Wykorzystanie metody elementów skończonych w projektowaniu posadowienia zapory ziemnej na gruntach organicznych

Dr inż. Simon Rabarijoely, SGGW, Warszawa

1. Charakterystyka programu SAGE-CRISP

Program SAGE-CRISP jest trójwymiarową analizą konsolidacji podłoża i stateczności budowli, oparta na metodzie elementów skończonych. Może on być wykorzystywany do przewidywania zachowania się konstrukcji (budynków, mostów, budowli ziemnych), zmian parametrów mechanicznych i fizycznych gruntów obciążonych budowlami. Obliczenia mogą być wykorzystane do projektowania budowli ziemnych na podłożach słabonośnych zarówno w warunkach z odpływem (drenażem), jak i bez drenażu podłoża gruntowego. Obliczenia przy użyciu programu SAGE-CRISP wykonywane są z wykorzystaniem wielu modeli odwzorowujących zachowanie się gruntu pod obciążeniem, takich jak: jednorodny (izotropowy) liniowo-sprężysty, anizotropowy liniowo-sprężysty, niejednorodny liniowo-sprężysty (zmiana parametrów w profilu gruntowym), liniowo-sprężysty – idealnie plastyczny, opartych na warunkach zniszczenia wg Von Mises'a, Tresca, Druckera--Pragera i Coulomba-Mohra, modelu stanu krytycznego Cam-Clay i zmodyfikowanego Cam-Clay.

2. Charakterystyka sprężysto--plastycznego modelu Cam-Clay

Model Cam-Clay zaproponowany przez Roscoe'a i Burlanda (1968)



[7], Wroth'a (1977) [8] jest modelem sprężysto-plastycznym opartym na teorii stanu krytycznego z jednoparametrowym izotropowym wzmocnieniem gęstościowym. Powierzchnię stanu granicznego oraz charakterystyki modelu Cam-Clay przedstawia rysunek 1. Charakterystycznymi krzywymi leżącymi na powierzchni stanu granicznego w przestrzeni "dewiator" naprężenia (q) – średnie naprężenie efektywne (p') – objętość właściwa (V) są: linia normalnej konsolidacji (LNK) oraz linia stanu krytycznego (LSK).





Tabela 1. Parametry geotechniczne wykorzystane w obliczeniach stanu naprężenia i odkształcenia [6]

	Parametry geotechniczne						
к	λ	۲ – ۱	М	v	γ [kN/m³]	$\mathbf{k}_{x} = \mathbf{k}_{y} [\mathbf{m}/\mathbf{s}]$	
0,06	0,35	2,83	1,20	0,31	13,5	10-8	

Linię izotropowej konsolidacji podczas obciążenia i linię odprężenia (LSK) w układzie V-lnp' oraz linię stanu krytycznego i obwiednię plastyczności w układzie q-p' przedstawiono na rysunku 2. Przyjęta w modelu obwiednia plastyczności ma kształt elipsy, której oś wielka określana jest przez naprężenie prekonsolidacji p_c, natomiast połowa osi małej elipsy wyznaczona jest punktem przecięcia obwiedni plastyczności z linią stanu krytycznego (rys. 2).

Parametrami modelu Cam-Clay, niezbędnymi do określenia kształtu obwiedni plastyczności, zmiany objętości właściwej oraz sprężystego i plastycznego zachowania się gruntu są: λ – nachylenie linii konsolidacji przy obciążeniu na płaszczyźnie V-Inp', κ – nachylenie linii odprężenia na płaszczyźnie V-Inp', G – moduł odkształcenia postaciowego lub współczynnik Poissona – v, Γ – objętość właściwa na linii stanu krytycznego na płaszczyźnie V-lnp', gdy p' = 1, M – nachylenie linii stanu krytycznego na płaszczyźnie q-p', p'_c – naprężenie prekonsolidacji.

3. Wyznaczenie charakterystyk i parametrów do modelu Cam--Clay

Jedną z podstawowych metod wyznaczania charakterystyk i parametrów w sprężysto-plastycznych modelach gruntów jest wykorzystanie wyników badań w aparacie trójosiowym. Dla określenia parametrów do modelu Cam-Clay wymagane jest wyznaczenie linii normalnej konsolidacji (LNK) i linii konsolidacji podczas wtórnego obciążenia (LWK) oraz linii stanu krytycznego (LSK). Wyznaczanie charakterystyk LNK i LWK polega na obciążaniu próbek, odprężaniu oraz powtórnym obciążaniu. Badanie przydatności modeli dostępnych w CRISP, które ma być wykorzystywane do budowy nasypu było przedstawione przez Almeida (1986) [1].

