

Zdzisław SKUTNIK

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Tomasz SZYMAŃSKI

Modelowanie numeryczne zmian stanu nasycenia i ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory Czorsztyn za pomocą programu Plaxflow

Numerical modeling of Czorsztyn Dam core saturation and pore water pressure changes using Plaxflow numerical code

Słowa kluczowe: stopień nasycenia, ciśnienie ssania, krzywa retencji, model van Genuchtena, zapora ziemna

Key words: saturation degree, suction, retention curve, van Genuchten model, embankment dam

Wprowadzenie

Rdzenie zapór nasypowych wykonywane z drobnoziarnistych gruntów o małej przepuszczalności nie uzyskują stanu pełnego nasycenia podczas budowy. Fakt ten wynika z położenia krzywej zagęszczalności, poniżej linii pełnego nasycenia (Fry i in. 1993, Garbulewski i in. 1994). Zagęszczony grunt spoisty charakteryzuje się początkowym stopniem nasycenia wynoszącym około 80% (Fredlund i Rahardjo 1993), zatem część jego porów wypełniona jest powietrzem, którego ciśnienie (u_a) jest w przybliżeniu

równe ciśnieniu atmosferycznemu (Fry i in. 1993). Ciśnienie wody w porach (u_w) jest niższe od ciśnienia atmosferycznego i w związku z tym powstaje w rdzeniu ciśnienie ssące ($u_a - u_w$).

Pomiary ciśnienia wody w porach i ciśnienia powietrza w porach wykonane w nasypie zapory Chelmarsh w Anglii, opisane przez Penmana (1995), potwierdziły występowanie ujemnego ciśnienia wody w porach, które w miarę postępu robót (wzrostu ciężaru nadkładu) wzrasta, przechodząc na stronę wartości dodatnich. Charles (1997) podkreśla korzystne znaczenie ujemnego ciśnienia wody w porach (ssania), którego wzrost zwiększa wytrzymałość gruntu na ścinanie, dzięki czemu możliwy jest ruch maszyn budowlanych po wierzchnich warstwach nasypu. Alonso i inni (1995) przeprowadzili symulacje numeryczne wpływu wilgotności wbudowywania gruntu spoistego na sto-

pień nasycenia rdzenia zapory i ciśnienia wody w porach. Na podstawie wyników obliczeń wykazano, że w rdzeniu zbudowanym z gruntu o wilgotności mniejszej od optymalnej, w którym $S_r \approx 0,8$, wzrost ciśnienia wody w porach jest nieznaczny (mniej niż 10%) pomimo wzrostu wysokości rdzenia (tj. wzrostu naprężenia spowodowanego nadkładem). W przypadku gruntu wbudowywanego, z wilgotnością większą od optymalnej, w którym $S_r \geq 0,9$, w miarę zwiększania się wysokości rdzenia obserwuje się niemalże liniowy wzrost ciśnienia wody w porach.

Wyniki badań przeprowadzonych dla zapory w Klimkówce na Ropie (Żakowicz i Garbulewski 1995) potwierdzają, że w rdzeniu zapory występują początkowo ujemne wartości ciśnienia wody w porach, świadczące o nienasyconym charakterze ośrodka gruntowego. Następnie w wyniku obciążenia nadkładem zwiększają się w rdzeniu wartości naprężeń całkowitych i rozpoczyna się konsolidacja gruntu, która prowadzi do wzrostu ciśnienia wody w porach i powstania w rdzeniu dwóch stref nasycenia: strefy I – saturacji, w dolnej części rdzenia, i strefy II – aeracji, w górnej części rdzenia. W strefie górnej będzie występował grunt trójfazowy, który w czasie pierwszego piętrzenia wody w zbiorniku zmieni swój stan nasycenia. Stopniowe nasycenie rdzenia wodą w czasie napełniania zbiornika może powodować odkształcenia, powodujące uszkodzenie rdzenia (np. pęknięcia, przebicia).

Analiza odkształcenia rdzenia zapory dla etapów: końca budowy, pierwszego piętrzenia i eksploatacji, przeprowadzona przez Alonso i innych (1995), wykazała, że przemieszczenia rdzenia są naj-

większe podczas pierwszego piętrzenia. Prędkość nasycania rdzenia zależy od wielu czynników, z których najważniejszym jest przewodność hydrauliczna.

