

**Mariusz CHOLEWA**

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji  
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

## Stateczność nawodnionej skarpy z mieszanki popiołowo-żużlowej

Artykuł przedstawia wyniki badań modelu fizycznego i obliczeń numerycznych dotyczących stateczności skarpy odwodnej nasypu. Model fizyczny nasypu hydrotechnicznego wybudowano w skali zmniejszonej w korycie hydraulicznym, wewnątrz którego zamontowano urządzenia umożliwiające swobodną regulację poziomu wody górnej i dolnej, a także rurki piezometryczne z elektronicznym pomiarem poziomu wody wewnątrz modelu. Wstępnie w badaniach laboratoryjnych określono podstawowe parametry fizyczne i mechaniczne gruntu niezbędne do uformowania nasypu modelowego. Oznaczone w laboratorium parametry gęstości, kąta tarcia wewnętrznego i kohezji oraz poziomy piezometryczne z badań modelowych zostały wprowadzone do obliczeń numerycznych w celu określenia współczynnika stateczności dla skarpy odwodnej. Obliczenia wykonano metodą Bishopa dla sześciu schematów obliczeniowych przy zmiennym położeniu krzywej filtracji w korpusie nasypu. Wyniki przeprowadzonych prac wskazują na zależność pomiędzy położeniem krzywej depresji, parametrami geotechnicznymi nawodnionej mieszanki popiołowo-żużlowej a uzyskiwaną wartością współczynnika stateczności.

**Słowa kluczowe:** popioło-żużel, nasypy hydrotechniczne, stateczność skarp

### Wstęp

Mieszanka popiołowo-żużłowa - produkt uboczny spalania węgla kamiennego - uważana jest za wartościowy grunt antropogeniczny i znajduje szereg zastosowań w budownictwie ziemnym. Ze względu na dobre właściwości zagęszczające używa się jej na przykład do budowy nasypów. Fachowa wiedza z zakresu budownictwa i właściwości materiałów gruntowych [1, 2] pozwala wykorzystać popioło-żużel także do budowy nasypów hydrotechnicznych. Dobranie odpowiednich parametrów projektowych oraz zabezpieczenie przed niekorzystnym oddziaływaniem wody to podstawowe warunki wykorzystania odpadów paleniskowych w tego typu obiektach. Niewłaściwe zaprojektowanie budowli naraża jej skarpy na utratę stateczności [3-7]. Przed użyciem popioło-żużlu do celów budowlanych należy zbadać przydatność konkretnej mieszanki do zastosowania w założonym typie budowli. Najskuteczniejszą metodą weryfikacji są poprzedzone badaniami laboratoryjnymi badania modelowe. Warunkiem ich wiarygodności jest powtarzalność wyników oraz porównanie ich z modelami numerycznymi.

Przedstawione w niniejszej pracy badania miały na celu określenie zależności pomiędzy parametrami geotechnicznymi nawodnionej mieszanki popiołowo-żużlowej, położeniem krzywej depresji w korpusie nasypu hydrotechnicznego i obliczoną wartością współczynnika stateczności.

## 1. Charakterystyka mieszanki popiołowo-żużlowej

Właściwości fizyczne i chemiczne odpadów paleniskowych są bardzo zróżnicowane - zależą od rodzaju użytego surowca energetycznego, technologii spalania, rodzaju transportu i składowania. Wykorzystana do badań mieszanka popiołowo-żużłowa pochodziła z Elektrowni Skawina. Materiał stanowi produkt uboczny procesu spalania węgla kamiennego z dziesięcioprocentowym dodatkiem biomasy (wykorzystywanej z uwagi na wymogi prawne) w postaci trocin oraz peletu słonecznikowego. Popioło-żużel odkłada się w dolnej części kotła, skąd jest wygarniany, a następnie mechanicznie rozdrabniany.

Parametry geotechniczne mieszanki, którą można scharakteryzować jako piasek zapyłony o zawartości frakcji najdrobniejszych  $f_{\pi+i} = 24,87\%$ , oznaczono w laboratorium Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Ogólna charakterystyka geotechniczna mieszanki popiołowo-żużlowej

| Parametr                                                                              | Jednostka                       | Wartość |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------|
| Zawartość frakcji według norm PN-EN ISO 14688-1:2006 [8] i PN-EN ISO 14688-2:2006 [9] |                                 |         |
| – żwirowa 63-2 mm                                                                     |                                 | 19,36   |
| – piaskowa 2-0,063 mm                                                                 | %                               | 55,77   |
| – pyłowa 0,063-0,002 mm                                                               |                                 | 22,38   |
| – ilowa $\leq 0,002$ mm                                                               |                                 | 2,49    |
| Rodzaj gruntu według normy PN-B-02481:1998 [10]                                       | –                               | Po      |
| Rodzaj gruntu według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 [11]                           | –                               | siSa    |
| Wskaźnik niejednorodności uziarnienia                                                 | –                               | 14,71   |
| Wilgotność naturalna                                                                  | %                               | 40,83   |
| Gęstość objętościowa                                                                  | $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1,456   |
| Gęstość objętościowa szkieletu                                                        | $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1,078   |
| Wilgotność optymalna                                                                  | %                               | 35,00   |
| Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu                                             | $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 1,135   |
| Kąt tarcia wewnętrznego przy $I_s = 0,95$                                             | °                               | 36,0    |
| Spójność przy $I_s = 0,95$                                                            | kPa                             | 47,0    |

