

PRACE NAUKOWO-PRZEGLĄDOWE RESEARCH REVIEW PAPERS

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 217–226
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 217–226
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.21

Łukasz ZAWADZKI, Bartłomiej BURSA

GEOTEKO Serwis Sp. z o. o.

Wpływ filtracji oraz zmian nasycenia gruntu na stateczność wałów przeciwpowodziowych **Impact of filtration and changes in soil saturation on slope stability of flood embankments**

Słowa kluczowe: wały przeciwpowodziowe, stateczność, analiza MES, filtracja, grunty nienasycone

Key words: flood embankments, slope stability, MES analysis, filtration, unsaturated soils

Wprowadzenie

Wały przeciwpowodziowe są jednymi z ważniejszych budowli hydrotechnicznych, które zapewniają ochronę infrastruktury państwowej, mienia oraz życia ludzkiego przed wodami wezbraniowymi. W zależności od powierzchni chronionego obszaru oraz ważności ochraniających obiektów wały przeciwpowodziowe klasyfikowane są do jednej z czterech klas ważności obiektu (Rozporządzenie... 2007). W zależności od klasy obiektu wały powinny spełniać określone wymagania techniczne i zapewniać ochronę terenów przyle-

głych przed wezbraniem o określonym prawdopodobieństwie.

Zagrożeniem dla wałów są procesy filtracyjne w korpusie i podłożu, które mogą prowadzić do powstania sufozji lub przebicia hydraulicznego (Borys, 2007). Możliwość powstania tych zjawisk związana jest z materiałem, z jakiego jest zbudowany korpus wału i podłoża (grunty podatne na sufozję), a także może być rezultatem zbyt wysokiego i długiego piętrzenia wód w międzywałiu skutkującego przekroczeniem gradientu krytycznego.

W czasie długotrwałego piętrzenia wody dochodzi do wzrostu stanu nasycenia gruntów w korpusie wału, co skutkuje zmianą stanu naprężeń oraz pogorszeniem się ich parametrów wytrzymałościowych. Na stateczność negatywnie wpływa także działanie sił filtracji wywołanych przepływem wody przez korpus wału (ciśnienie spływo-

we). Czynniki te sprawiają, że istotnym aspektem dla stateczności wału staje się czas piętrzenia wody, a szczególnie czas, w jakim dojdzie do stabilizacji krzywej depresji w korpusie wału.

W artykule analizowano głównie wpływ czasu piętrzenia oraz filtracji na wartość współczynnika stateczności wałów. Przeprowadzono analizę z wykorzystaniem filtracji nieustalanej dla dwóch przykładowych wałów: zbudowanego z gruntów spoistych (gliny piaszczystej) oraz z gruntów niespoistych (piasku średniego)

Wpływ stanu nasycenia na wytrzymałość gruntu

Stateczność budowli ziemnych, w tym wałów przeciwpowodziowych, zależy od wytrzymałości na ścinanie gruntów wbudowanych w tę budowlę. Wały przeciwpowodziowe są budowlami okresowo piętrzącymi wodę i przez większość czasu ich korpus znajduje się w stanie niepełnego nasycenia. Grunty w stanie niepełnego nasycenia charakteryzują się ujemnymi wartościami ciśnienia wody w porach gruntowych, które wpływają na: stan naprężeń, ściśliwość gruntu, wytrzymałość na ścinanie czy przepływ wody (Skutnik, 2013). Podstawowym parametrem wykorzystywanym w analizie gruntów nienasyconych jest ciśnienie ssania będące różnicą między ciśnieniem powietrza a ciśnieniem wody w porach gruntowych ($u_a - u_w$), wyrażające ciśnienie, z jaką określona objętość wody jest utrzymywana w porach gruntowych.