Charakterystyka programu Plaxflow

Do najpopularniejszych programów wspomagania projektowania geotechnicznego należy rodzina programów Plaxis. Jest to pakiet obliczeniowy, wykorzystujący metodę elementów skończonych, ukierunkowany na obliczanie odkształceń i stateczności niezbędnych w geotechnicznej ocenie posadowienia konstrukcji budowlanych. Dla symulacji nieliniowych i zależnych od czasu zachowań gruntu program wykorzystuje modele konstytutywne. Plaxis może także być wykorzystywany do modelowania interakcji między konstrukcją i podłożem gruntowym. W praktyce program jest wykorzystywany przede wszystkim do obliczeń osiadań, współczynnika stateczności oraz efektu wzmocnienia podłoża i nasypów. Wykorzystywany jest w obliczeniach projektowych tuneli, obudów wykopów, budowli ziemnych wzmocnianych geosyntetykami i wielu innych. Z obliczeń można uzyskać wartości przemieszczeń budowli i podłoża, przebieg konsolidacji podłoża gruntowego, rozkład naprężenia w gruncie, a także siły przekrojowe w projektowanych konstrukcjach współpracujących z gruntem.

Do rozwiązywania zagadnień z zakresu przepływu wody w gruncie służy program Plaxflow, który jest przydatny zarówno w praktyce geotechnicznej, jak i hydrotechnicznej. Pozwala rozwiązy-

wać zagadnienia związane z przepływem wody gruntowej wokół tuneli, ścianek szczelnych, dopływem wody do drenażu, dopływem lub wypływem wody ze studni i inne. Korzystanie z programu jest intuicyjne, co sprawia, że tworzenie dwuwymiarowego modelu obliczeniowego i zadawanie warunków brzegowych jest łatwe i bardzo wydajne. Możliwe jest wykonywanie obliczeń przepływu ustalonego (steady flow) – stałego w czasie, i nieustalonego (transient flow) – zmiennego w czasie. Użytkownik może skorzystać z kilku modeli opisujących właściwości gruntu.

Podstawowym modelem wykorzystywanym w programie Plaxflow, opisującym zachowanie się gruntu nienasyconego, jest model van Genuchtena (1980), według którego stopień nasycenia jest funkcją efektywnej wysokości ciśnienia:

$$S(\phi_p) = S_r + (S_s - S_r) \left(1 + (g_a |\phi_p|)^{g_n} \right)^{\left(\frac{1-g_n}{g_n} \right)} \quad (1)$$

a przewodność względna wyrażona jest równaniem:

$$k_{rel}(S) = (S_e)^{g_1} \left(1 - S_e^{\left(\frac{1-g_n}{g_n} \right)} \right)^{\left(\frac{g_n-1}{g_n} \right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

$\phi_p = p/\gamma$, p – ciśnienie cieczy, γ – ciężar objętościowy cieczy,

g_a, g_n, g_1 – parametry empiryczne modelu określone dla danego rodzaju gruntu,

S_r – resztkowy stopień nasycenia,

S_s – stopień pełnego nasycenia,

S_e – efektywny stopień nasycenia według równania (3)

$$S_e = \frac{S - S_r}{S_s - S_r} \quad (3)$$

Uproszczony model van Genuchtena zakłada liniową zmienność współczynnika filtracji od ciśnienia ssania gruntu, a także liniową zmienność stopnia nasycenia od ciśnienia ssania. Każdy z modeli van Genuchtena wymaga od użytkownika znajomości parametrów opisujących krzywą retencji gruntu (g_a, g_n, g_1) oraz resztkowego stopnia nasycenia (S_r), a także współczynnika filtracji w stanie pełnego nasycenia (K_s).

Każde obliczenie rozpoczynamy od utworzenia schematu obliczeniowego, który zazwyczaj jest uproszczonym przekrojem porzecznym danego obiektu (zapory, wału przeciwpowodziowego, nasypu). Tworząc taki schemat, należy wyróżnić ograniczone obszary (clusters), dla których przypisane będą określone rodzaje gruntu. Kolejnym etapem jest dyskretyzacja obszaru na elementy skończone, co odbywa się automatycznie. Zazwyczaj obszary dzielone są na 3 węzłowe elementy trójkątne. Podczas wykonywania obliczeń w punktach węzłowych podawane są wartości ciśnienia, a w punktach Gaussa stan nasycenia i prędkość przepływu wody. W celu zwiększenia dokładności obliczeń możliwe jest, aby liczba punktów węzłowych w trójkącie była większa i wynosiła na przykład 6 lub 15, wówczas w takim elemencie występuje odpowiednio 3 lub 12 punktów całkowania Gaussa.

