępczy kąt tarcia wewnętrznego zdefiniowane są równaniami:

$$c'_f = \frac{c'}{FOS}, \quad (1)$$

$$\phi'_f = \arctan\left(\frac{\tan \phi'}{FOS}\right), \quad (2)$$

gdzie: c' i ϕ' to odpowiednio efektywna kohezja i efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu, zaś FOS jest współczynnikiem stateczności skarpy.

W pracy przedstawiono przykłady analiz bez drenażu i z drenażem.

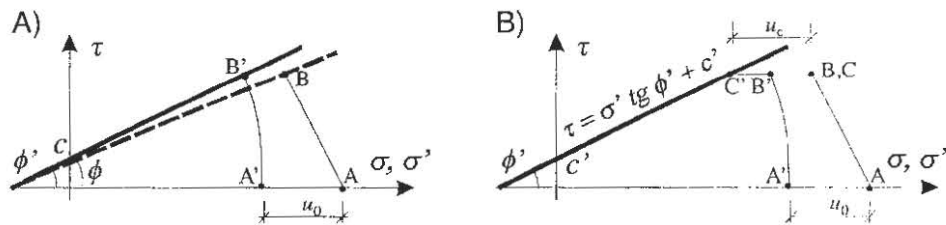
Bezsporną zaletą stosowania MES w analizie stateczności zboczy jest spełnianie wszystkich równań równowagi oraz równań geometrycznych a także możliwość stosowania równań konstytutywnych dobrze oddających cechy podłoża gruntowego. W zadaniu nie ma konieczności przyjmowania specyficznego kształtu i położenia powierzchni poślizgu. Powierzchnia ta tworzy się w sposób samoczynny, w tych obszarach gruntu, gdzie naprężenia styczne są większe od wytrzymałości gruntu na ścinanie. Przy tym układ warstw gruntu może być dowolny, pod warunkiem że znana jest geometria warstw i ich parametry fizyczne i mechaniczne. Wobec powyższego nie

ma konieczności specjalnego przewidywania kształtu powierzchni poślizgu dla osuwisk asekwentnych, konsekwentnych czy isekwentnych (Książkiewicz 1972) a podejście we wszystkich tych przypadkach jest jednolite. Podejście to jest bardzo wygodne w analizie stateczności zboczy na obszarach zaburzonych glacitektonicznie, gdzie arbitralne przyjęcie powierzchni poślizgu jest wyjątkowo trudne.

Możliwa jest ponadto sprzężona analiza przepływu wody gruntowej w masywie z wyznaczaniem ciśnień porowych oraz analiza stanu naprężenia. Współczesne programy MES pozwalają na stosowanie zmieniającej się liczby elementów skończonych w czasie analizy, co umożliwi symulowanie procesu wykonywania wykopu bądź tworzenia nasypu. Analiza stateczności skarpy w trakcie wykonywania wykopu z wykorzystaniem programu ABAQUS przedstawiona jest w dalszej części pracy.

OPIS PROBLEMU

W zadaniach stateczność skarp, ze względu na sekwencję zmian obciążeń podczas ich budowy, korzystnie jest wyróżnić skarpy powstałe w wyniku wykonywania nasypu oraz skarpy tworzone podczas wykonywania wykopu. W pierwszym przypadku budowie skarpy towarzyszy narastanie obciążeń pionowych, w drugim zaś ich redukcja, jednocześnie odpowiednio wzrastają lub zmniejszają się całkowite naprężenia średnie w układzie. W obu przypadkach jednakże następuje wzrost naprężeń stycznych. Wzrost ten jest tym większy im większa jest wysokość skarpy oraz im większy jest kąt nachylenia skarpy. Jeżeli jeden z tych parametrów przekroczy krytyczną wartość następuje utrata stateczności zbocza i powstaje osuwisko. Przeanalizujemy bardziej szczegółowo przypadek skarpy wykopu.



