

WYKORZYSTANIE METOD NUMERYCZNYCH DO POSADOWIENIA ZAPORY ZIEMNEJ NA GRUNTACH ORGANICZNYCH

Simon Rabarijoely✉

Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono zaporę ziemną posadowioną na gruntach organicznych. Zapora była i nadal jest monitorowana za pomocą pomiarów piezometrycznych oraz pomiarów przemieszczeń pionowych i poziomych obserwowanych reperów. Obliczenia przeprowadzono za pomocą modelu zmodyfikowanego Cam-Clay (MCC). Wyniki obliczonych przemieszczeń pionowych porównano z obserwowanymi oraz poddano krytycznej dyskusji.

Słowa kluczowe: zapora, namuł organiczny, analiza numeryczna, MES

WSTĘP

Obiekt doświadczalny, którym jest zapora w Nieliszu, związany jest z budową zapór czołowych zbiorników wodnych. Ze względu na przyjęty trzyletni okres realizacji zapory i związaną z tym konieczność wczesnego rozpoczęcia uszczelnienia i ubezpieczenia skarp zapory zdecydowano się na dwuetapową budowę z zastosowaniem nasypów przeciążających – wstępne obciążenie (Lechowicz i Rabarijoely, 1996a). Schemat realizacji dwuetapowej budowy z przeciążeniem pokazano w rozdziale pt. „Analiza wyników i dyskusja – obliczone i pomierzone wartości osiadań nasypu”. Zastosowane nasypy przeciążające miały na celu wcześniejsze osiągnięcie końcowych wartości osiadań słabonośnego podłoża, przede wszystkim w rejonie drenażu zapory od wody dolnej (WD) oraz dolnej części ubezpieczenia skarpy od wody górnej (WG). W latach 1994–1996 na obiekcie Nielisz, w ramach rozpoznania początkowych warunków geotechnicznych oraz oceny ich zmiany podczas etapowej budowy zapory, zostały przeprowadzone, z udziałem autora, badania laboratoryjne i terenowe (Lechowicz i Rabarijoely, 1996b). W niniejszym

artykule przedstawiono opis i lokalizację obiektów, warunki geotechniczne wraz z właściwościami fizycznymi i parametrami mechanicznymi występujących w podłożu zapory gruntów organicznych.

MATERIAŁ I METODY

Do obliczeń wykorzystano program CRISP. Pozwala on na trójwymiarową analizę konsolidacji podłoża i stateczności budowli, opartą 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 w warunkach z odpływem (drenażem) oraz bez drenażu podłoża gruntowego. Obliczenia z użyciem programu 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

Simon Rabarijoely <https://orcid.org/0000-0002-4409-223X>

✉simon_rabarijoely@sggw.pl

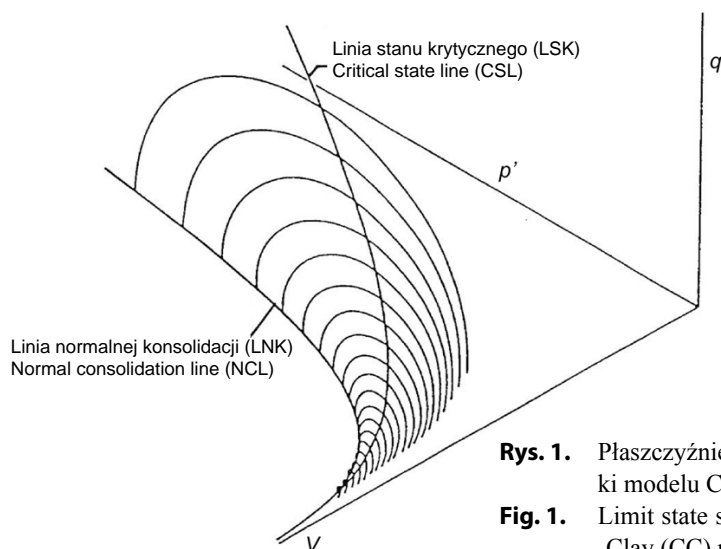
parametrów w profilu gruntowym), liniowo-sprężysty – idealnie plastyczny, oparty na warunkach zniszczenia według von Misesa, Tresca, Druckera–Pragera i Coulomba–Mohra, modelu stanu krytycznego Cam-Clay (CC) i zmodyfikowanego Cam-Clay (MCC).