Po dokonaniu podziału schematu obliczeniowego na skończone elementy, zanim przystąpimy do obliczeń, należy określić warunki początkowe i brzegowe. Warunki brzegowe mogą być stałe w czasie (np. niezmiennie napełnienie

zbiornika retencyjnego, stały poziom zwierciadła wód gruntowych), wówczas wykonanie obliczeń składa się z jednego kroku i jest to obliczenie przepływu wody w stanie ustalonym (steady flow). W celu symulacji przepływu zmiennego w czasie (transient flow), na przykład napełnianie – opróżnianie zbiornika retencyjnego czy zmiany poziomu wód gruntowych, należy zdefiniować kilka kroków wykonywania obliczeń, które będą zawierały początkowe i końcowe wartości ciśnienia, tj. początkowy i końcowy poziom zwierciadła wody.

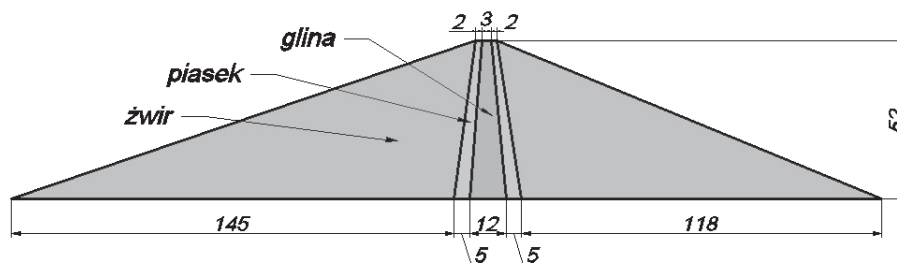
Przyjęty model obliczeniowy zapory i warianty obliczeń

W niniejszej pracy analizowano przepływ wody przez zapórę ziemną o kształcie i warunkach posadowienia zbliżonych do zapory ziemnej w Czorsztynie. W przekroju poprzecznym zapory

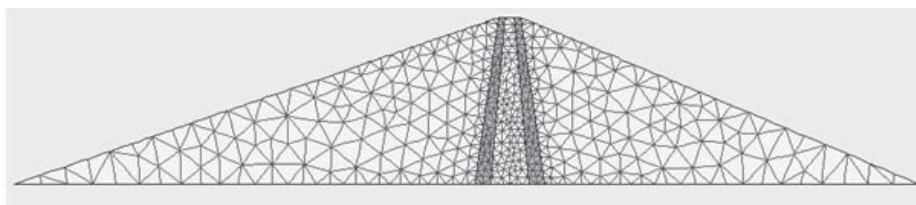
możemy wyróżnić nasyp statyczny wykonany ze żwirów i otoczków, filtry odwrotne wykonane z piasku i rdzeń wykonany z gliny. Podłoże zapory stanowią skały fliszu karpackiego. Typowy przekrój poprzeczny zapory, który przyjęto jako schemat obliczeniowy, przedstawiono na rysunku 1.

W celu przeprowadzenia obliczeń dokonano dyskretyzacji obszaru przekroju poprzecznego na 826 trójkątnych elementów, wyróżniając 6877 punktów węzłowych i 9912 punktów całkowania Gaussa. Aby osiągnąć większą dokładność obliczeń, liczbę elementów trójkątnych zwiększono w obrębie filtrów i rdzenia zapory. Siatkę elementów skończonych przedstawiono na rysunku 2.

Dla gliny i piasku przyjęto model van Genuchtena, opisujący właściwości gruntu w stanie nienasyconym. Przepływ w nasypie statycznym wykonanym ze żwirów zamodelowano według równania Darcy'ego.