Rys.1 Ścieżki naprężeń w skarpie. A) Zniszczenie gruntu podczas wykonywania wykopu. B) Zniszczenie gruntu w wyniku dysypacji ciśnienia.

Utrata stateczności może nastąpić podczas budowy skarpy lub z pewnym opóźnieniem w wyniku zmian parametrów mechanicznych układu (głównie w wyniku zmian ciśnienia porowego). Na rys.1A wykorzystując ścieżki naprężeń przedstawiono zmiany składowych normalnych i stycznych stanu naprężeń całkowitych (linia A-B) oraz efektywnych (linia A'-B'). Zakłada się, że w analizowanym punkcie początkowe ciśnienie porowe wynosiło u_0 . Przyjęto model Coulomba-Mohra z efektywnym kątem tarcia wewnętrznego ϕ' i efektywną kohezją c' (linia ciągła) lub parametrami całkowitymi odpowiednio ϕ i c (linia przerywana). W wyniku wykonywania wykopu

(odciążenia) następuje redukcja składowych normalnych naprężeń oraz zmniejsza się wartość ciśnienia porowego. Usuwanie gruntu stanowiącego wcześniej wsparcie boczne dla budowanej skarpy powoduje wzrost naprężeń stycznych. Jeżeli ścieżka naprężeń efektywnych lub całkowitych dotrze do opowiadającej jej prostej granicznej następuje osiągnięcie przez grunt wytrzymałości na ścinanie. Jeżeli stan taki wystąpi w wielu punktach układu tworzy się powierzchnia poślizgu. Następuje zniszczenie gruntu podczas wykonywania wykopu. Analizę możemy prowadzić posługując się naprężeniami całkowitymi lub efektywnymi.

Rys.1B przedstawia opóźnione zniszczenie gruntu w wyniku dysypacji ciśnienia porowego. Podczas wykonywania wykopu zmiany naprężeń całkowitych ilustruje ścieżka A-B zaś naprężeń efektywnych ścieżka A'-B'. Końcowy stan naprężeń efektywnych (B') jest odległy od prostej granicznej Coulomba-Mohra. W wyniku odciążenia nastąpiła redukcja ciśnienia porowego. Powstałe podciśnienie powoduje stopniowy przepływ wody gruntowej, wzrost ciśnienia do wartości u_c i jednocześnie redukcję składowych normalnych naprężeń efektywnych (ścieżka B'-C'). Stan naprężeń całkowitych nie zmienia się (punkty B i C pokrywają się). Gdy ścieżka naprężeń efektywnych osiągnie prostą graniczną, następuje zniszczenie materiału w analizowanym punkcie. W tym przypadku analiza musi być prowadzona z wykorzystaniem naprężeń efektywnych i kontroli ciśnień porowych. W dalszej części rozpatrzony zostanie tylko pierwszy, prostszy przypadek zniszczenia gruntu podczas wykonywania wykopu.

CHARAKTERYSTYKA MODELU OBLICZENIOWEGO

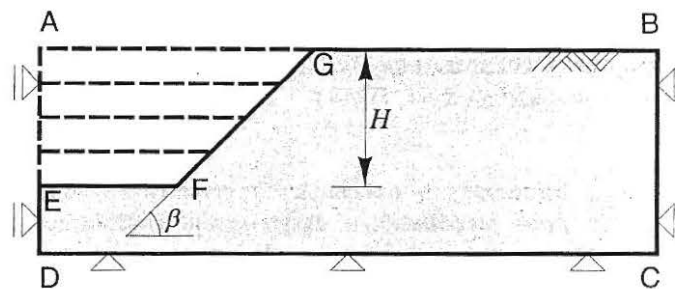
Pomimo możliwości wykonywania analiz zadań trójwymiarowym, ze względu na wstępną fazę badań w pracy przyjęto założenie występowania płaskiego stanu odkształcenia w masywie gruntowym.

