ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ Seria: BUDOWNICTWO z. 113

Karolina GORSKA^{*} Politechnika Wrocławska

WRAŻLIWOŚĆ PARAMETRYCZNA MODELU UKŁADU SZCZELINA-ZAWIESINA W ANALIZIE STATECZNOŚCI PIONOWEJ SZCZELINY W GRUNCIE

Streszczenie. W artykule przedstawiono uproszczoną metodę obliczeniową stateczności gruntów, która wykorzystuje metodę równowagi granicznej. Wskaźnik bezpieczeństwa zdefiniowano na drodze redukcji parametrów wytrzymałościowych. Porównano uzyskane wyniki z wynikami otrzymanymi za pomocą analizy sprężystoplastycznej przy użyciu programu Plaxis 3DFoundation. Otrzymano dobrą zgodność wyników. Przeanalizowano zmienność nachylenia płaszczyzny poślizgu θ oraz wartości wskaźnika bezpieczeństwa *FS* w zależności od długości szczeliny i poziomu zwierciadła wody gruntowej.

PARAMETRIC SENSIVITY OF TRENCH–SLURRY SYSTEM IN SLURRY SUPPORTED TRENCH

Summary. The paper presents simplified calculation approach, based on limit equilibrium method. Factor of safety FS is defined by reduction of strength parameters. Results are compared with an elasto-plastic analysis, making use of the Plaxis 3DFoundation code. Good agreement of results is found. Variation of: slip surface angle θ and factor of safety FS in relation to length of the trench; and to the ground water table level is analyzed.

1. Wstęp

Ściany szczelinowe są często stosowaną technologią wykonawstwa podziemnych kondygnacji budynków, tuneli, uszczelniania wałów przeciwpowodziowych czy też zabezpieczeń przeciwfiltracyjnych (cut-off walls) [3, 5]. Metody oceny bezpieczeństwa oraz samo wymiarowanie są powszechnie znane i stosowane dla samej ściany szczelinowej [3, 6]. Inaczej jest dla pierwszego etapu w technologii, czyli

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Włodzimierz Brząkała, prof. Politechniki Wrocławskiej.

wykonania szczeliny, tu tak szerokiej gamy rozwiązań nie ma. Stosuje się raczej empiryczną zasadę, iż jeżeli spełnione są dwa warunki, tzn. zwierciadło zawiesiny przewyższa o 1m poziom zwierciadła wody gruntowej oraz ciężar zawiesiny jest nie mniejszy niż 10,5 kN/m³, to stateczność szczeliny jest zapewniona. Sytuacja taka jest częściowo spowodowana brakiem jasno sprecyzowanych metod oceny stateczności szczeliny. Istniejące metody powstały w czasach, gdy możliwości obliczeniowe były mocno ograniczone. Podejmują one próby dokładnego opisu, jednak zawierają uproszczenia, które nie określają szczegółowo, jak postępować w przypadku, np. przewarstwień z gruntów "słabych". Na analizę takich szczególnych przypadków pozwala użycie programów numerycznych analizy sprężysto-plastycznej (Plaxis, FLAC).

Celem pracy jest sprawdzenie przyjętego kształtu klina odłamu oraz założeń obliczeniowych, wykorzystujących uproszczoną metodę obliczeniową w ramach przestrzennej równowagi granicznej. Porównuje się otrzymane wyniki z wynikiem otrzymanym za pomocą analizy sprężysto-plastycznej przy użyciu komercyjnego programu Plaxis 3DFoundation. Określenie miary bezpieczeństwa na drodze prostej procedury obliczeniowej prowadzone jest w programie Excel.

PARAMETRIC SENSIVITY-OF FRENCH-SEDURICE SYSTEM BY SLERNY-

2. Uproszczone metody obliczeniowe

Metody obliczeniowe w zagadnieniach stateczności szczeliny mogą być podzielone na dwie grupy: klina odłamu (szczegółowo przedstawione w [2]) oraz analizę sprężysto-plastyczną (MRS [1], MES). Metody klina odłamu polegają na analizie płaskiej lub przestrzennej bryły odłamu na zasadzie bilansu działających sił wypadkowych na zsuwający się klin lub rozpatrujące jednostkowe siły dla jednego punktu szczeliny. W [2] przedstawiono uproszczone rozwiązanie, którego korekta została przedstawiona w niniejszej pracy. Korektą jest przyjęcie jednobryłowego klina odłamu w przeciwieństwie do wcześniej prezentowanego wielobryłowego, złożonego z graniastosłupów i ostrosłupów.