RYSUNEK 1. Schemat obliczeniowy zapory
FIGURE 1. The calculation scheme of dam



RYSUNEK 2. Schemat obliczeniowy zapory z podziałem na elementy
FIGURE 2. The calculation scheme of the dam with finite element mesh

TABELA 1. Parametry modelu van Genuchtena przyjęte do obliczeń
TABLE 1. The van Genuchten model parameters

Grunt Soil	K_s [$\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$]	S_r [-]	S_s [-]	g_n [-]	g_a [m^{-1}]	g_i [-]
Gлина Silty clay	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,0228	1,0	1,4	0,7	0,5
Piasek Sand	7,128	0,1	1,0	2,68	14,5	0,5
Żwir Gravel	10^3	–	–	–	–	–

Parametry przyjęte do obliczeń dla poszczególnych elementów zapory przedstawiono w tabeli 1.

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów, które uwzględniały tempo napełniania i opróżniania zbiornika. W pierwszym wariantcie obliczeniowym założono, że napełnienie zbiornika od wysokości napełnienia 10 m do wysokości 44 m nastąpi w ciągu 90 dni, a obniżenie poziomu wody od wysokości napełnienia 44 m do wysokości 10 m w ciągu 110 dni.

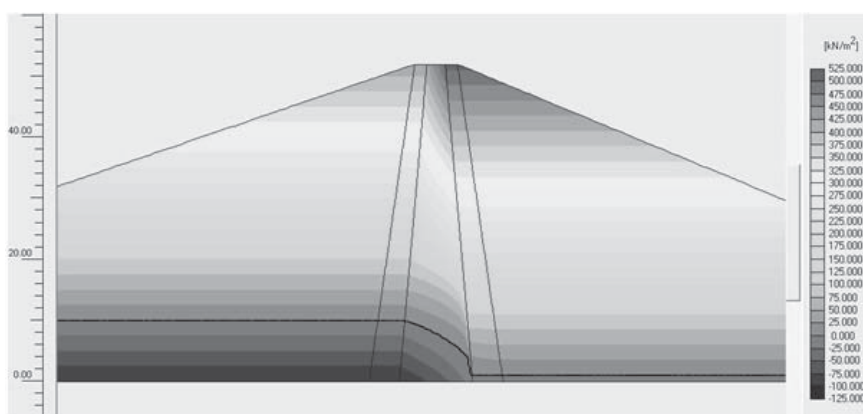
Wyniki obliczeń ciśnienia wody w porach oraz stanu nasycenia dla kolejnych etapów napełnienia 10, 44 i 10 m (po obniżeniu poziomu wody) przedstawiono na kolejnych rysunkach 3, 4, 5, 6, 7 i 8.

W drugim wariantcie obliczeniowym napełnianie zbiornika od wysokości napełnienia 10 m do wysokości 44 m trwało znacznie dłużej, bo aż 730 dni, a obniżenie poziomu wody w zbiorniku od wysokości napełnienia 44 m do wysokości 10 m nastąpiło też w ciągu 110 dni.

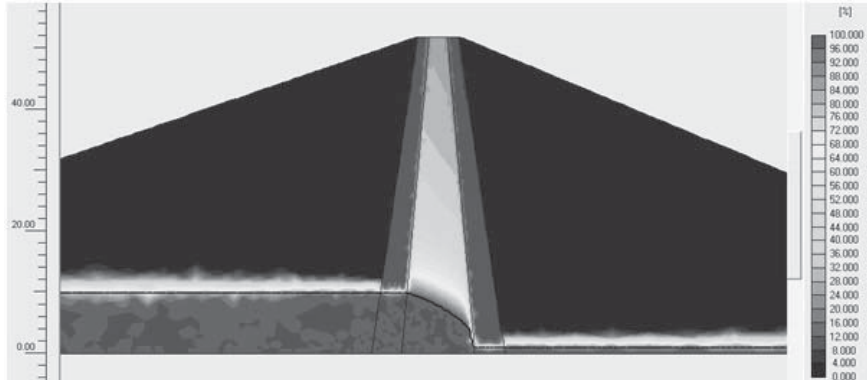
Wyniki obliczeń ciśnienia wody w porach oraz stanu nasycenia dla drugiego wariantu obliczeniowego przedstawiono na rysunkach 9, 10, 11 i 12.