Z otoczenia planowanej skarpy F-G (rys.2) o kącie nachylenia β , myślowo wyodrębniono obszar podłoża A-B-C-D. Na krawędziach A-D, B-C oraz C-D przyjęto warunki brzegowe jak na rysunku. Obszar poddano dyskretyzacji elementami skończonymi a następnie wygenerowano początkowy geostatyczny stan naprężenia, przyjmując ciężar właściwy gruntu γ oraz współczynnik rozporu bocznego K_0 . Z obszaru usunięty zostanie podobszar A-E-F-G, poprzez usuwanie kolejnych warstw oznaczonych symbolicznie na rysunku liniami przerywanymi.

Zastosowano krokową procedurę symulacji wykonywania wykopu. W każdym kroku usuwana jest pewna liczba elementów skończonych symbolizująca warstwę, co powoduje odciążenie układu a więc konieczność wyznaczenia nowego rozkładu stanu naprężenia o zerowych wartościach naprężeń normalnych do powierzchni F-G.

Usuwane elementy stanowiły swego rodzaju podparcie sąsiednich elementów, które pozostały w skarpie. Brak elementów wspierających powoduje w układzie wzrost naprężeń stycznych. Jeżeli wzrastające naprężenia styczne przekroczą wytrzymałość gruntu na ścinanie następuje redystrybucja tej części naprężeń, które przewyższają wytrzymałość gruntu, na sąsiednie elementy skończone pozostające w masywie. Osiągnięcie takiego stanu w znacznej liczbie elementów powoduje powstanie

powierzchni poślizgu i wyczerpanie nośności układu. Przed rozwiązaniem zadania liczba usuwanych warstw powodująca utratę stateczności skarpy, a co za tym idzie wysokość H niestatecznej skarpy, nie jest znana.



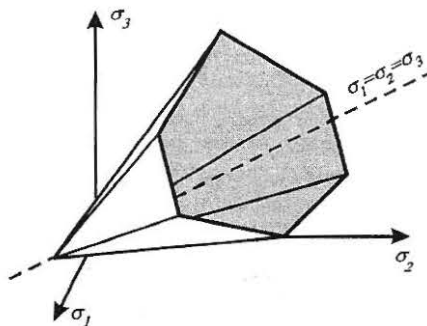
Rys.2 Schemat analizowanego zadania

W obliczeniach przyjęto sprężysto-plastyczny model ośrodka gruntowego z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra danym równaniem

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - c \cos \phi = 0, \quad (3)$$

gdzie: σ_1 i σ_3 są odpowiednio maksymalnym i minimalnym całkowitym naprężeniem głównym.

Kształt powierzchni plastyczności w przestrzeni naprężeń głównych przedstawiono na rys.3.



Rys.3 Powierzchnia plastyczności Coulomba-Mohra w przestrzeni naprężeń głównych

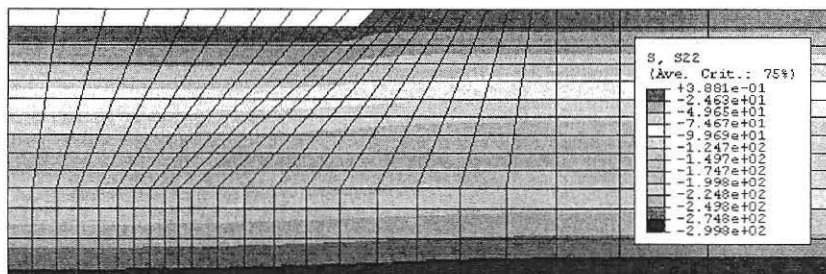
Zakłada się, że we wnętrzu bryły ograniczonej powierzchnią plastyczności zachowanie gruntu jest liniowo-sprężyste. Stany na zewnątrz bryły są niedopuszczalne. Stosuje się przyrostowo-iteracyjną procedurę rozwiązania, w trakcie której następuje redystrybucja części naprężeń wychodzących poza powierzchnię plastyczności na sąsiednie elementy skończone.