Wytrzymałość na ścinanie (τ_f) gruntów w stanie pełnego nasycenia wodą

wyznacza się z kryterium Coulomba (Terzaghi, 1943):

$$\tau_f = \sigma' \tan(\varphi') + c'$$

gdzie:

σ' – efektywne naprężenie normalne do płaszczyzny ścinania [kPa],

φ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [$^\circ$],

c' – efektywna spójność gruntu [kPa].

Jedną z implementacji kryterium Coulomba dla gruntów nienasyconych jest zmodyfikowany wzór zaproponowany przez Fredlunda, Morgensterna i Widgera (1978):

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi^b) + c'$$

gdzie:

u_a – ciśnienie powietrza w porach gruntowych [kPa],

u_w – ciśnienie wody w porach gruntowych [kPa],

φ^b – kąt określający wzrost wytrzymałości na ścinanie gruntu wywołany ciśnieniem ssania macierzystego [$^\circ$].

Różnica między ciśnieniem powietrza a ciśnieniem wody w porach gruntu określana jest ciśnieniem ssania gruntu: $s = (u_a - u_w)$.

Wartość kąta φ^b w warunkach pełnego nasycenia jest równa $\varphi^b = \varphi'$ i maleje wraz ze spadkiem stanu nasycenia. Przyjmując funkcyjną zmienność kąta φ^b w zależności od stopnia wilgotności gruntu, jego zmianę można uzależnić od parametru naprężeń efektywnych (χ) (Nuth i Laloui, 2008; Blight, 2013; Szymkiewicz, Sikora, Ossowski i Tisler, 2014), który jest zależny od stopnia

nasylenia ośrodka gruntowego wodą $\chi = f(S_r)$ i zawiera się w przedziale od 0 do 1. Przyjmując takie założenie, można zapisać: $\tan(\varphi^b) \approx \chi \tan(\varphi')$. Zależność $s\chi \tan(\varphi')$ wyraża wzrost spójności gruntu w wyniku działania ciśnienia ssania i jest określana mianem spójności kapilarnej, oznaczanej symbolem c'' . Przyjmując powyższe zależności, równanie na wytrzymałość gruntu na ścinanie przyjmuje postać (Vanapalli, Fredlund, Pufahl i Clifton, 1996; Lu i Likos, 2004; Blight, 2013):

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + s\chi \tan(\varphi') + c'$$

gdzie:

χ – parametr zależny od stopnia nasylenia ośrodka gruntowego wodą $\chi = f(S_r)$, $\chi = 0-1$ [-].

Jako że zmiany nasylenia wpływają na przepływ wody przez ośrodek gruntuowy oraz jego wytrzymałość na ścinanie, w niniejszym artykule przeanalizowano wpływ stanu nasylenia gruntu oraz ciśnienia sphywowego na stateczność wałów przeciwpowodziowych oraz zmiany współczynnika stateczności w czasie filtracji wody przez wał.

Do określenia rozkładu ciśnienia ssącego wraz ze stanem nasylenia wykorzystano model Aryi i Parisa (1981), który umożliwia oszacowanie rozkładu ciśnienia ssącego na podstawie krzywej uziarnienia gruntu. Ciśnienie ssące w modelu Aryi i Parisa (1981) wyznacza się z następującej zależności:

$$s = \frac{2\gamma \cos(\Theta)}{\rho_w g R_i \sqrt{\frac{4e}{6} \cdot \left(\frac{3w_i}{4\pi R_i^3 \rho_s}\right)^{1-\alpha}}}$$

gdzie:

γ – napięcie powierzchniowe wody na styku fazy woda – powietrze $\gamma = 0,0728$ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],

Θ – kąt zwilżania (przyjęto $\Theta = 0^\circ$) [$^\circ$],

ρ_w – gęstość wody ($\rho_w = 1$) [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

g – przyspieszenie ziemskie ($g \approx 10$) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

R_i – reprezentatywna wartość promienia ziaren w i -tej wydzielonej frakcji obliczeniowej [m],

e – wskaźnik porowatości gruntu [-],

w_i – sumaryczny udział poszczególnych frakcji wraz z mniejszymi [-],

ρ_s – gęstość szkieletu gruntowego [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

α – parametr skalujący modelu [przyjęto $\alpha = 1.38$ zgodnie z Aryi i Paris (1981)].