Analiza wyników obliczeń

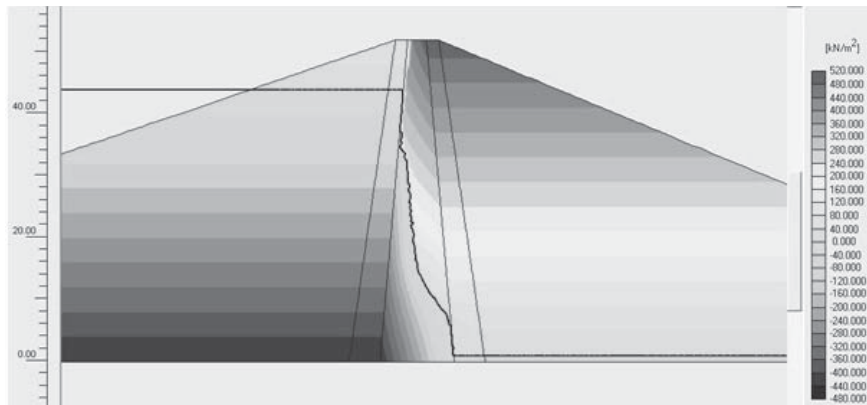
Podczas napełniania zbiornika w stosunkowo krótkim czasie – 90 dni, rdzeń zapory nasycy się wodą równomiernie



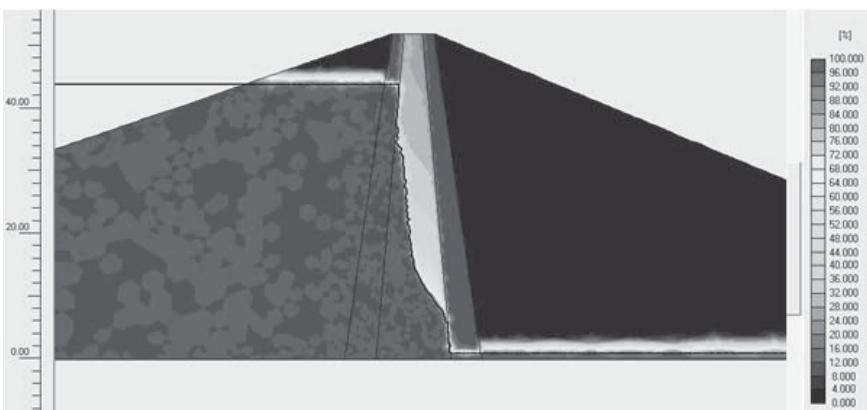
RYSUNEK 3. Rozkład ciśnienia wody w porach – stan początkowy, napełnienie 10 m
FIGURE 3. The pore water pressure distribution – elevation 10 m



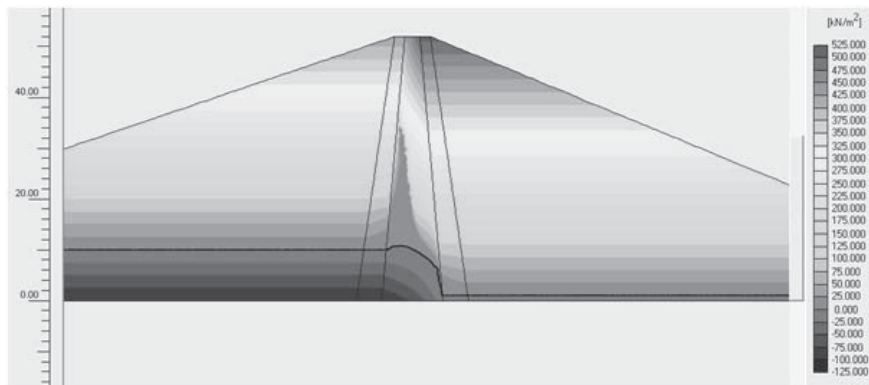
RYSUNEK 4. Stan nasycenia rdzenia – stan początkowy, napełnienie 10 m
 FIGURE 4. The core saturation – elevation 10 m



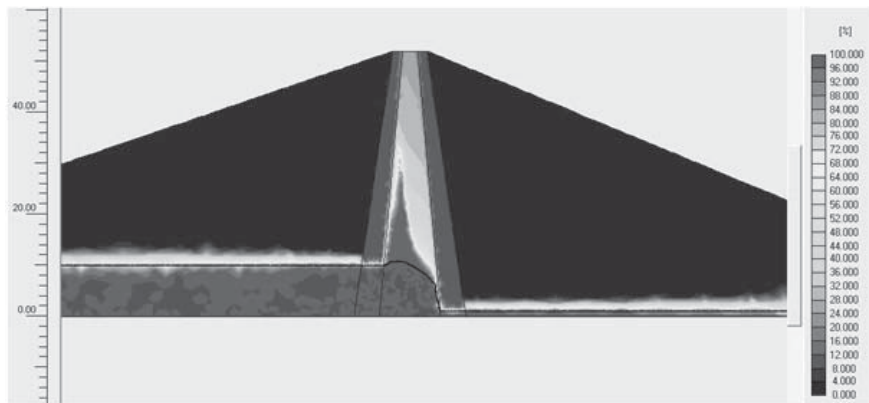
RYSUNEK 5. Rozkład ciśnienia wody w porach – napełnienie 44 m
 FIGURE 5. The pore water pressure distribution – elevation 44 m