Charakterystyka sprężysto-plastycznego modelu Cam-Clay (CC)

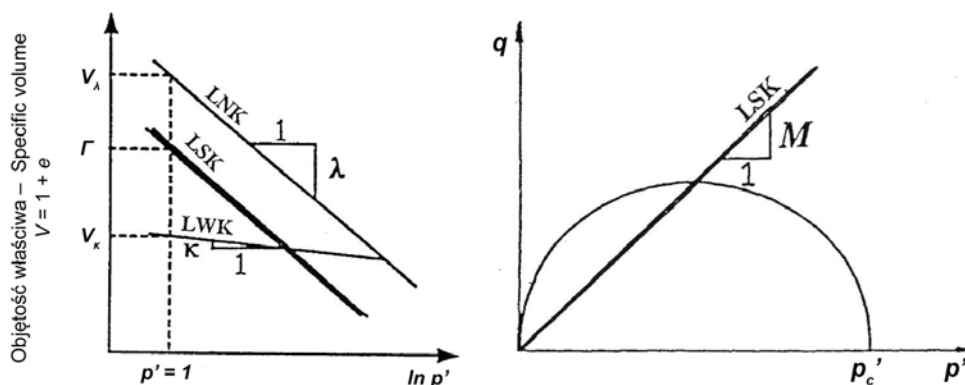
Model Cam-Clay (CC) zaproponowany przez Roscoe’a i Burlanda (1968) oraz Wrotha (1975) jest modelem sprężysto-plastycznym opartym na teorii stanu krytycznego z jednoparametrowym izotropowym wzmocnieniem gęstościowym. Powierzchnię stanu granicznego oraz charakterystyki modelu Cam-Clay (CC) przedstawia

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).

Linie izotropowej konsolidacji podczas obciążenia i linii odprężenia (LSK) w układzie $V-\ln p'$ 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).



Rys. 1. Płaszczyźnie stanu granicznego oraz charakterystyki modelu Cam-Clay (CC) w przestrzeni $q-p'-V$
Fig. 1. Limit state surface and characteristics of the Cam-Clay (CC) model in $q-p'-V$ space



Rys. 2. Charakterystyki modelu Cam-Clay (CC) na płaszczyźnie: (a) $q-p'$; (b) $V-\ln p'$
Fig. 2. Characteristics of the Cam-Clay (CC) model on the plane: (a) $q-p'$; (b) $V-\ln p'$

Parametrami modelu Cam-Clay (CC) 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 $V-\ln p'$, κ – nachylenie linii odprężenia na płaszczyźnie $V-\ln p'$, G – moduł odkształcenia postaciowego lub ν – współczynnik Poissona, Γ – objętość właściwa na linii stanu krytycznego na płaszczyźnie $V-\ln p'$, gdy $p' = 1$, M – nachylenie linii stanu krytycznego na płaszczyźnie $q-p'$, p_c' – naprężenie prekonsolidacji.

Wyznaczenie charakterystyk i parametrów do modelu Cam-Clay (CC)

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 (CC) wymagane jest wyznaczenie linii normalnej konsolidacji (LNK) i linii konsolidacji podczas wtórnego obciążenia (LKW) oraz linii stanu krytycznego (LSK). Wyznaczanie charakterystyk LNK i LKW polega na obciążaniu próbek, odprężaniu oraz powtórny obciążaniu. Przydatność modeli dostępnych w CRISP, które ma być wykorzystywane do budowy nasypu, została szeroko przedstawiona w literaturze (Almeida, Britto i Parry, 1986; Britto i Gunn, 1987; Uliniarz, 2007; Biały, 2008; Gwóźdź-Lasoń, 2009; Meyer i Szczygielski, 2010; Mitew-Czajewska, 2016; Almeida, Riccio, Hosseinpour i Alexiew, 2018).

W niniejszym artykule parametry λ i κ dla namułu organicznego (rys. 2, tab. 1) wyznaczono na podstawie wartości wskaźnika ściśliwości w zakresie normalnej konsolidacji (C_c) oraz wskaźnika ściśliwości w zakresie powtórnego obciążenia (C_r) uzyskanych z badań edometrycznych. W wyznaczeniu parametrów λ i κ na podstawie wskaźników C_c i C_r wykorzystano następujące zależności:

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

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

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU NIELISZ

Zbiornik wodny Nielisz wraz z zapora czołową położony jest w Kotlinie Zamojskiej, w północnej części Wyżyny Lubelskiej. Budowa zapory czołowej polegała na rozbudowie 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 holocenijskie namuły, lokalnie torfy oraz pyły i pyły piaszczyste w stanie miękkoplastycznym (Hartlen i Wolski, 1996; Lechowicz i Rabarijoely, 1996a; Rabarijoely, 2000).