vanoyment emphasion annet, assessment with precision of the optimization of precision processification and a constraint of the statement of the original second one state warnet means in proceeding and a list. 51. Merody due no original second one state warnet means in procession and a list. 51. Alcordy due no bet precision and the state warnet means and the second of the statements of the state second one of the state of the second of the second of the statements of the second statement of the second statement of the second o

Oriolum rationers, Datam u.E. War Directory, Contractor (Pollarchille Work) and a

3. Prezentacja własnej metody

3.1. Założenia do obliczeń

Przyjęto jako bryłę odłamu graniastosłup, nawiązując do rozwiązania zaproponowanego przez Coulomba. Upraszcza to znacząco obliczenia. Wykorzystano metodę równowagi granicznej, bilansując siły działające na tak określony klin odłamu. Uwzględniono: W – ciężar klina, Q – wypadkową obciążenia na powierzchni klina odłamu, P_h – wypadkową efektywnego parcia szkieletu gruntowego, 2S – wypadkowe siły tarcia na powierzchniach bocznych oraz R – wypadkową siłę działającą na powierzchni poślizgu (rys. 1). Dla rozpatrywanego przypadku zapisano równania równowagi w postaci:





Rys. 1. a) Kształt klina odłamu; b) wielobok sił w poprzecznej płaszczyźnie symetrii bryły odłamu Fig. 1. a) Shape of the wedge; b) polygon forces in cross-section of symmetry of the wedge

Przeprowadzono studium wartości najbardziej niekorzystnego kąta θ_{cr} oraz wartości FS dla różnych długości szczeliny L, przy stałej głębokości H, a także studium wartości FS dla różnych poziomów ZWG.

3.2. Wskaźnik stateczności

Wskaźnik stateczności dla szczeliny o głębokości H, długości L i szerokości B jest wyznaczany na drodze redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntu ($tg\varphi$ i c), tj:

$$S = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_{rred}} = \frac{c}{c_{rred}}$$
(1)

Przy spełnionym jednocześnie warunku równowagi:

$$P_{s} = P_{h} + P_{w} \tag{2}$$

gdzie: P_s – parcie zawiesiny w szczelinie, $P_s = 0.5 \cdot \gamma_s \cdot H_s^2 \cdot L$, [kN], P_h – parcie efektywne gruntu wyznaczone z bilansu działających sił na klin odłamu, [kN], P_w – parcie wody, $P_w = 0.5 \cdot \gamma_w \cdot H_w^2 \cdot L$, [kN].

Procedura wyznaczania wskaźnika stateczności w programie Plaxis 3DFoundation również opiera się na redukcji $tg\phi$ i c.

4. Analiza sprężysto-plastyczna

Do modelowania użyto programu Plaxis 3DFoundation. Program ten do obliczeń wykorzystuje metodę elementów skończonych.

Przy modelowaniu pionowej szczeliny o wymiarach 1x6x10 m wykorzystano dwie osie symetrii, przez co do obliczeń przyjęto szczelinę 0,5x3x10 m i prostopadłościenny obszar gruntu o wymiarach 8x10x14 m, który odpowiada jednej z ćwiartek zadania przestrzennego (rys. 2).



Rys. 2. Schemat statyczny – wymiary obszaru obliczeń i utwierdzenie brzegu Fig. 2. The geometric assumptions – dimensions of the domain of calculation and boundary fixities Proces głębienia szczeliny modelowano przez kolejne usuwanie warstwy gruntu o miąższości jednego metra. Parcie hydrostatyczne zawiesiny przyjęto jako rosnące z głębokością obciążenie zewnętrzne, przyłożone prostopadle do brzegów oraz dna szczeliny. Obliczenia wykonano w zakresie naprężeń całkowitych. Nie uwzględniono sił ssania powstających podczas podnoszenia czerpaka z urobkiem. Według [4], siły te nie mają istotnego wpływu, jeśli długość czerpaka jest znacznie mniejsza od długości szczeliny. Nie uwzględniono generowania zmian ciśnienia porowego, zakładając wystarczająco dobre warunki drenażu, ani mieszania się cieczy. W obliczeniach pominięto efekt naskórkowy typu "filter cake", zwiększający lokalną wytrzymałość gruntu przy ścianie szczeliny, ale uwzględniono obecność tej cienkiej warstwy jako przegrodę uniemożliwiającą odpływ zawiesiny do gruntu.