W celu uzyskania ciągłej zależności między ciśnieniem ssania a stopniem wilgotności rozkłady wartości uzyskane z modelu Aryi i Parisa zostały opisane z wykorzystaniem dwuparametrowego modelu Van Genuchtena (1980).

$$S_r(s) = S_{rr} + \frac{S_{rs} - S_{rr}}{[1 + \alpha_v s^{n_v}]^{1-(1/n_v)}}$$

gdzie:

S_{rs} – stopień wilgotności gruntu w pełni nasyconego ($S_{rs} = 1$),

S_{rr} – rezydualny stopień wilgotności (przyjęto $S_{rr} \approx 0$),

α_v, n_v – parametry dopasowania modelu.

Założenia przyjęte do modelowania

Do analizy przyjęto wał o wysokości 4,0 m i nachyleniu skarp 1 : 2 oraz szerokości korony równej 4,0 m. Poziom piętrzenia wody przyjęto na 0,5 m poniżej

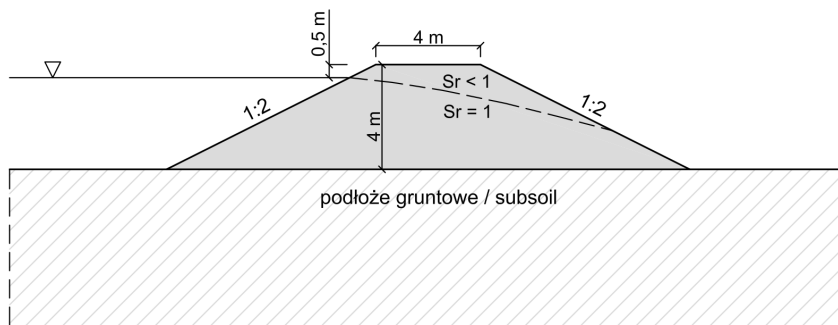
korony. Geometria modelu obliczeniowego została przedstawiona na rysunku 1, na rysunku 2 pokazano model do obliczeń statycznych. Analizę przeprowadzono dla dwóch przypadków:

- korpus wału zbudowany z gruntów niespoistych, piasków średnich (warstwa II, tab. 1), podłoże gruntowe zbudowane z glin (warstwa III, tab. 1),
- korpus wału zbudowany z gruntów spoistych, glin piaszczystych (warstwa I, tab. 1), podłoże gruntowe zbudowane z glin (warstwa III, tab. 1).

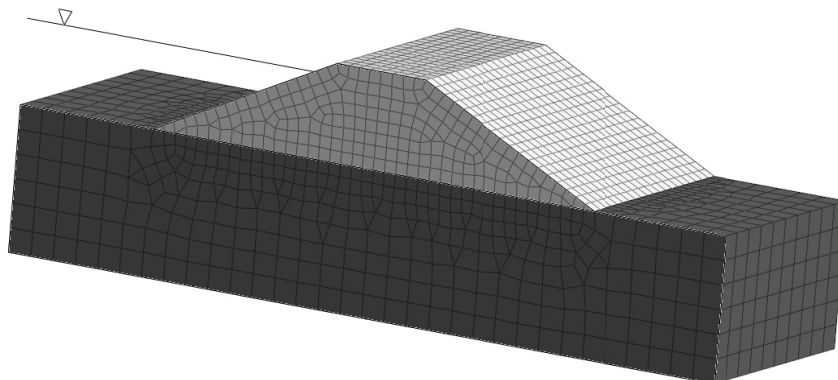
Do stworzenia modelu zmian wytrzymałości gruntu wraz ze stanem na-

sycenia dla obu przypadków obliczeniowych przyjęto następujące założenia:

