

Krzysztof STERNIK

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląska

ANALIZA STATECZNOŚCI GWOŹDZIOWANEJ SKARPY W UJĘCIU METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie. W pracy przedstawione są wyniki analiz numerycznych MES dwóch wzmocnionych skarp. Modele numeryczne uwzględniają dwa warianty wzmocnienia: z użyciem elementów belkowych i prętowych. Uwaga skoncentrowana została na wyznaczonych wartościach współczynników bezpieczeństwa.

NAILED-SLOPE STABILITY ANALYSIS BY FINITE ELEMENTS METHOD

Summary. Two reinforced cut slopes make the subject of numerical analyses by FEM. Numerical models take into account two possible ways of modelling of reinforcement: by beam elements and by truss elements. Attention has been focused on safety factor values determined in each case.

1. Wstęp

Współczesna geoinżynieria dysponuje szerokim wachlarzem metod i środków do wzmacniania skarp i zboczy ([2], [4]). Często stosowanym sposobem zabezpieczenia stateczności skarpy jest wprowadzenie w grunt rodzimy elementów zbrojących (najczęściej prętów lub ciągów stalowych) w otocze z zaczynu cementowego, która po stwardnieniu zespała pręt stalowy na całej jego długości z masywem gruntowym lub kotwi ciągną na jego końcu, formując buławę. Pierwszy element nazywamy gwoździem (kotwą bierną), drugi zaś kotwą czynną (zwykle wstępnie naprężoną).

W efekcie zastosowania wzmocnienia wymienionymi elementami zbrojącymi uzyskuje się zdolność do formowania wysokich i stromych skarp wykopów, często niemal pionowych. Gwoździowanie może stanowić także sposób ratowania osuwającej się, z przyczyn

nieprzewidzianych na etapie projektowania, ściany wykopu o znacznie łagodniejszym pochyleniu lub zbocza osuwiskowego.

Istnieje wiele metod obliczeniowych wykorzystywanych do projektowania wzmocnienia gwoździowaniem. Są to często metody stanów granicznych, w tym metody blokowe, powszechnie stosowane do sprawdzania stateczności skarp po zaadaptowaniu do specyfiki skarpy kotwionej/gwoździowanej [1]. Coraz powszechniej stosowane są obecnie również i w tej dziedzinie metody numeryczne, np. metoda elementów skończonych (MES). Przykłady tego typu analiz znaleźć można w literaturze ([3], [5]).

W referacie przytoczono dwa przykłady obliczeniowe wzmocnionych skarp o nachyleniu 35° i 45° . Wykazana została efektywność wzmocnienia, wyrażająca się wzrostem wartości współczynnika stateczności skarpy wzmocnionej w stosunku do niewzmocnionej. Narzędziem służącym do przeprowadzenia analiz był program MES Z_Soil v. 6.27 w wersji dwuwymiarowej.

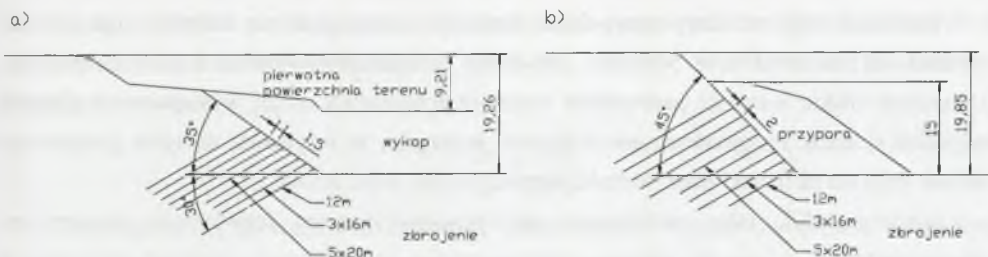
2. Założenia do obliczeń

Rozważane były dwa przypadki skarpy o wysokości docelowej dochodzącej do 20 m. Skarpa bardziej stroma (45°) zabezpieczona została wstępnie przyporą ziemną przed utratą stateczności. Założono, że materiał budujący przyporę ma te same właściwości co pozostała część masywu, a jedynie zmienia ona kształt skarpy (łagodniejsze pochylenie przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa). W skarpie tej, w trakcie stopniowego usuwania przypory, wykonane zostały gwoździe (kotwy) w rozstawie poziomym 2 m i pionowym 2 m (mierzone wzdłuż skarpy).