5. Dane do przykładów

Do obliczeń przyjęto jednorodny, izotropowy ośrodek gruntowy – piasek średni – ze swobodnym zwierciadłem wody gruntowej na głębokości 2 m poniżej poziomu terenu. Parametry do obliczeń sprężysto-plastycznych przyjęto jak dla modelu Coulomba-Mohra i niestowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia ($\psi = 0^{\circ}$). Ciężar gruntu powyżej zwierciadła wody gruntowej wynosi $\gamma = 18,5$ kN/m³, a poniżej $\gamma' = 9,0$ kN/m³. Kąt tarcia wewnętrznego wynosi $\phi = 32^{\circ}$. Ciężar zawiesiny wynosi $\gamma_s = 10,5$ kN/m³. Poziom zwierciadła zawiesiny jest równy poziomowi terenu.

6. Przykłady

6.1. Przykład I

Celem obliczeń jest określenie kształtu klina odłamu podczas zniszczenia oraz porównanie go z przyjętym uproszczonym kształtem. Analizowano szczelinę o wymiarach: 1×6×10 m (szerokość × długość × głębokość).

Do zniszczenia doprowadzono przez redukcję parametrów wytrzymałościowych $tg\phi$ i c. Termin zniszczenie nie jest jednoznaczny, gdyż nie można precyzyjnie określić kiedy ono następuje. Uznano, że nastąpi ono w przypadku nagłego przyrostu przemieszczeń wybranych punktów na ścianie szczeliny.

Na rys. 3 można zaobserwować zadowalającą zgodność kształtu osuwającego się klina odłamu z przyjętym w uproszczonej metodzie obliczeniowej. Nachylenie umownej płaszczyzny poślizgu θ jest zbliżone do kąta $\theta_{cr} = 67^{\circ}$, który został wyznaczony na podstawie prezentowanej metody. Nachylenie powierzchni bocznych klina jest bliskie 90°, co odpowiada przyjętemu założeniu dotyczącemu kształtu klina odłamu. Uproszczeniem jest przyjęcie powierzchni poślizgu jako płaszczyzny. W modelu jest to powierzchnia wypukła, oparta na trójkątnych płaszczyznach prostopadłych do ściany szczeliny, przylegających do jej krańców. Założenie to ma nieznaczny wpływ na otrzymane rozwiązanie.



Rys. 3. Przemieszczenia podczas umownego zniszczenia [m] Fig. 3. Displacements during assumed failure [m]

6.2. Przykład II

Celem jest przedstawienie zależności nachylenia płaszczyzny poślizgu θ_{cr} oraz wartości współczynnika bezpieczeństwa FS od długości szczeliny L.

Do obliczeń przyjęto szczelinę o stałej głębokości 10 m, szerokości 1 m i zmiennej długości od 2 m do 100 m. Poziom zwierciadła wody gruntowej wynosi 2 m.

Rysunek 4 przedstawia otrzymaną zmienność wartości kąta nachylenia płaszczyzny poślizgu θ_{cr} w relacji do długości szczeliny *L*. Dla bardzo krótkich szczelin wartość θ_{cr} jest duża i zbliżona do 80°. Wraz ze wzrostem długości wartość tego kąta spada i osiąga wartość bliską 61°. Kąt ten odpowiada wartości kąta

nachylania płaszczyzny poślizgu dla przypadku 2D (rozwiązanie Coulomba), czyli $\theta_{cr} = \pi/4 + \phi/2$, co jest prawdziwe, bo dla szczelin długich, czyli o długości znacznie przekraczającej głębokość, wpływ sił na powierzchniach bocznych jest znikomy.



Rys. 4. Zalcźność kąta nachylenia płaszczyzny θ [°] poślizgu od długości szczeliny L [m] Fig. 4. The dependence of the slip surface angle θ [°] on the length of the trench L [m]

Wraz ze wzrostem długości szczeliny spada również wartość współczynnika bezpieczeństwa FS (rys. 5). Jest to również związane z dojściem do rozwiązania Coulomba dla przypadków szczelin długich. To spostrzeżenie potwierdzone zostało przez otrzymanie wartość FS bliskiej jedności.



Rys. 5. Zależność wartości współczynnika bezpieczeństwa FS od długości szczeliny L [m] Fig. 5. The dependence of the factor of safety FS on the length of the trench L [m]

Zależność nachylenia płaszczyzny poślizgu θ_{cr} oraz wartości współczynnika bezpieczeństwa *FS* od długości szczeliny *L* została potwierdzona również w obliczeniach numerycznych.