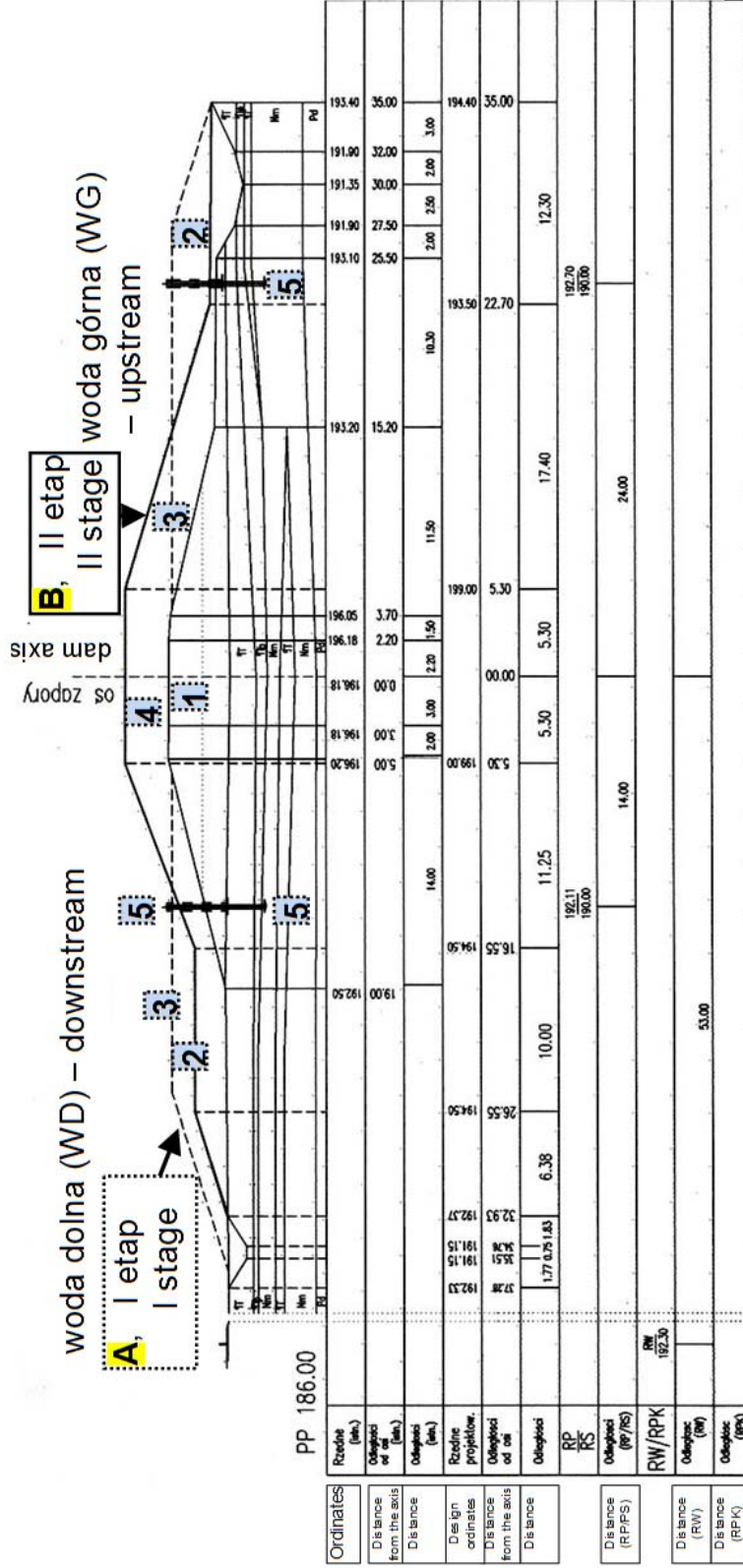
Typowy układ podłoża stanowi warstwa pyłu piaszczystego zalegającego na warstwie namułu organicznego (z przewarstwieniem pyłu) podścielonego warstwą piasku. Najślabszą warstwę podłoża stanowią namuły organiczne o zawartości części organicznych (I_{om}) w zakresach 10–20 i 21–30%, charakteryzujące się wilgotnością naturalną (w_n) w zakresach 110–130 i 130–150%, przy gęstości objętościowej gruntu (ρ) w zakresach 1,30–1,40 i 1,25–1,30 t·m⁻³. Występujące grunty słabonośne są lekko prekonsolidowane o współczynnikiem prekonsolidacji (OCR) wynoszącym od 2 do 3. Miąższość słabonośnego podłoża wynosi od 3 do 5 m.