Drugi przypadek to skarpa nachylona pod kątem 35° do poziomu. Powstała ona w wyniku przegłębienia wykopu o początkowej głębokości ok. 9 m do ponad 19 m. Tym razem rozstaw pionowy gwoździ (mierzone wzdłuż skarpy) wyniósł 1,5 m, a poziomy 2 m.

W obu przypadkach elementy wzmocnienia nachylono pod kątem 30° do poziomu. Szczegóły rozważanych profili skarp wraz z założonym zbrojeniem pokazane są na rys. 1.

Elementy wzmocnienia symulowane były na dwa sposoby: jako elementy belkowe (posiadające sztywność giętą, czyli odpowiadające gwoździom gruntowym) oraz elementy prętowe zaczepione w elementach czworokątnych o zwiększonej sztywności i wytrzymałości - symulujących kotwy gruntowe zakończone buławą. Długość buław przyjęto równą 6 m, a całkowite długości elementów zbrojących przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Profile analizowanych skarp

Fig. 1. Cross-sections of the analysed cut-slopes

W tym przypadku zamodelowane zostały również płyty oporowe wieńczące kotwy na powierzchni skarpy. Zastosowano tu elementy belkowe, dla których przyjęto charakterystyki geometryczne jak dla płyty kwadratowej $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ o grubości $0,25\text{ m}$. Elementy te rozmieszczono na powierzchni skarpy, po dwa na jedną kotwę, a element prętowy kotwy był połączony z węzłem między tymi elementami. Przyjęto, że gwoździe i ciągną kotew wykonane są ze stali, a buławy i płyty oporowe to żelbet.

W obliczeniach założono, że masyw gruntowy jest jednorodny i nienawodniony. Nie uwzględniano wpływu filtrujących wód gruntowych, co ma istotne znaczenie w sytuacjach rzeczywistych, jeśli ten czynnik występuje.

Generalnie założono, że materiały w analizach numerycznych opisują związki sprężysto-idealnie plastyczne z powierzchnią zniszczenia Coulomba-Mohra. Założono niestowarzyszone prawo płynięcia plastycznego i kąt dylatacji 0° .

Poniżej zestawiono wartości parametrów, charakteryzujących materiały przyjęte w analizach:

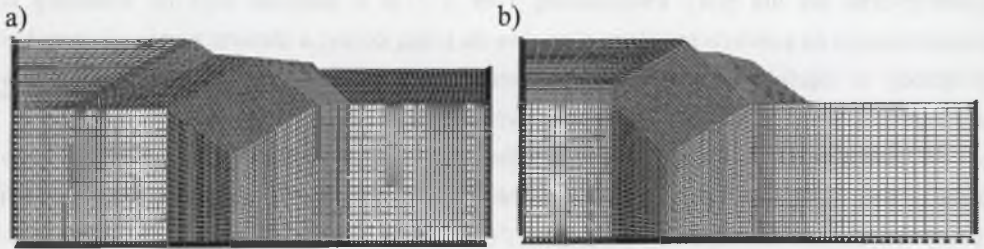
- masyw: $E = 50, 100, 200\text{ MPa}$ (trzy warianty); $\nu = 0,3$; $c = 21\text{ kPa}$; $\phi = 17^\circ$,
- ciągnogwoździe o średnicy 40 mm : $E = 205\text{ GPa}$, $\nu = 0,3$; wytrzymałość na rozciąganie $f_t = 500\text{ MPa}$,
- buława: $E = 30\text{ GPa}$; $\nu = 0,15$; $c = 2000\text{ kPa}$, $\phi = 10^\circ$,
- płyta oporowa: $E = 30\text{ GPa}$, $\nu = 0,15$ (materiał sprężysty).

Warstwa kontaktowa wokół buław charakteryzowała się wartością kąta tarcia wewnętrznego 15° i zerową spójnością (warunek graniczny Coulomba-Mohra). Samą buławę stanowiły elementy prostokątne o szerokości $0,3\text{ m}$.

Charakterystyki geometryczne elementów prętowych i belkowych (poła przekrojów i momenty bezwładności), po podzieleniu przez rozstaw poziomy, przeliczone zostały na 1 m szerokości skarpy (zgodnie z założeniem płaskiego stanu odkształcenia).

Założono trzy warianty sztywności masywu, wyrażające się różnymi wartościami modułu odkształcenia $E = 50; 100; 200$ MPa. Stosunkowo wysokie wartości modułów, a szarzem niskie wartości parametrów wytrzymałościowych mogą wystąpić w spękanych miękkich skałach. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że sztywność masywu gruntowego nie ma wpływu na uzyskiwane wartości współczynnika stateczności.