W niniejszym artykule parametry λ i κ (rys. 2 i tab. 1) wyznaczono na podstawie wskaźnika ściśliwości w zakresie normalnej konsolidacji C_c oraz wskaźnika ściśliwości w zakresie powtórnego obciążenia C_r. Do wyznaczenia parametrów λ i κ na podstawie wskaźników C_c i C_r wykorzystano następujące zależności [6]:

$$\lambda = C_c / \ln 10$$
 (1)

$$\kappa = C_r / \ln 10$$
 (2)

4. Charakterystyka obiektu Nielisz

Zbiornik wodny Nielisz wraz z zaporą czołową położony jest w Kotlinie Zamojskiej, w północnej części Wyżyny Lubelskiej. Budowa zapory czołowej polegała na rozbu-



Rys. 3. Zapora Nielisz realizowana w dwóch etapach z przeciążeniem: A – I etap z nasypami przeciążeniowymi, B – II etap; 1 – istniejący nasyp, 2 – rozebranie istniejącego nasypu, 3 – nasyp przeciążeniowy, 4 – podwyższenie korpusu do rzędnej 199,00, 5 – repery powierzchniowe i wgłębne



Rys. 4. Dyskretyzacja korpusu i podłoża dla potrzeb obliczeń MES: 4a – stan początkowy, 4b – I etap budowy, 4c – II etap budowy

dowie korpusu istniejącej niższej zapory zbiornika suchego. Przekrój poprzeczny zapory czołowej Nielisz przedstawiono na rysunku 3. Podłoże zapory czołowej tworzy kompleks utworów czwartorzędowych o zróżnicowanej miąższości i litologii, zalegający na wyerodowanej powierzchni margli i opoki kredowej. Warstwy słabonośne podłoża tworzą holoceńskie namuły, lokalnie torfy oraz pyły i pyły piaszczyste w stanie miękkoplastycznym [3, 4, 5, 6]. Typowy układ podłoża stanowi warstwa pyłu piaszczystego zalegającego na warstwie namułu organicznego (z przewarstwieniem pyłu) podścielonego warstwą piasku. Najsłabszą warstwę podłoża stanowią namuły organiczne o zawartości części organicznych I_{om} = 10–20% i I_{om} = 21–30%, charakteryzujące się wilgotnością naturalną w_n = 110–130% i w_n = 130–150% przy gęstości objętościowej gruntu ρ = 1,30–1,40 t/m³ i ρ = 1,25–1,30 t/m³. Występujące



Rys. 5. Izolinie obliczonych wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach oraz pionowe i poziome przemieszczenia

grunty słabonośne są lekko prekonsolidowane o współczynniku prekonsolidacji OCR = 2–3. Miąższość słabonośnego podłoża wynosi od 3 do 5 m.

Ze względu na przyjęty 3-letni okres realizacji zbiornika i związaną z tym konieczność wcześniejszego rozpoczęcia uszczelnienia i zabezpieczenia skarp zapory oraz wykonania drenażu zapory zdecydowano się na 2-etapową budowę z zastosowaniem dodatkowych nasypów przeciążeniowych (rys. 3).

5. Obliczone i pomierzone wartości osiadań

W obliczeniach programem SAGE-CRISP, podłoże i nasyp zostały dyskretyzowane na 532 węzły, 1520 elementów. Z nasypu, z pierwszego etapu, po zakończeniu konsolidacji, ze strefy WD i WG zostało zdjęte w sumie 58 elementów, przy czym elementy te były wykorzystane do podniesienia rzędnej nasypu w koronie zapory na 199 m n.p.m. do końca drugiego etapu (rys. 4).

Obliczony wzrost nadwyżki ciśnienia wody w porach Δ u zauważany był na początku każdego etapu budowy. Na początku pierwszego etapu wartość Δ u w strefie podłoża od WG była minimalnie niższa od Δ u ze strefy podłoża od WD, pod koroną zapory nadwyżki te nie występowały (rys. 5a). Na końcu drugiego etapu budowy średnia wartość nadwyżki ciśnienia wody w porach Δ u wynosiła 10 kPa w podłożu pod koroną zapory.