6.3. Przykład III

Celem jest przedstawienie zależności wartości współczynnika bezpieczeństwa FS od poziomu zwierciadła wody gruntowej h_w dla różnych długości szczeliny L.

Przyjęto do obliczeń szczelinę jak w przykładzie poprzednim. Poziom zwierciadła wody gruntowej waha się od 2 m do 10 m (praktycznie brak wody), skok co 2 m.

Dla szczeliny o stałej długości po obniżeniu zwierciadła wody gruntowej następuje wzrost wartości wskaźnika bezpieczeństwa FS (rys. 6). Wynika to z ogólnej poprawy warunków gruntowych wokół szczeliny. Następuje zmniejszenie wartości parcia całkowitego na ścianie szczeliny. Konsekwentnie potrzebny jest mniejszy rozpór szczeliny. Następuje hipotetyczne przewyższenie wartości parcia zawiesiny P_z nad sumą parcia gruntu i wody P_h+P_w . Powoduje to wzrost wskaźnika bezpieczeństwa FS.



Rys. 6. Zależność wartości współczynnika bezpieczeństwa FS od poziomu zwierciadła wody gruntowej h_w [m]

Fig. 6. The dependence of the factor of safety FS on the ground water level hw [m]

6.4. Przykład IV

Celem jest porównanie dwóch metod obliczeniowych: zaproponowanej analizy uproszczonej oraz analizy sprężysto-plastycznej. Na osi poziomej zaznaczono wartości współczynnika bezpieczeństwa uzyskane z metody uproszczonej, natomiast na osi pionowej z obliczeń numerycznych. Każdy punkt odnosi się do konkretnej głębokości szczeliny, oznaczenie na rysunku.



Rys. 7. Porównanie wartości współczynników bezpieczeństwa FS z uproszczonej metody oraz z obliczeń numerycznych

Fig. 7. Comparison of the factor of safety FS form simplified computational method and numerical calculations

Wszystkie punkty wykresu (rys. 7) znajdują się ponad linią wyznaczającą równą wartość obu wskaźników, zatem przeprowadzone obliczenia wskazują, iż otrzymane wyniki znajdują się po stronie bezpiecznej, a proponowana metoda obliczeniowa może być stosowana do obliczeń inżynierskich. Zaproponowana metoda uproszczona nie wymaga wyrafinowanego oprogramowania MES.

7. Podsumowanie i wnioski

Krytyczne wartości kąta θ przyjmują wartości większe od wartości przyjętej dla przypadku płaskiego (rozwiązanie Coulomba).

Przyjęty kształt uproszczonego klina wpisuje się w kształt klina wyznaczonego z analizy sprężysto-plastycznej (Plaxis 3DFoundation).

Zaproponowana metoda nie pozwala na ocenę wpływu uwarstwienia, a w szczególności przewarstwień z gruntu słabego bądź mocnego. Będzie to przedmiotem dalszych badań. Zaproponowana metoda nie pozwala na pełne uwzględnienie obciążenia działającego na powierzchni klina. Istnieje tylko możliwość uwzględnienia wpływu obciążenia działającego wzdłuż poprzecznej osi symetrii szczeliny.

Otrzymane rozwiązanie jest bezpieczne w tym sensie, że pozwala na wyznaczenie wskaźników bezpieczeństwa, które są mniejsze niż w analizie sprężysto-plastycznej.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń nie można określić jednoznacznie bezpiecznego poziomu *FS*. Konieczna jest dalsza analiza z uwzględnieniem losowości wybranych parametrów.

BIBLIOGRAFIA

- Brząkała W., Gorska K.: Problemy stateczności pionowej szczeliny w gruncie. XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii, Krynica Górska, marzec 2006, s. 319-328.
- Brząkała W., Gorska K.: Uproszczona analiza stateczności pionowej szczeliny w gruncie. XXXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii, Krynica Górska, marzec 2008, Górnictwo i Geoinżynieria, Kwartalnik AGH nr 32, Kraków 2006, s. 59-66.
- Hanjal I., Marton J., Regele Z.: Construction of slurry walls. Akad.Kiado, Budapest 1984.
- Wytyczne do projektowania i wykonywania fundamentów szczelinowych. Instrukcja ITB nr 230, Wydawnictwo ITB, Warszawa 1980.
- 5. Kotlicki W.: Ściany szczelinowe. Materiały Budowlane, nr 3, 2001, s. 5-9.
- Warunki techniczne wykonania ścian szczelinowych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2003.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy – grant promotorski nr N506 010 32/1269.

Recenzent: Dr hab. inż. Lidia Fedorowicz