Analizy MES, jako rozwiązanie sprężysto-plastycznego zagadnienia brzegowego, przeprowadzono w sposób etapowy, rozpoczynając od generacji naprężeń pierwotnych z uwzględnieniem współczynnika rozporu bocznego $K_0 = 0,4$ począwszy od początkowego profilu skarpy. Następnie usuwano warstwami elementy, odpowiednio, przypory lub części masywu, symulując wykop. W trakcie postępu „robót ziemnych”, na założonych poziomach, w skarpy uaktywniane były elementy zbrojące. Dyskretyzacje masywu elementami skończonymi w obu przypadkach pokazane są na rys. 2.



Rys. 2. Dyskretyzacja elementami skończonymi rozważanych skarp wraz z warunkami brzegowymi
Fig. 2. Finite element discretisation of the cut slopes and boundary conditions

W przypadku obliczeń z elementami belkowymi symulującymi gwoździe założono, że na całej długości zapewniona będzie całkowita przyczepność do otaczającego masywu. Zatem, nie wprowadzano warstwy kontaktowej pomiędzy belkami a elementami czworobocznymi. W tym przypadku nie został również uwzględniony wzrost sztywności spowodowany powiększeniem średnicy gwoźdźcia o warstwę otuliny cementowej (o sztywności i wytrzymałości decydowały wyłącznie parametry belki – pręta stalowego). W obu wariantach nie założono wstępnego sprężenia zbrojenia.

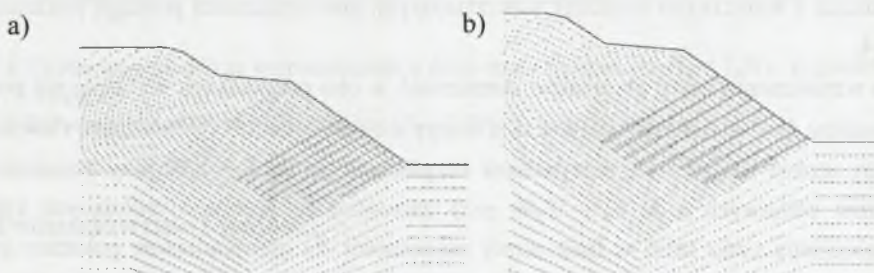
Szczegóły rozmieszczenia zbrojenia pokazane są na rys. 3.

Po usunięciu zaplanowanego obszaru masywu gruntowego i wprowadzeniu zbrojenia wyznaczana była wartość współczynnika stateczności metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie. W podejściu tym zakłada się stopniowe, proporcjonalne obniżanie wartości parametrów wytrzymałościowych (c , ϕ) gruntu aż do osiągnięcia stanu granicznego (osiągnięcia warunku Coulomba-Mohra) w pewnej zamkniętej części skarpy, co skutkuje jej znacznymi przemieszczeniami i niemożnością kontynuowania obliczeń (rozbieżność procesu

iteracyjnego). Stopień redukcji wartości początkowych parametrów wytrzymałościowych w odniesieniu do wartości granicznych wyznacza wartość współczynnika stateczności (bezpieczeństwa):

$$F_s = \frac{c_0}{c_{gr}} = \frac{\text{tg}\phi_0}{\text{tg}\phi_{gr}}$$

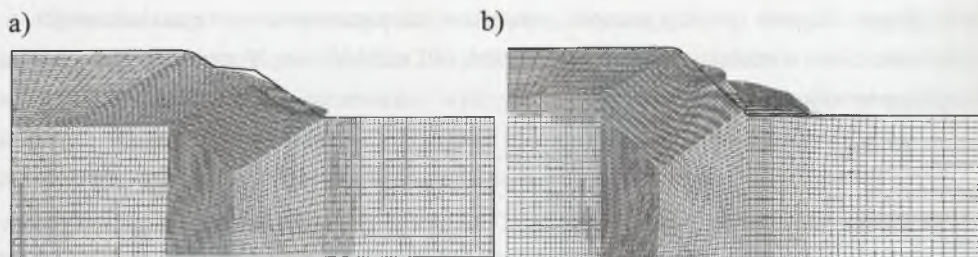
Przewaga takiej metody nad metodami tradycyjnymi wyraża się przede wszystkim w braku założenia *a priori* kształtu powierzchni poślizgu (jako kołowego bądź łamanego). Zaleta ta nabiera szczególnego znaczenia w przypadkach skomplikowanej budowy masywu gruntowego lub skalnego i złożonego profilu skarpy (zbozca). Oczywiście, do uzyskiwanych wyników nie można podchodzić bezkrytycznie, zachowując należyty dystans wobec poczynionych w analizach MES założeń co do zastosowanych warunków zniszczenia oraz efektywności zastosowanych algorytmów numerycznych, a także stosowanego najczęściej założenia płaskiego stanu odkształcenia (jak w niniejszym przypadku).