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

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

Table 1. Geotechnical parameters used in calculations of stress and strain

Parametry geotechniczne – Geotechnical parameters						
κ	λ	$\Gamma - 1$	M	ν	γ [kN·m ⁻³]	$k_x = k_y$ [m·s ⁻¹]
0.06	0.35	2.83	1.20	0.31	13.5	10 ⁻⁸



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

Fig. 3. Nielisz dam constructed in two stages with overload: A – 1st stage with overload embankments; B – 2nd stage; 1 – existing embankment; 2 – removing of the existing embankment; 3 – overload embankment; 4 – elevation of the embankment to the level of 199.00; 5 – surface and pit benchmarks

ANALIZA WYNIKÓW I DYSKUSJA – OBLICZONE I POMIARZONE WARTOŚCI OSIADAŃ NASYPU

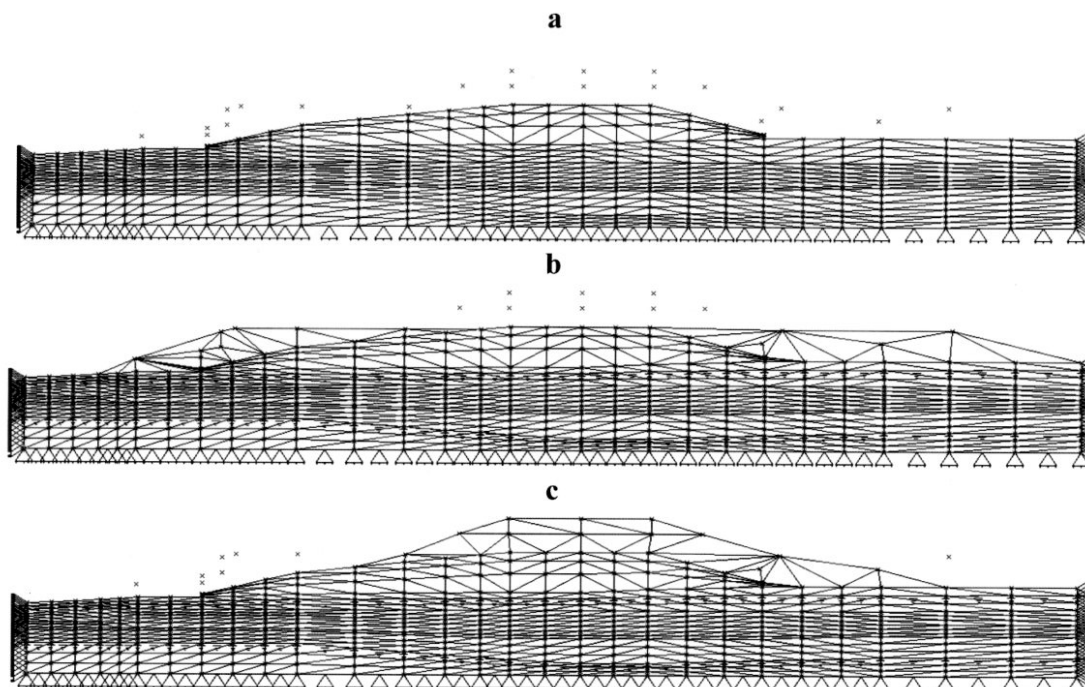
W obliczeniach programem CRISP podłoże i nasyp zostały dyskretyzowane na 532 węzły, 1520 elementów. Po zakończeniu konsolidacji z nasypu z pierwszego etapu, ze stref wody dolnej (WD) i wody górnej (WG) zdjęto w sumie 58 elementów, przy czym elementy te były wykorzystane do podniesienia rzędnego nasypu w koronie zapory o 199,0 m n.p.m. do końca drugiego etapu (rys. 4).