- ciśnienie powietrza jest równe ciśnieniu atmosferycznemu ($u_a = 0$); saturacja gruntu w wyniku przepływu wody przez wał,
- naprężenia zależą od stanu nasycenia,
- efektywny kąt tarcia wewnętrznego i spójność efektywna są stałe, niezależne od ciśnienia ssania ($\varphi' = \text{const}$, $c' = \text{const}$),
- wzrost wytrzymałości na ścinanie jest spowodowany wzrostem spójności kapilarnej: $c'' = s\chi \tan(\varphi')$,



RYSUNEK 1. Geometria wału
FIGURE 1. Flood embankment geometry



RYSUNEK 2. Model wału do obliczeń statycznych
FIGURE 2. Flood embankment model for static calculations

TABELA 1. Zestawienie parametrów gruntowych
TABLE 1. Soil parameters

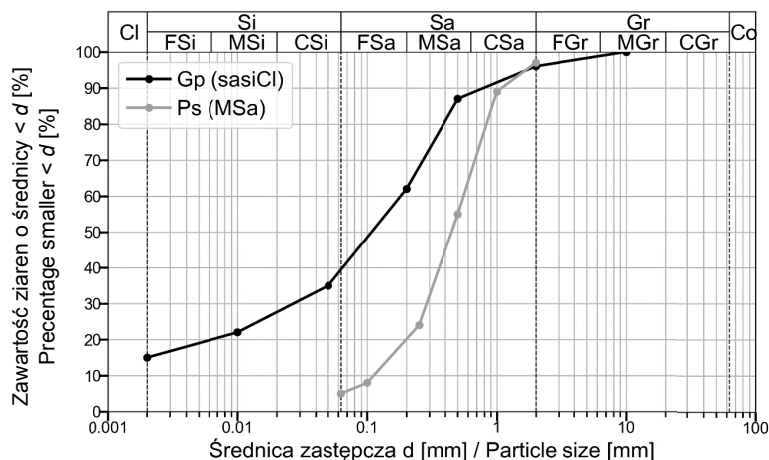
Warstwa Layer	Rodzaj gruntu Soil type	γ [kN·m ⁻³]	α_v [kPa ⁻¹]	n_v [-]	e [-]	φ' [°]	c' [kPa]	k_s [m·s ⁻¹]
I	Gp/sasiCl	20,0	0,362	1,24	0,33	31	1	1,0·10 ⁻⁶
II	Ps/MSa	18,0	0,343	1,84	0,43	35	0	3,0·10 ⁻⁴
III	G/sasiCl	19,0	–	–	0,44	31	2	5,0·10 ⁻⁷

- zmiany kąta φ^b zależą liniowo od zmian stopnia wilgotności $\chi \approx S_r$ (Nuth i Laloui, 2008; Blight, 2013; Szymkiewicz i in., 2014),
- początkowy stopień wilgotności gruntów w korpusie wału wynosi $S_r \approx 0,5$ (zbliżone do warunków naturalnych),
- zmiany stanu nasycenia gruntów w korpusie zależą od zmian położenia krzywej depresji w czasie.

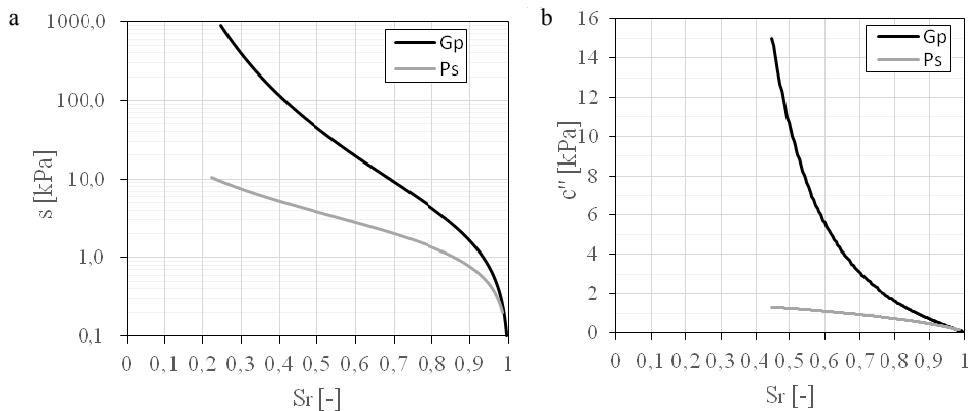
Na rysunku 3 przedstawiono krzywe uziarnienia gruntów (dla korpusu wału) przyjętych do modelowania. Jako że skupiono się na analizie zmian stanu nasycenia i wytrzymałości gruntów w korpusie wału, grunty podłoża dla obu