PRZYKŁADY ANALIZ

Przykłady rozwiązano wykorzystując system ABAQUS. Przyjęto założenie występowania płaskiego stanu odkształcenia. Analizie poddano obszar gruntu o szerokości 45m i wysokości 15m. W gruncie wykonywany będzie wykop o kącie nachylenia skarpy $\beta=45^\circ$. Grunt usuwany będzie warstwami o grubościach 1m każda. Zakłada się ponadto: $\gamma=20\text{kN/m}^3$, $K_0=1$, $FOS=1$.

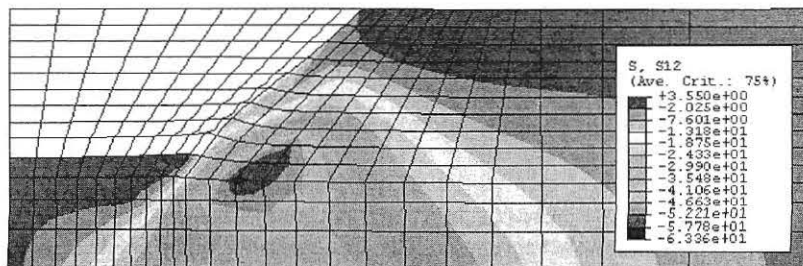
Przykład 1

Przyjęto grunt jednorodny o następujących parametrach: $E=50\text{MPa}$, $\nu=0,3$, $\phi=27^\circ$, $c=10\text{kPa}$. Na rys.4 przedstawiono dyskretyzację zadania osmiowzłowymi elementami całkowanymi w sposób zredukowany. Pokazano także warstwy naprężeń pionowych po wygenerowaniu początkowych naprężeń geostatycznych i usunięciu pierwszej warstwy.



Rys.4 Dyskretyzacja zadania i warstwy naprężeń pionowych po usunięciu pierwszej warstwy gruntu

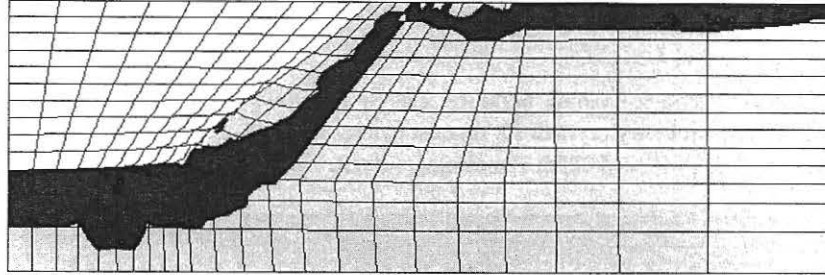
Na rys.5 pokazano intensywny rozwój naprężeń stycznych u podnóża skarpy po usunięciu dziewiątej warstwy gruntu. Wzrost tych naprężeń po wykopaniu kolejnej warstwy spowoduje utratę stateczności zbocza. Na rysunku widoczne są ponadto duże przemieszczenia poziome dolnej części skarpy. Dla oddania charakteru deformacji



Rys.5 Rozkład naprężeń stycznych po usunięciu dziewiątej warstwy

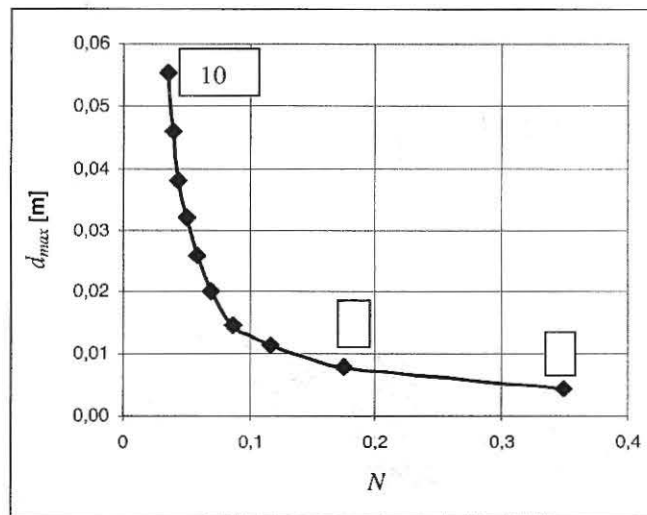
przyjęta skala przemieszczeń jest 30 –krotnie większa niż skala geometrii skarpy.