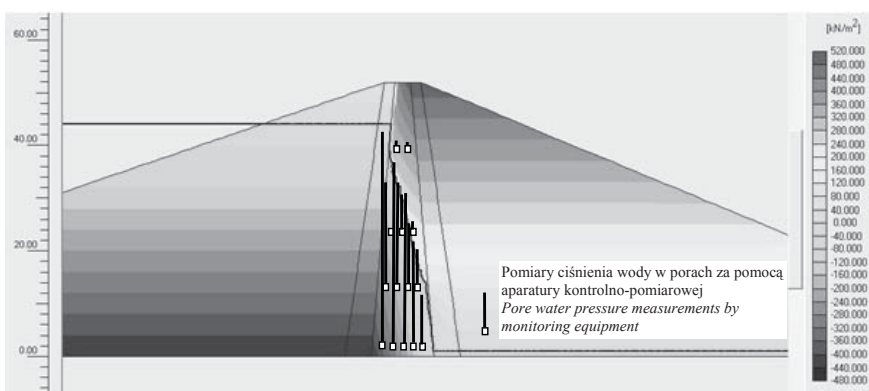
RYSUNEK 6. Stan nasycenia rdzenia – napełnienie 44 m
 FIGURE 6. The core saturation – elevation 44 m



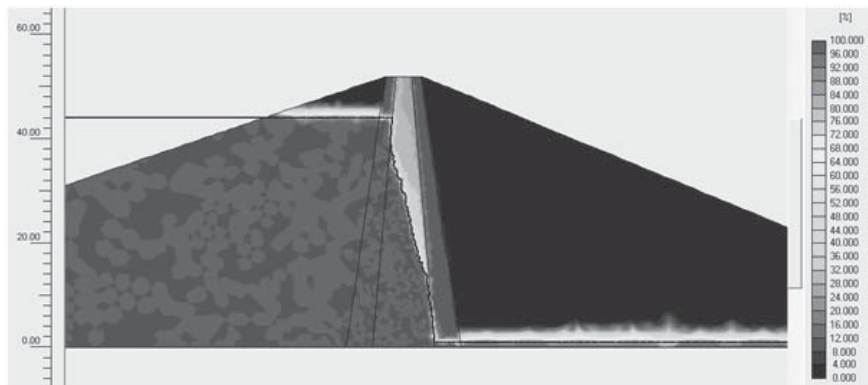
RYSUNEK 7. Rozkład ciśnienia wody w porach – obniżenie poziomu wody do 10 m
 FIGURE 7. The pore water pressure distribution – drawdown of water level to elevation 10 m



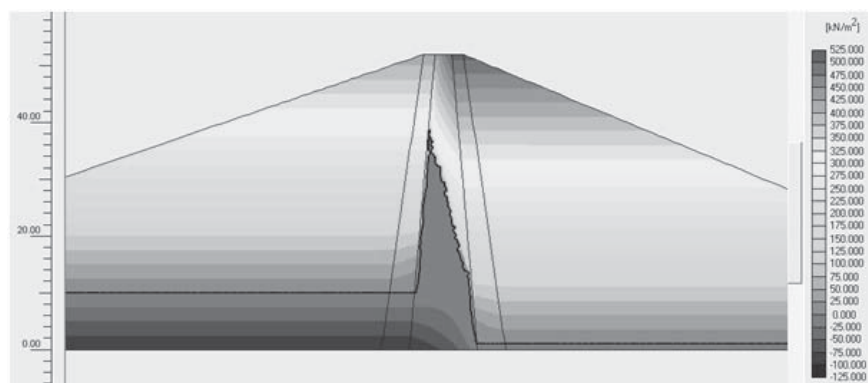
RYSUNEK 8. Stan nasycenia rdzenia – obniżenie poziomu wody do 10 m
 FIGURE 8. The core saturation – drawdown of water level to elevation 10 m