Na początku każdego etapu budowy zaobserwowano wzrost nadwyżki ciśnienia wody w porach (Δu). Na początku pierwszego etapu budowy Δu w strefie podłoża od WG była minimalnie mniejsza od wartości 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 wynosiła 10 kPa w podłożu pod koroną zapory.

Obliczone zmniejszenie pionowego naprężenia efektywnego ($\sigma'_{vo} = 168$ kPa) i całkowitego ($\sigma_{vo} =$

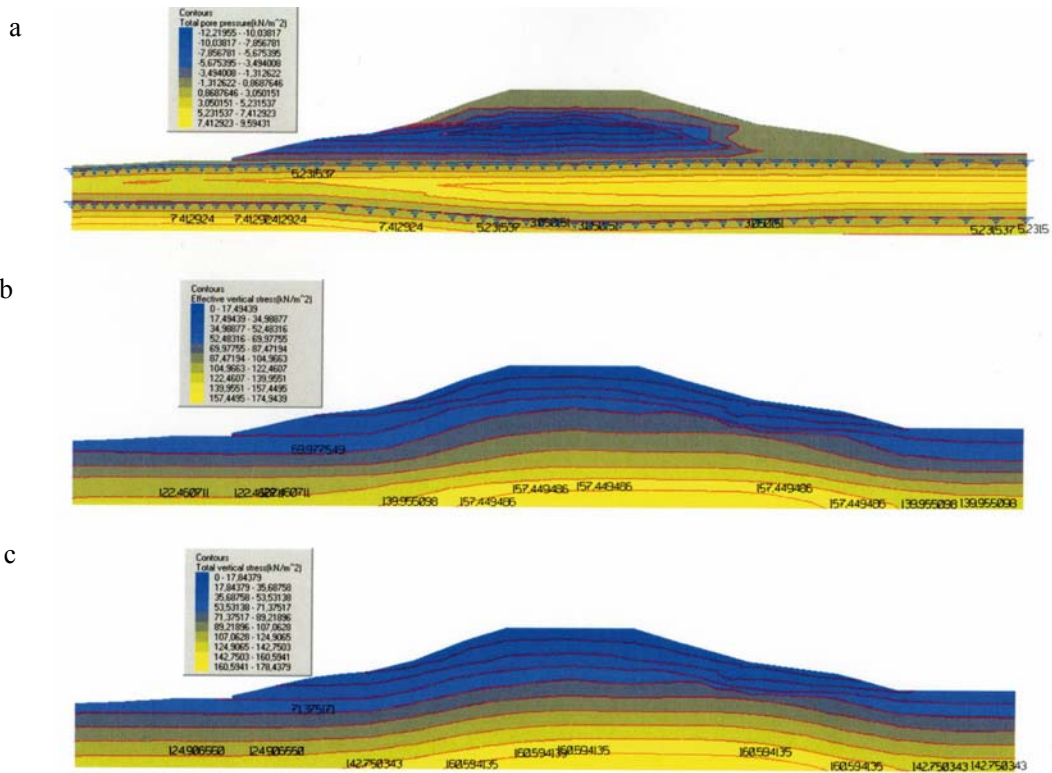
$= 178$ kPa) zaobserwowano na początku każdego etapu budowy. Na początku pierwszego etapu budowy średnia wartość $\sigma'_{vo} = 108$ kPa w strefie podłoża od WG i od strefy WD była podobna ($\sigma'_{vo} = 108$ kPa), zaś pod koroną zapory przyrost naprężenia nie pojawił się (rys. 5b, c). Na końcu drugiego etapu budowy średnie wartości pionowego naprężenia efektywnego i całkowitego były największe (odpowiednio $\sigma'_{vo} = 123$ kPa, $\sigma_{vo} = 167$ kPa), co spowodowało przemieszczenie pionowe o ok. 31,6 cm.

Obliczenie osiadań przeprowadzono programem numerycznym, w którym przyjęto teorię konsolidacji zawartą w programie CRISP (Almeida i in., 1986, 2018). Do obliczeń przyjęto schematy zapory i podłoża przedstawione na rysunkach 3 i 4. Wyniki obliczeń pokazano na rysunkach 5 i 6. Wyniki te są zbieżne z pomierzonymi wartościami osiadań. Największe różnice sięgające 56% ok. 100 dni stwierdzono w początkowym okresie konsolidacji drugiego etapu budowy. Następnie różnice te zmniejszyły się do 1%.