Rys.6 przedstawia obszary uplastycznienia gruntu (kolor czarny) w momencie utraty stateczności. Strefa uplastycznienia (strefa dużych odkształceń trwałych) w sąsiedztwie skarpy daje obraz powierzchni poślizgu. Utrata stateczności nastąpiła przy wysokości skarpy $H=10\text{m}$, po usunięciu dziesiątej warstwy gruntu.



Rys.6 Strefy uplastycznienia gruntu w momencie utraty stateczności skarpy

Konfiguracja siatki elementów daje obraz przemieszczeń gruntu. Możliwe jest oczywiście odczytanie wartości liczbowych przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w każdym punkcie analizowanego obszaru.

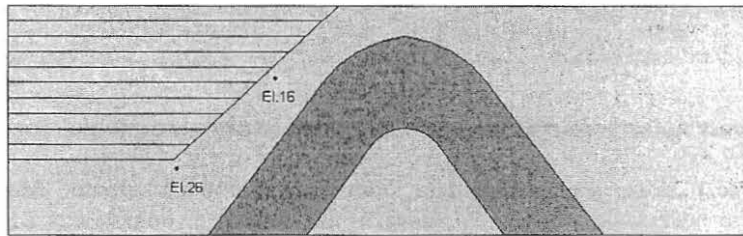


Rys.7 Maksymalne przemieszczenia skarpy w funkcji bezwymiarowego wskaźnika stateczności. W ramkach podano liczbę usuniętych warstw

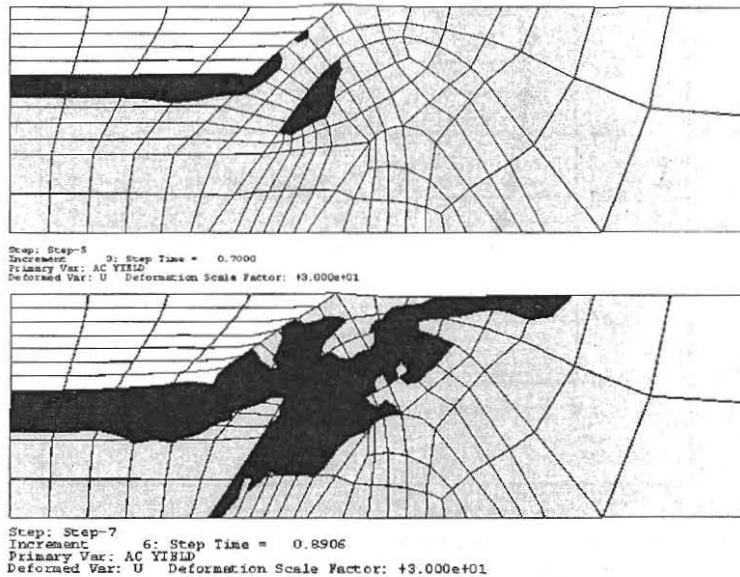
Rys.7 przedstawia zależność pomiędzy bezwymiarowym wskaźnikiem stateczności $N = c/\gamma H$, a maksymalnym przemieszczeniem d_{max} . Z wykresu wynika, że pogłębianiu wykopu poniżej czwartej warstwy towarzyszy znaczny wzrost przemieszczeń i jednocześnie wyraźna stabilizacja wartości wskaźnika stateczności po usunięciu szóstej warstwy gruntu. Oznacza to, że od momentu usunięcia szóstej warstwy skarpa znajduje się w stanie bliskim stanowi równowagi granicznej i należałoby sprawdzić wrażliwość rozwiązania na gęstość stosowanej siatki elementów.