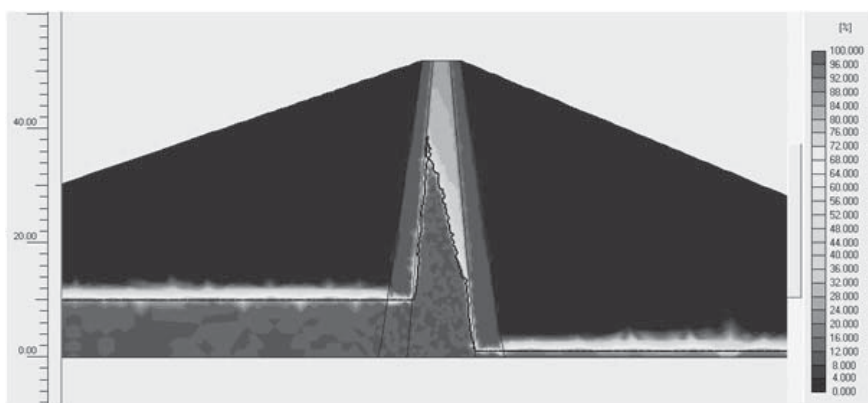
RYSUNEK 9. Obliczone i pomierzone ciśnienie wody w porach – napelnienie 44 m w czasie 730 dni
 FIGURE 9. Calculated and measured pore water pressure – elevation 44 m during 730 days



RYSUNEK 10. Stan nasycenia rdzenia – napelnienie 44 m w czasie 730 dni
 FIGURE 10. The core saturation – elevation 44 m during 730 days



RYSUNEK 11. Rozkład ciśnienia wody w porach – obniżenie poziomu wody do 10 m w czasie 110 dni
 FIGURE 11. The pore water pressure distribution – drawdown of water level to elevation 10 m during 110 days



RYSUNEK 12. Stan nasycenia rdzenia – obniżenie poziomu wody do 10 m w czasie 110 dni
 FIGURE 12. The core saturation – drawdown of water level to elevation 10 m during 110 days

w całym przekroju jedynie do wysokości 6 m. Powyżej tej wysokości rdzeń nie jest już nasycony równomiernie (rys. 5 i 6). Taki stan można wytłumaczyć faktem, iż występuje duży spadek ciśnienia wody w wyniku dużych oporów przepływu wody w mało nasyconym gruncie. Podczas obniżania poziomu wody w zbiorniku w czasie 110 dni w rdzeniu zapory utrzymuje się strefa nasycenia wodą, wynoszącego około 90%, i ciśnienia ssania około 25 kPa. Strefa ta znajduje się w przedziale wysokości rdzenia od 8 do 34 m (rys. 7 i 8), przy czym jest zdecydowanie węższa w części górnej.

Zakładając dłuższy czas napełniania zbiornika, wynoszący 730 dni (2 lata), do wysokości 44 m rdzeń zapory nasyci się równomiernie w całym przekroju do wysokości około 14 m, w odróżnieniu od pierwszego schematu obliczeniowego, gdzie rdzeń jest nasycony w całym przekroju zaledwie do wysokości 6 m. Powyżej wysokości 14 m, podobnie jak w pierwszym schemacie obliczeniowym, tworzy się krzywa depresji (rys. 9 i 10). Przedstawione na rysunku 9 porównanie wyników obliczeń ciśnienia wody w porach z wynikami pomiarów za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej było niestety możliwe tylko w okresie budowy oraz w początkowej fazie eksploatacji zapory. Analizując to porównanie, widzimy dużą zgodność obliczonych i pomierzonych wartości ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory dla przypadku pełnego napełnienia. W ostatnich latach wiele czujników uległo uszkodzeniu głównie na skutek wyładowań atmosferycznych, a wskazania niektórych budzą wątpliwości (rozkalibrowanie). Niemożliwa jest zatem weryfikacja obliczeń dla przypadku obniżenia poziomu wody