Rys. 3. Dwa warianty wzmocnienia skarpy: a) gwoździe (el. belkowe), b) kotwy (elementy prętowe)
Fig. 3. Two versions of cut slope reinforcement: a) nails (beam elements), b) anchors (truss elements)

3. Wyniki analiz numerycznych

Na wstępie przeprowadzone zostały analizy stateczności skarp niewzmocnionych w celu stwierdzenia stopnia zagrożenia osuwiskiem. Skarpa 35° , ukształtowana po wykonaniu wykopu, charakteryzuje się wartością współczynnika bezpieczeństwa $F_s = 1,12$ i z teoretycznego punktu widzenia jest stateczna. Jednak wartość ta może być niezadowalająca, zwłaszcza w świetle obowiązujących rozporządzeń i wymagań inwestorów żądających spełnienia warunku $F_{s \min} > 1,3$ (a nawet 1,5). Podwyższenie wymagania co do wartości współczynnika stateczności może być uzasadnione niejednorodnością masywu gruntowego i niepewnością co do wyznaczonych wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu, zwłaszcza wobec potencjalnego niebezpieczeństwa wystąpienia lokalnych powierzchni zlustrzeń (osłabień) o nachyleniu zgodnym z nachyleniem skarpy.

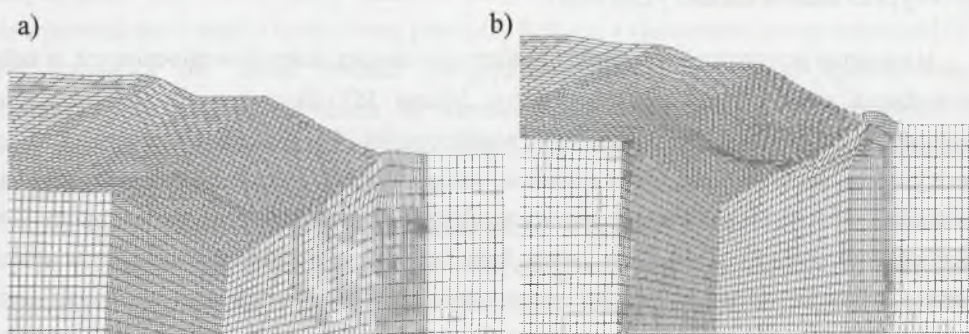


Rys. 4. Deformacje modeli bez wzmocnienia w fazie utraty stateczności: a) po wykonaniu wykopu ($F_s = 1,12$), b) podczas usuwania przypory

Fig. 4. Deformations of the models without reinforcement at failure: a) after excavating ($F_s = 1,12$), b) during removal of a buttress

Skarpa 45° nie wytrzymała próby usunięcia przypory. Osuwisko zostało zainicjowane mniej więcej w połowie procesu jej usuwania. Zdeformowane modele MES w obu przypadkach z widocznymi wyraźnie wykształconymi powierzchniami poślizgu pokazane są na rys. 4.

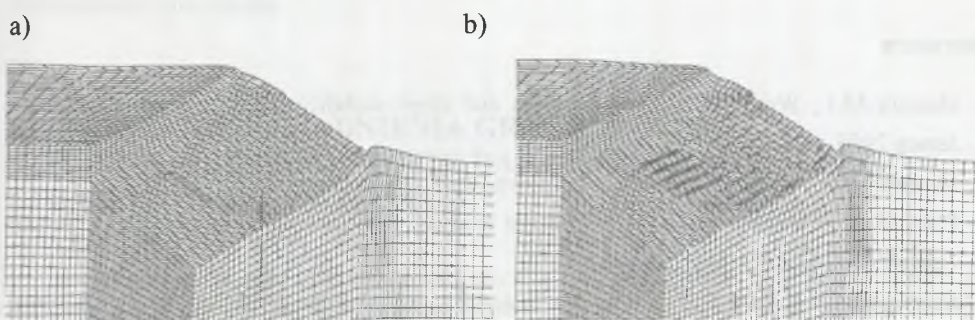
Po wzmocnieniu skarp zbrojeniem stateczność w obu przypadkach wyraźnie się poprawiła. Analizy dwu wariantów wzmocnienia skarpy o nachyleniu 35° (gwoździami i kotwami) wykazały wzrost wartości współczynników bezpieczeństwa do $F_s = 1,70$ przy zastosowaniu elementów belkowych i do $F_s = 1,66$ przy zastosowaniu prętów symulujących kotwy. Przesunięcia siatki MES w fazie utraty stateczności dla obu wariantów pokazane są na rys. 5. Widać, że powierzchnie poślizgu przebiegają poza zasięgiem kotew/gwoździ. Oznacza to, że przyjęta średnica elementów stalowych $d=40$ mm i ich parametry wytrzymałościowe są wystarczające do zapewnienia takiego poziomu bezpieczeństwa.