Przykład 2

W przykładzie 2 analizie poddano masyw gruntowy z hipotetycznym fałdem o mniejszej sztywności i wytrzymałości przedstawiony na rys.8. Parametry fałdu wynoszą: $E=20\text{MPa}$, $\nu=0,3$, $\phi=5^\circ$, $c=10\text{kPa}$. Pozostałe parametry przyjęto jak w przykładzie 1.

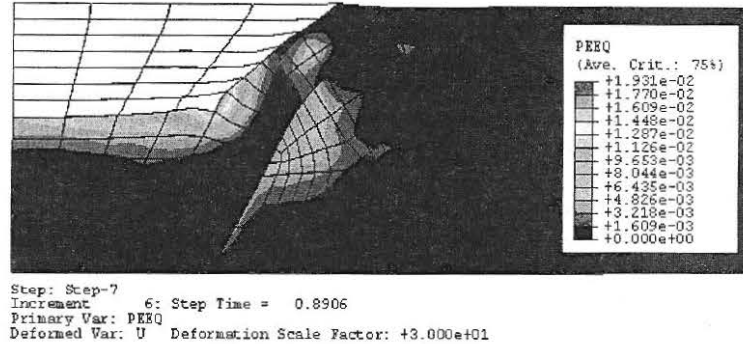


Rys.8 Schemat zadania z warstwą zaburzoną glaciektonicznie

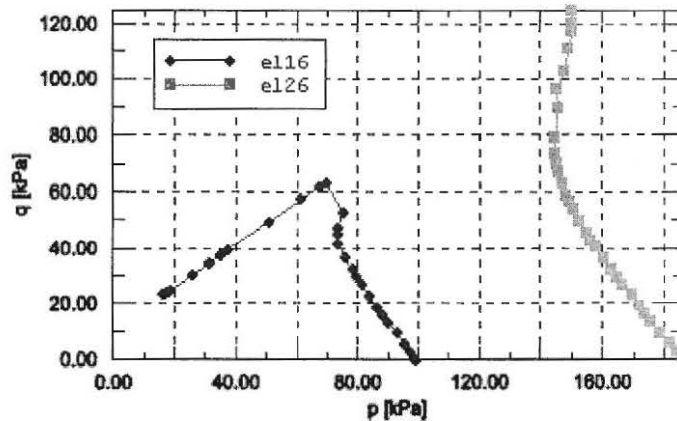


Rys.9 Rozwój stref uplastycznienia w maszywie podczas usuwania warstwy 5 i 7 gruntu

Ze względu na występowanie gruntu o niskich parametrach mechanicznych obserwuje się odmienny, w stosunku do przykładu 1 (rys.6), rozkład obszarów uplastycznienia. Już w trakcie usuwania warstwy piątej zaobserwowano przekroczenie wytrzymałości na ścinanie w fałdzie (rys.9 -część górna), zaś w trakcie usuwania warstwy siódmej nastąpiła utrata stateczności skarpy. Towarzyszący jej rozkład obszarów uplastycznienia przedstawiono w dolnej części rys.9. Rozkład wartości odkształceń plastycznych w momencie utraty nośności układu pokazano na rys. 10. Widoczny jest obszar dużych odkształceń plastycznych w fałdzie, w sąsiedztwie skarpy.