w zbiorniku. Podobnie jak niemożliwa jest bezpośrednia weryfikacja obliczeń stanu nasycenia. Obniżanie poziomu wody w zbiorniku w okresie takim samym jak w pierwszym wariancie obliczeniowym – 110 dni, powoduje, że w rdzeniu zapory strefa pełnego nasycenia wodą jest znacznie większa i zawiera się w przedziale od wysokości 39 do 14 m. Utrzymywanie się takiej strefy w rdzeniu zapory spowodowane jest bardzo wolnym odpływem wody z gruntu o bardzo małym współczynniku filtracji.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone obliczenia numeryczne miały na celu ocenę zachowania się zagęszczonych nienasyconych gruntów spoistych, z których wykonany jest rdzeń zapory. Zadanie zrealizowano, rozpatrując dwa przypadki eksploatacji zapory ziemnej – szybkiego napełniania zbiornika (90 dni) i długotrwałego napełniania zbiornika (2 lata), a następnie obniżenie poziomu wody w zbiorniku w takim samym czasie, tj. 110 dni. Symulacja taka miała odzwierciedlać rzeczywiste obniżenie poziomu wody w zbiorniku w celu odwodnienia sztolni energetyczno-spustowych. Taka sytuacja miała miejsce na jesieni 2007 roku.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że rdzeń zapory nasyci się nierównomiernie i proces nasycania trwa długo, natomiast po opróżnieniu zbiornika rdzeń pozostaje przez dłuższy czas nasycony. Jednakże nadwyżka ciśnienia wody w porach rozprasza się bardzo szybko. Jest to szczególnie ważna informacja z punktu widzenia eksploatacji zbiorni-

ka, ponieważ nadmierne ciśnienie wody w porach rdzenia mogłoby doprowadzić do uszkodzeń rdzenia na skutek „pęknięć hydraulicznych”.

Program Plaxflow nie daje możliwości nadania warstwom gruntu ich początkowego stanu nasycenia wodą – zostało przyjęte uproszczenie, że grunt w okresie początkowym był w stanie suchym. Stąd konieczne było wydłużenie okresu napełniania zbiornika, aby odwzorować rzeczywisty stan nasycenia rdzenia. Do zalet programu Plaxflow należy łatwość obsługi, łatwe tworzenie geometrii modelu obliczeniowego, możliwość zadawania warunków początkowych, brzegowych i rodzajów gruntu.

Literatura

- ALONSO E.E., LLORET A., GENS A., BATTLE F. 1995: Effect of core compaction on the behaviour of earthdams. Proc. of the First Int. Conference on Unsaturated Soils. Paris, France: 231–239.
- CHARLES J.A. 1997: General report. Special problems associated with Earthfill dams. XIX ICOLD, Florence, GR Q.73, II: 499–519.
- FREDLUND D.G., RAHARDJO H. 1993: Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc., New York.
- FRY J., DELAGE P., NEDJAT N., NANDA A. 1993: Computing the stability of clay fill dams under construction. *Water Power & Dam Construction* 3: 23–29.
- GARBULEWSKI K., ŻAKOWICZ S., KRÓL P., WOLSKI W. 1994: Potencjał wodno-gruntowy w rdzeniu budowanej zapory. VI Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Sobieszewo.
- PENMAN A.D.M. 1995: The effect of gas on measured pore pressures. Proc. of the First Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris: 287–292.
- SZYMAŃSKI T. 2009: Właściwości zagęszczonych nienasyconych gruntów spoistych – symulacja numeryczna zmian stanu nasycenia rdzenia zapory nasypowej. Praca inżynierska. Inżynieria Środowiska SGGW, Warszawa.
- van GENUCHTEN M.Th. 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.
- ŻAKOWICZ S., GARBULEWSKI K. 1995: Modification of triaxial apparatus for prediction of dam core behaviour. Proc. of the First Int. Conference on Unsaturated Soils, Paris 2: 593–599.
- Plaxflow Reference Manual v1.
Plaxflow Scientific Manual v1.
Plaxflow Tutorial Manual v1.

Summary

Numerical modeling of Czorsztyn Dam core saturation and pore water pressure changes using Plaxflow numerical code. A problem related to the changes of soil saturation and pore water pressure within the clay core of embankment dam is presented. The numerical code, i.e. Plaxflow program was used for numerical computations of the mentioned above values. The calculations have been done for the stage of first impounding and for the draw down of the water level within the reservoir. The results of computations allow to predict the clay core behaviour in the context of water level changes within the reservoir.

Autor's address:

Zdzisław Skutnik
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: zdzislaw_skutnik@sggw.pl