przypadków obliczeniowych przyjęto jako w pełni nasycone gliny (nie modelowano zmian charakterystyk ze stanem nasycenia).

Obliczenia przeprowadzono dla filtracji nieustalanej z wykorzystaniem programu Midas GTS NX, stateczność wyznaczono metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie SSR. Podczas obliczeń uwzględniano zmiany wytrzymałości gruntu wywołane zmianą stanu nasycenia w czasie piętrzenia wody przez wał. W modelu grunty przyjęto jako nienasycone, krzywe retencji wyznaczono na podstawie parametrów z rysunku 4 według modelu Aryi i Parisa, przepływ przez ośrodek nienasycony został okre-



RYSUNEK 3. Wykresy uziarnienia analizowanych gruntów
FIGURE 3. Particle size distribution for analysed soils



RYSUNEK 4. a – krzywe retencji gruntów, b – charakterystyki spadku spójności gruntu w zależności od stopnia wilgotności

FIGURE 4. a – soil water characteristic curves, b – decrease of soil cohesion due to change of saturation degree

ślony według modelu Van Genuchtena (1980) na podstawie parametrów przedstawionych w tabeli 1, w której przy pełnym nasyceniu współczynnik filtracji osiąga wartość k_s (tab. 1). Parametry fizyczne i wytrzymałościowe do obliczeń przyjęto zgodnie z zestawieniem w tabeli 1. Graniczne wartości ciśnienia ssania wprowadzono jako: 45 kPa (max. $c'' = 11$ kPa) dla korpusu zbudowanego z glin piaszczystych i 4 kPa (max. $c'' = 1,5$ kPa) dla korpusu z piasków, co odpowiada stopniowi wilgotności $S_r \approx 0,5$.

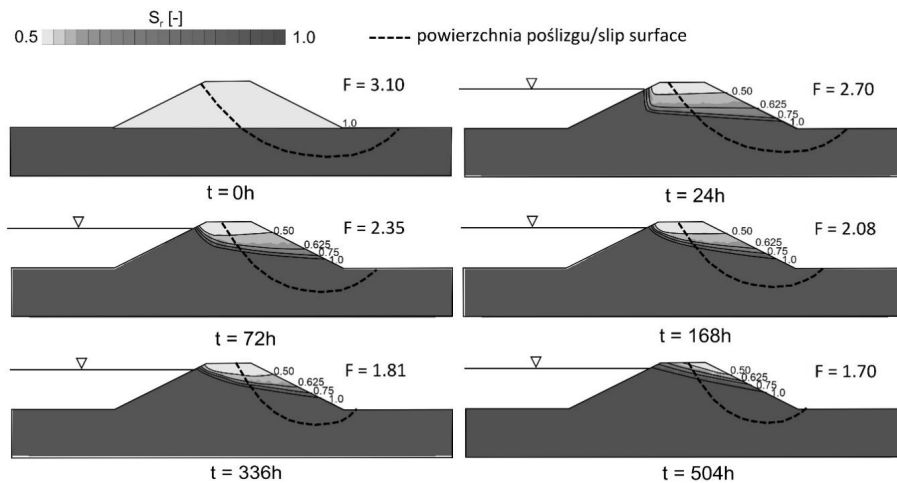
Wyniki modelowania i ich analiza

Dla korpusu wału zbudowanego z glin piaszczystych przeprowadzono analizę dla filtracji nieustalonej i obliczono współczynniki stateczności dla sześciu kroków czasowych (0, 24, 72, 168, 336, i 504 h). Jako ostatni krok przyjęto czas 504 h, zakładając, że po tym czasie następuje ustalenie się krzywej depresji. Wynikające z badań modelowych zmia-