Rys.10 Warstwy odkształceń plastycznych w momencie utraty nośności



Rys.11 Ścieżki naprężeń całkowitych w punktach elementu 16 i 26 (patrz rys.8)

Na rys.11 pokazano dwie ścieżki naprężeń całkowitych w punktach całkowania numerycznego elementu 16 i 26 (zaznaczone na rys.8), w układzie p - q . Wielkość p jest naprężeniem średnim (miarą naprężeń normalnych), zaś q naprężeniem Misesa (miarą ścinania gruntu). W początkowej fazie budowy skarpy zarówno element 16 usytuowany jest w połowie wysokości zbocza jak i element 26 u jego podnóża, doznają redukcji

naprężeń średnich i wzrostu naprężeń stycznych. W tej fazie ścieżki naprężeń są prostoliniowe i kształtem zbliżone do ścieżki A-B z rys.1A. W zaawansowanych stanach naprężenia (w pobliżu prostej granicznej Coulomba-Mohra), kierunki ścieżek zaczynają się zmieniać. Ścieżka elementu 16 osiąga prostą graniczną i przebiega wzdłuż niej, ku początkowi układu współrzędnych, aż do momentu zniszczenia. W elemencie 26 następuje ciągły wzrost naprężeń stycznych, a w końcowej fazie także pewien wzrost naprężeń średnich.

WNIOSKI

Przedstawiony model obliczeniowy wymaga kalibracji parametrów, wiarygodnego wyznaczenia ich wartości w badaniach laboratoryjnych i polowych oraz weryfikacji poprzez porównanie wyników symulacji numerycznych z zachowaniem rzeczywistych skarp.

Jednakże należy stwierdzić, że metoda elementów skończonych w zastosowaniu do analizy stateczności skarp, może być bardzo wygodnym narzędziem. Daje możliwość badania zmian stanu naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w masywie gruntowym w poszczególnych stadiach zmian obciążeń. Umożliwia rejestrację powstawania oraz propagację lokalnych zniszczeń.

Metoda pozwala także na symulację numeryczną procesu wykonywania skarpy. Może w ten sposób być pomocna w zrozumieniu zjawisk, które powodują i towarzyszą utracie stateczności przez zbocze.

Ze względu na coraz większe rozpowszechnienie MES, może być także stosowana w projektowaniu do szacowania współczynnika stateczności skarp. W przeciwieństwie do metod klasycznych, szacujących jedynie nośność układu, daje projektantowi także obraz deformacji.

Bezsporną zaletą przedstawionego podejścia jest brak konieczności przewidywania kształtu i położenia powierzchni poślizgu. Jest to ważny argument szczególnie gdy mamy do czynienia ze złożonym, pofałdowanym układem warstw masywu.

Z punktu widzenia numeryczne, w przedstawionych przykładach należy zbadać wrażliwość rozwiązań na zagęszczenie siatki elementów skończonych. Szczególnie dotyczy to przykładu drugiego, gdzie jakość wygenerowanej siatki nie jest zadawalająca. W przyszłości należy się zastanowić nad problemem słabo widocznej lokalizacji odkształceń. W tym kontekście należy ponadto sprawdzić możliwość stosowania bardziej złożonych modeli podłoża, w tym także modeli z osłabieniem. Interesująca wydaje się także możliwość rozwiązywania sprzężonych zadań filtracji i stanu naprężenia, co pozwala analizować przypadki pośrednie pomiędzy obciążeniem z drenażem i obciążeniem bez drenażu.

Wykorzystywany do obliczeń program ABAQUS pozwala by w analogiczny sposób prowadzić analizy przestrzenne.

LITERATURA

- ABAQUS Analysis User's Manual., 2004, Ver. 6.5, Pawtucket, ABAQUS Inc.
- DUNCAN J.M., 1996, State of the art: Limit equilibrium and finite–element analysis of slopes, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 122, No. 7, 577-596
- GRIFFITHS D.V., LANE P.A., 1999, Slope stability analysis by finite elements, Geotechnique Vol. 49, No. 3, 387-403
- KRAHN J., 2003, The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analysis, Can. Geotech. J. Vol. 40, No. 3, 643-660
- KSIAŻKIEWICZ M., 1972, Geologia dynamiczna, Wyd. Geologiczne, Warszawa
- WIŁUN Z., 1982, Zarys geotechniki, Wyd. Komunikacji i Łączności, Wyd. 2, Warszawa