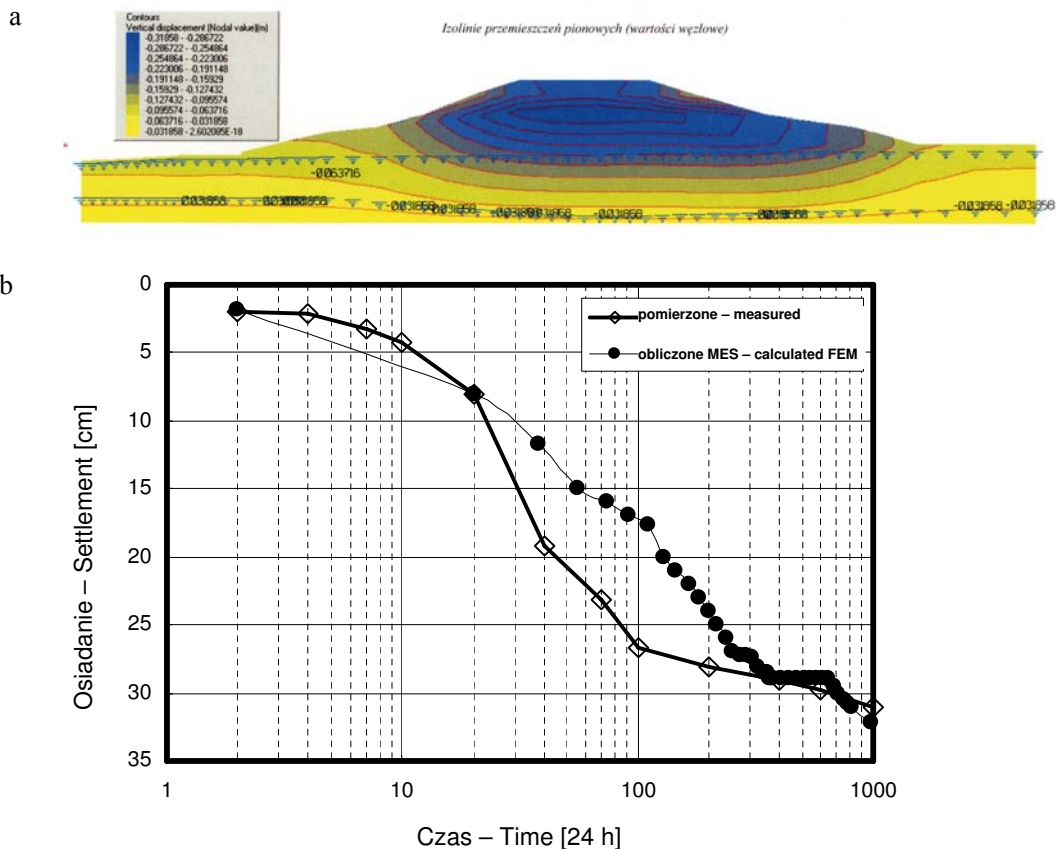


Rys. 4. Dyskretyzacja korpusu i podłoża dla potrzeb obliczeń MES: a – stan początkowy; b – I etap budowy; c – II etap budowy

Fig. 4. Embankment and subsoil discretization for FEM calculations: a – initial state; b – 1st stage of construction; c – 2nd stage of construction



Rys. 5. Izolinie obliczonych wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach oraz pionowe i poziome przemieszczenia: a – całkowite ciśnienia wody w porach; b – pionowe naprężenia efektywne; całkowite naprężenia pionowe
Fig. 5. Contours of calculated values of excess pore water pressure, vertical and horizontal displacements: a – total pore pressures; b – effective vertical stress; total vertical stress



Rys. 6. Obliczone i pomierzone przemieszczenie pionowe w pomiarowym przekroju: a – izolinie przemieszczeń pionowych (wartości węzłowe); b – z obserwacji reperów
Fig. 6. Calculated and measured vertical displacement in the measuring cross-section: a – contours of vertical displacements (nodal values); b – from benchmarks observation