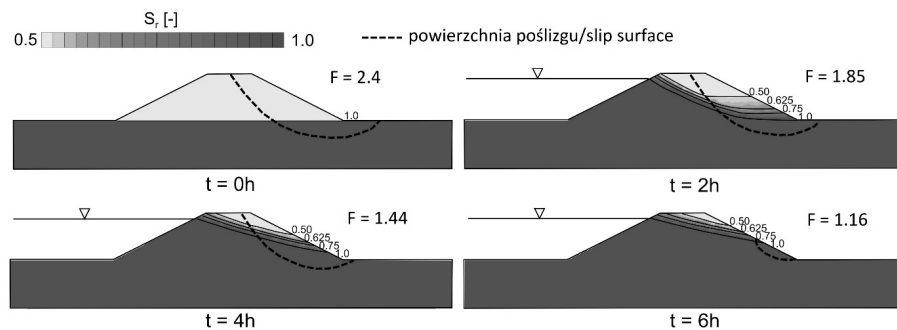
ny stopnia wilgotności oraz krzywe poślizgu dla poszczególnych etapów zostały przedstawione na rysunku 5.

Podobną analizę dla filtracji nieustalonej przeprowadzono także dla wału zbudowanego z gruntów piaszczystych i obliczono współczynniki stateczności dla czterech kroków czasowych (0, 2, 4 i 6 h). Jako czas ustalenia się krzywej depresji przyjęto $t = 6$ h. Etapy obliczeniowe zostały przedstawione na rysunku 6.

Na rysunku 7 oraz w tabeli 2 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń wpływu zmian stanu nasycenia gruntów oraz ciśnienia sphywowego na wartość współczynnika stateczności. Dla obu przypadków obliczeniowych (korpus z glin piaszczystych oraz piasków średnich) zanotowano spadek współczynnika stateczności wraz z ustaleniem się warunków przepływu przez wał. Dla wału zbudowanego z glin piaszczystych współczynnik stateczności skarpy odpo-wietrznej obniżył się z $F = 3,1$ ($t = 0$ h) do $F = 1,7$ ($t = 504$ h), spadek o około 45%. W przypadku wału zbudowanego



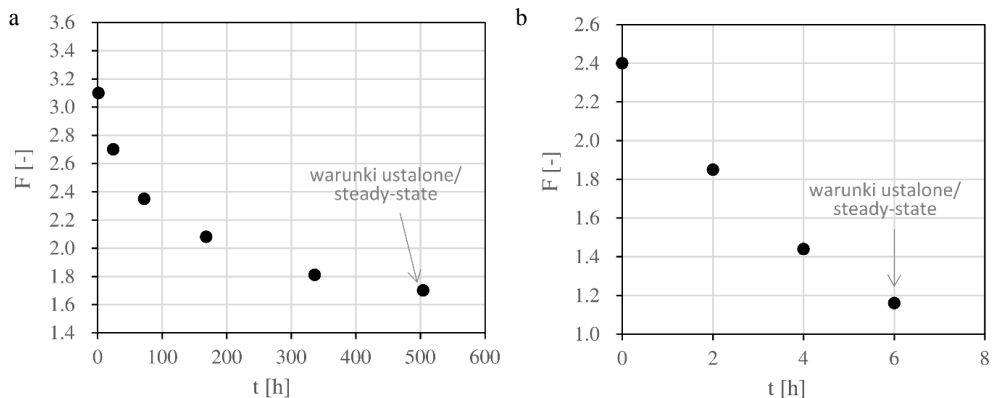
RYSUNEK 5. Zmiany stopnia wilgotności oraz krzywe poślizgu dla kolejnych etapów obliczeń (korpus zbudowany z gliny piaszczystej)
 FIGURE 5. Change in saturation degree and slip surface for each calculation step (embankment body made of sandy loam)