Rys. 5. Deformacje modeli ze wzmocnieniem w fazie utraty stateczności: a) z elementami belkowymi ($F_s = 1,70$), b) z elementami prętowymi ($F_s = 1,66$)

Fig. 5. Deformations of the models at failure: a) after excavating ($F_s = 1,12$), b) during removal of a buttress

Skarpa 45° po wzmocnieniu na dwa założone sposoby charakteryzuje się wartością współczynnika bezpieczeństwa $F_s = 1,29$. I w tym przypadku powierzchnia poślizgu przebiega poza zasięgiem elementów zbrojących, co oznacza, że ewentualnego dalszego wzrostu wartości współczynnika bezpieczeństwa należałoby poszukiwać zmieniając nachylenie zbrojenia i/lub jego długość.



Rys. 6. Deformacje modeli ze wzmocnieniem w fazie utraty stateczności ($F_s = 1,29$): a) gwoździe, b) kotwy

Fig. 6. Deformations of the models at failure ($F_s = 1.29$): a) nails, b) anchors

4. Podsumowanie i wnioski

W referacie przedstawiono wyniki analiz numerycznych dwóch skarpy o różnym nachyleniu przy użyciu MES. Rozważane były dwa warianty modelu wzmocnienia: z użyciem elementów belkowych (odpowiadających gwoździom) i elementów prętowych (odpowiadających kotwom). Rezultaty obliczeń uzyskanych przy tych dwóch założeniach są bardzo zbliżone. W praktyce, o zastosowaniu konkretnego rozwiązania decyduje charakter masywu podlegającego wzmocnieniu (np. jego stopień zagęszczenia, charakter i kierunek spękań).

Wzmocnienie wykonuje się o różnym nachyleniu do poziomu: od poziomego do przekraczającego 45°. Najczęściej stosowane jest jednak nachylenie 20°-30° do poziomu, co wynika z kierunków głównych pola naprężeń w obrębie skarpy. Zmiana nachylenia wpływa na wyznaczone wartości współczynnika stateczności, co ma decydujące znaczenie nie tylko dla kwestii poprawy bezpieczeństwa skarpy, ale też stanowi argument w rozmowach z inwestorem o planowanym wariantcie zabezpieczenia.

Założenie płaskiego stanu odkształcenia, bez wątpienia, wpływa na uzyskiwane wyniki. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, gdy stosowane są elementy strukturalne (belkowe, prętowe) i trzeba odwoływać się do „roztarcia” ich charakterystyk geometrycznych w

analizowanej jednostkowej grubości modelu. W chwili obecnej moce obliczeniowe powszechnie stosowanych komputerów osobistych są już wystarczające do przeprowadzania obliczeń na modelach przestrzennych. Ciekawie zatem rysuje się perspektywa porównania wartości współczynników stateczności wyznaczonych dla przypadku dwu- i trójwymiarowego.

Literatura

1. Duncan M.J., Wright S.G.: Soil strength and slope stability. John Wiley& Sons, New Jersey 2005.
2. Jarominiak A.: Lekkie konstrukcje oporowe. WKŁ, Warszawa 2000.
3. Potts D.M., Zdravković L.: Finite element analysis in geotechnical engineering. Thomas Telford Ltd., Vol. 1, Vol. 2, London 1999.
4. Stilger-Szydło E.: Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2005.
5. Unterreiner P., Benhamida B., Schlosser F.: Finite element modelling of the construction of a full-scale experimental soil-nailed wall. French National Research Project CLOUTERRE. Ground Improvement 1, 1996, 1-8.

Recenzent: Dr hab. inż. Włodzimierz Brząkała, prof. Pol. Wrocławskiej