Obliczony wzrost pionowego naprężenia efektywnego $\sigma'_{vo} = 168$ kPa i całkowitego $\sigma_{vo} = 178$ kPa obserwowany był na początku każdego etapu budowy. Na początku pierwszego etapu wartość $\sigma'_{vo} =$ 108 kPa w strefie podłoża od WG była taka sama jak wartość od WD, $\sigma'_{vo} = 108$ kPa, pod koroną zapory przyrost naprężenia nie pojawił się. (rys. 5b i c). Na końcu drugiego etapu budowy średnia wartość pionowego naprężenia efektywnego i naprężenia całkowitego wynosiła





Rys. 6. Obliczone i pomierzone przemieszczenie pionowe w pomiarowym przekroju

odpowiednio σ'_{vo} = 123 kPa, σ_{vo} = 167 kPa. Była to wartość największa, co spowodowało przemieszczenie pionowe o około 31,6 cm. Obliczenie osiadań przeprowadzono programem numerycznym, w którym przyjęto teorię konsolidacji zawartą w programie SAGE-CRISP [1]. Do obliczeń przyjęto schematy zapory i podłoża przedstawione na rysunkach 3 i 4. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 6. Wyniki te są zbieżne z pomierzonymi wartościami osiadań. Największe różnice osiadań sięgające 56%, stwierdzono w początkowym okresie konsolidacji drugiego etapu dla około 100 dni konsolidacji. Po dłuższym okresie konsolidacji różnice te zmniejszyły się do 1%.

6. Wnioski

Teorię konsolidacji zawartą w programie SAGE-CRISP można wykorzystać do etapowej budowy nasypu posadowionego na słabonośnych gruntach organicznych, takich jak np. namuły organiczne. Dobrą zgodność wyników uzyskano pomiędzy obliczonym i obserwowanym przemieszczeniem pionowym, poziomym oraz ciśnieniem wody w porach. Dobór modelu gruntowego jest

bardzo ważny w projektowaniu geotechnicznym, a w tym przypadku dla nasypu wykorzystany był model liniowo-sprężysty, dla namułów organicznych podłoża - zmodyfikowany model Cam--Clay. Dwuetapowa budowa nasypu z przeciążeniem w przypadku zapory w Nieliszu była decyzją trafną. Dzięki temu osiągniecie korony na rzędnej 199 m n.p.m. nie spowodowało utraty stateczności podłoża nasypu (warunek I stanu granicznego), szybciej też osiągnięto docelowe wartości osiadania podłoża (II stanu granicznego).

Ponieważ w tej analizie uzyskano zbieżność wyników obliczeniowych MES z pomierzonym, dlatego też zaleca się, aby zastosowano ją dla innych obiektów hydrotechnicznych.

Praca wykonana w ramach Projektu MNiSW, Nr NN506397135, Nr 3971/B/T02/2008/35

BIBLIOGRAFIA

[1] Almeida M. S. S., Britto A. M., Parry R. H. G., Can. Geotch., 1986, J. 23, 103-114 [2] Britto A. M., Gunn M. J., Critical state soil mechanics via finite elements. Ellis Horwood Limited, New York, 1987 [3] Hartlen J., Wolski W., Embankments on organic soils. Amsterdam, Elsevier, 1996 [4] Lechowicz Z., Współczesne kierunki badań gruntów organicznych. Wykład wprowadzający na Seminarium "Współczesne Problemy Geoinżynierii w Rejonie Szczecińskim", Szczecin, 1996 1 - 18[5] Lechowicz Z., Rabarijoely S., Zbiornik Nielisz – badania wzmocnienia słabego podłoża. Przegl. Nauk. SGGW, 1996, 12: 33 - 44[6] Rabarijoely S., Wykorzystanie badań dylatometrycznych w wyznaczeniu parametrów gruntów organicznych obciążonych nasypem, praca doktorska, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW. 2000 [7] Roscoe K. H., Burland J. B., On the generalized behaviour of "wet" clay. In Engineering plasticity. Edited by. J. Heyman, and F. Leckie. Cambridge University Press. London, England, 1968, p. 535-609 [8] Wroth C. P., The predicted performance

of soft clay under a trial embankment loading based on the Cam-clay model. In Finite elements in geomechanics. Edited by G. Gudebus. John Willey&Sons, Chapt. 6, 1977, p. 191–208