POSUMOWANIE I WNIOSKI

Teorię konsolidacji zawartą w programie CRISP można wykorzystać do etapowej budowy nasypu posadowionego na słabonośnych gruntach organicznych takich jak np. namuły organiczne. Dużą zgodność wyników uzyskano między 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 (MCC). Dwuetapowa budowa nasypu z przeciążeniem w przypadku zapory w Nieliszu była trafną decyzją. Dzięki temu osiągnięcie rzędnej korony 199,0 m n.p.m. nie spowodowało utraty stateczności podłoża nasypu (warunek I stanu granicznego), szybciej też osiągnięto docelowe wartości osiadania podłoża (warunek II stanu granicznego). W tej analizie uzyskano zbieżność wyników obliczeniowych MES z pomierzonym, dlatego też zaleca się wykorzystanie tego typu analiz dla innych obiektów hydrotechnicznych.

PIŚMIENNICTWO

- Almeida, M. S. S., Britto, A. M. i Parry, R. H. G. (1986). Numerical modelling of a centrifuged embankment on soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 23 (2), 103–114.
- Almeida, M., Riccio, M., Hosseinpour, I. i Alexiew, D. (2018). *Geosynthetic encased columns for soft soil improvement*. Leiden: CRC Press/Balkema.
- Biały, M. (2008). Zastosowanie modelu FC+ MCC w analizie numerycznej współpracy chłodni kominowej z podłożem gruntowym. *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, 105, 21–29.

- Britto, A. M. i Gunn, M. J. (1987). *Critical state soil mechanics via finite elements*. New York: Ellis Horwood.
- Gwóźdź-Lasoń, M. (2009). Modele obliczeniowe podłoża gruntowego w aspekcie różnych metod i technologii wzmocnienia. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 33 (1), 231–238.
- Hartlen, J. i Wolski, W. (1996). *Embankments on organic soils*. Amsterdam: Elsevier.
- Lechowicz, Z. i Rabarijoely, S. (1996a). Zbiornik Nielisz – badania wzmocnienia słabego podłoża. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska*, 12, 33–44.
- Lechowicz, Z. i Rabarijoely, S. (1996b). Wykorzystanie badań in situ w ocenie wzmocnienia słabonośnego podłoża zapory budowanej etapowo. *VII Konferencja Technicznej Kontroli Zapór*, 08–10.10.1996 Ryto-Kraków, 1, 231–240.
- Meyer, Z. i Szczygielski, T. (2010). Konsolidacja torfów z wykorzystaniem przeciążenia warstwą popiołów. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 31 (3), 431–438.
- Mitew-Czajewska, M. (2016). Evaluation of hypoplastic clay model for deep excavation modelling. *Archives of Civil Engineering*, 62 (4), 73–86.
- Rabarijoely, S. (2000). *Wykorzystanie badań dylatometrycznych w wyznaczeniu parametrów gruntów organicznych obciążonych nasypem* (rozprawa doktorska). Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Roscoe, K. H. i Burland, J. B. (1968). On the generalized behaviour of „wet” clay. W J. Heyman i F. Leckie (red.), *Engineering plasticity* (strony 535–609). London: Cambridge University Press.
- Uliniarz, R. (2007). Ulepszony model Modified Cam-Clay z silną nieliniowością w obszarze prekonsolidacji według Faheya-Cartera. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Budownictwo*, 1756, 419–425.
- Wroth, C. P. (1975). The predicted performance of soft clay under a trial embankment loading based on the Cam-clay model. W G. Gudehus (red.), *Finite elements in geomechanics* (strony 191–208). London: John Wiley & Sons.

USE OF NUMERICAL METHODS FOR FOUNDATION OF EARTH DAM ON ORGANIC SUBSOIL

ABSTRACT

The numerical analysis combined with the theory of consolidation was used for the foundation of dam embankment built in stages on soft organic subsoil. The subsoil under the dam was covered with pre-consolidated organic mud and normally consolidated cohesive soil. The dam was and still is monitored by piezometer measurements as well as vertical and horizontal benchmarks displacements. The calculations were carried out using a modified Cam-Clay (MCC) model using CRISP software. A linear-elastic soil model was used for this embankment during construction. The results of the calculated vertical displacements were compared with the observed.

Key words: FEM, dam, organic subsoil, numerical analysis, consolidation theory, modified Cam-Clay (MCC) model