RYSUNEK 6. Zmiany stopnia wilgotności oraz krzywe poślizgu dla kolejnych etapów obliczeń (korpus zbudowany z piasków średnich)
 FIGURE 6. Change in saturation degree and slip surface for each calculation step (embankment body made of medium sand)

z piasków średnich współczynnik stateczności obniżył się z $F = 2,4$ ($t = 0$ h) do $F = 1,16$ ($t = 6$ h), spadek o około 52%. Dla wału zbudowanego z glin największy spadek wartości współczynnika stateczności zanotowano w początkowej fazie piętrzenia, kiedy w wyniku przesączania się wody następuje stopniowa saturacja gruntów w korpusie wału. Zwiększenie stopnia wilgotności wpły-

wa na obniżenie ciśnienia ssania i tym samym spadek parametrów wytrzymałościowych. Największy spadek współczynnika stateczności jest notowany do momentu, w którym grunty w obrębie krzywej poślizgu osiągają stan bliski pełnemu nasyceniu (małe wartości parametrów wytrzymałościowych). Dla analizowanego przypadku wału z glin piaszczystych stan ten został osiągnięty dla



RYSUNEK 7. Wyniki obliczeń stateczności w czasie dla: a – gliny piaszczystej, b – piasku średniego
 FIGURE 7. Results of slope stability calculation for: a – sandy loam, b – medium sand

TABELA 2. Zestawienie wyników obliczeń stateczności
 TABLE 2. Slope stability calculation results

Grunt / Soil	Glina piaszczysta / Sandy loam						Piasek średni / Medium sand				
	t [h]	0	24	72	168	336	504	0	2	4	6
F [-]		3,10	2,70	2,35	2,08	1,81	1,70	2,40	1,85	1,44	1,16
$(F_t/F_0) \cdot 100$ [%]		100,0	87,1	75,8	67,1	58,4	54,8	100,0	77,1	60,0	48,3
Spadek F [%] F reduction [%]		0,0	12,9	24,2	32,9	41,6	45,2	0,0	22,9	40,0	51,7

$t \approx 168$ h (redukcja F o 32.9% dla $t = 168$ h). Po przekroczeniu tej wartości zanotowano mniejszy spadek współczynnika stateczności w czasie, dla czasu piętrzenia między 168 a 504 h współczynnik stateczności zmniejszył się o 12,3% w stosunku do wartości początkowej (dla $t = 0$ h).

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych obliczeń, w przypadku zagrożenia stateczności wałów przez filtrację (stateczność filtracyjna) zasadne jest stosowanie rozwiązań ograniczających przepływ przez korpus wału takich jak uszczelnienia czy drenaże. Takie rozwiązania pozwalają zarówno na ograniczenie zasięgu krzywej depresji (ograniczenie sił filtracji), jak i zmniejszenie stanu

nasylenia gruntów w korpusie. Dzięki temu uzyskiwany jest większy zapas bezpieczeństwa. Zgodnie z wynikami przeprowadzonych obliczeń efektywność rozwiązań konstrukcyjnych w postaci uszczelnienia czy drenażu będzie największa w sytuacji, w której pozwala ona na zabezpieczenie przed wodą gruntów, przez które może przebiegać najbardziej „niebezpieczna” powierzchnia poślizgu.

Wnioski

Przeprowadzona analiza pozwala na sformułowanie następujących wniosków.

1. Zmiany stanu nasylenia gruntów w korpusie wału w czasie piętrzenia

- wody oraz położenie krzywej depresji w istotny sposób wpływają na stateczność wałów przeciwpowodziowych.
2. Największy spadek wartości współczynnika stateczności następuje do momentu osiągnięcia przez grunty, przez które może przebiegać najbardziej „niebezpieczna” powierzchnia poślizgu stanu bliskiego pełnemu nasyceniu.
 3. Dla analizowanych przypadków obliczeniowych spadek wartości współczynnika stateczności w stosunku do wartości początkowej wyniósł około 45% ($F_{\text{steady-state}} = 0,55F_0$) dla korpusu zbudowanego z glin piaszczystych oraz około 52% ($F_{\text{steady-state}} = 0,48F_0$) dla korpusu zbudowanego z piasków średnich.
 4. Obliczenia stateczności zazwyczaj prowadzone są z pominięciem stanu nasycenia gruntów. Przyjęcie do obliczeń efektywnych parametrów wytrzymałościowych oraz nieuwzględnienie wzrostu wytrzymałości gruntów w wyniku działania ciśnienia ssania pozwala na uzyskanie dodatkowego zapasu bezpieczeństwa.

Literatura

- Arya, L.M. i Paris, J.F. (1981). A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data 1. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1023-1030. doi: 10.2136/sssaj1981.03615995004500060004x
- Blight, G.E. (2013). *Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice*. Boca Raton: CRC Press.
- Borys, M. (2007). Przepisy i wymogi oraz aktualny stan obwałowań przeciwpowodziowych w Polsce. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, 7(2), 25-44.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. i Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
- Lu, N. i Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Nuth, M. i Laloui, L. (2008). Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(7), 771-801. doi: 10.1002/nag.645
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie Dz.U. 2007 nr 86, poz. 579.
- Skutnik, Z. (2013). Badanie parametrów wytrzymałościowych piasku średniego w aparacie trójosiowego ściskania z kontrolowanym ciśnieniem ssania. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 4(2), 159-165.
- Szymkiewicz, A., Sikora, Z., Ossowski, R. i Tisler, W. (2014). Właściwości retencyjne, przewodność hydrauliczna i naprężenia efektywne w gruntach nienasyconych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 5, 445-452.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons.
- Van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. i Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379-392.

Streszczenie

Wpływ filtracji oraz zmian nasycenia gruntu na stateczność wałów przeciwpowodziowych. W artykule przeanalizowano zmiany współczynnika stateczności skarp wałów przeciwpowodziowych podczas wezbrania. Pod uwagę wzięto wpływ zmian wytrzymałości gruntów na ścinanie w wyniku zmian stopnia wilgotności oraz wpływ działania sił filtracji. Analizę z wykorzystaniem

MES przeprowadzono dla dwóch przypadków: korpusu wału zbudowanego z gruntów spoistych; korpusu wału z gruntów niespoistych. Dla korpusu zbudowanego z glin piaszczystych wartość współczynnika stateczności obniżyła się z $F = 3,1$ ($t = 0$ h) do $F = 1,7$ ($t = 504$ h), a dla korpusu z piasków z $F = 2,4$ ($t = 0$ h) do $F = 1,16$ ($t = 6$ h).

Summary

Impact of filtration and changes in soil saturation on slope stability of flood embankments. In this article the change of the factor of safety for slope stability of flood embankments have been analysed. The

change of shear strength due to the change in the soil saturation and the forces of filtration was taken into account. The FEM analysis was carried out for two calculation cases: body of cohesive soils embankment; the body of non-cohesive soil embankment. For the body made of sandy loams, the value of factor of safety decreased from $F = 3.1$ ($t = 0$ h) to $F = 1.7$ ($t = 504$ h), while for the body built of sands from $F = 2.4$ ($t = 0$ h) to $F = 1.16$ ($t = 6$ h).

Authors' address:

Łukasz Zawadzki, Bartłomiej Bursa
GEOTEKO Serwis Sp. z o. o.
02-739 Warszawa, ul. Wałbrzyska 14/16
Poland
e-mail: lukasz.zawadzki@geoteko.com.pl