## 2. Stanowisko do badań modelowych

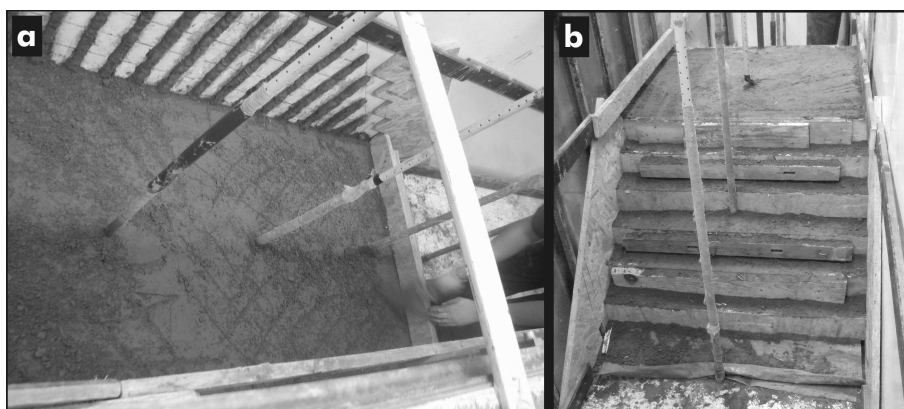
Stanowisko badawcze zorganizowano w korycie hydraulicznym (rys. 1) o następujących wymiarach wewnętrznych: długość - 600 cm, szerokość - 100 cm, wysokość - 120 cm. Wewnątrz koryta zamontowano urządzenia do swobodnej regulacji i stabilizacji poziomu wody górnej i dolnej, a także rurki piezometryczne z elektronicznym pomiarem poziomu wody wewnątrz modelu. System przewodów i przelewów umożliwiał regulację i pomiar objętości dopływającej wody [12].



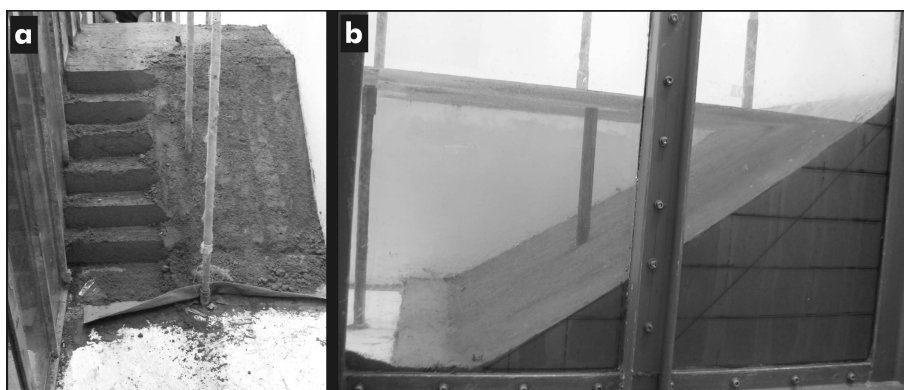
Rys. 1. Widok koryta hydraulicznego - średniowymiarowego aparatu do badania filtracji przez modele nasypów

## 3. Metoda badań modelowych

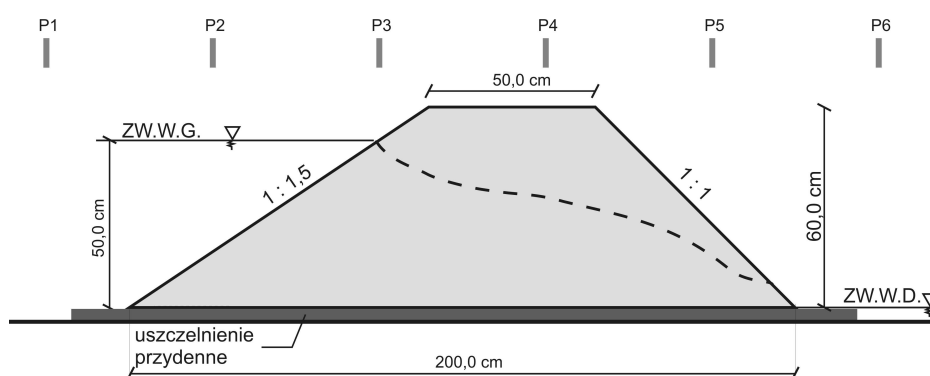
Model wykonano na podłożu ilowym o grubości 4 cm, które zastępowało warstwę nieprzepuszczalną. Nasyp budowano warstwami o grubości 10 cm. Kolejne warstwy zagęszczano mechanicznie do  $I_s = 0,95$  (rys. 2). Po uformowaniu modelu zgodnie z założonymi wymiarami geometrycznymi (rys. 3, 4) prowadzono piętrzenie wody górnej z prędkością 10 cm/h. W trakcie piętrzenia notowano położenie poziomu wody na stanowisku górnym oraz poziom krzywej filtracji wewnątrz nasypu. Po zakończeniu badania obniżano zwierciadło wody górnej i obserwowano zachowanie się skarpy odwodnej. Przed filtracją przyścienną na styku materiału modelu i ścian koryta zabezpieczono się, formując pasy ilowe (rys. 2a).



Rys. 2. Budowa nasypu modelowego: a) warstwa popioło-żużłu po zagęszczeniu, b) model przed skarpowaniem



Rys. 3. Nasyp modelowy: a) skarpowanie po zdjęciu elementów szalunkowych, b) piętrzenie wody na poziomie 50 cm



Rys. 4. Schemat modelu fizycznego nasypu (P2-P5 - piezometry)

Mierzone poziomy piętrenia mieściły się w zakresie od 0,00 do 0,50 m. Wartości spadku hydraulicznego dla poszczególnych wariantów obliczeniowych zawierały się w przedziale od 0,05 do 0,35. Utrzymanie piętrenia na poziomie 50 cm było możliwe tylko przez kilka godzin z uwagi na narastające uszkodzenia filtracyjne skarpy odpowietrznej.

#### 4. Analiza stateczności skarpy

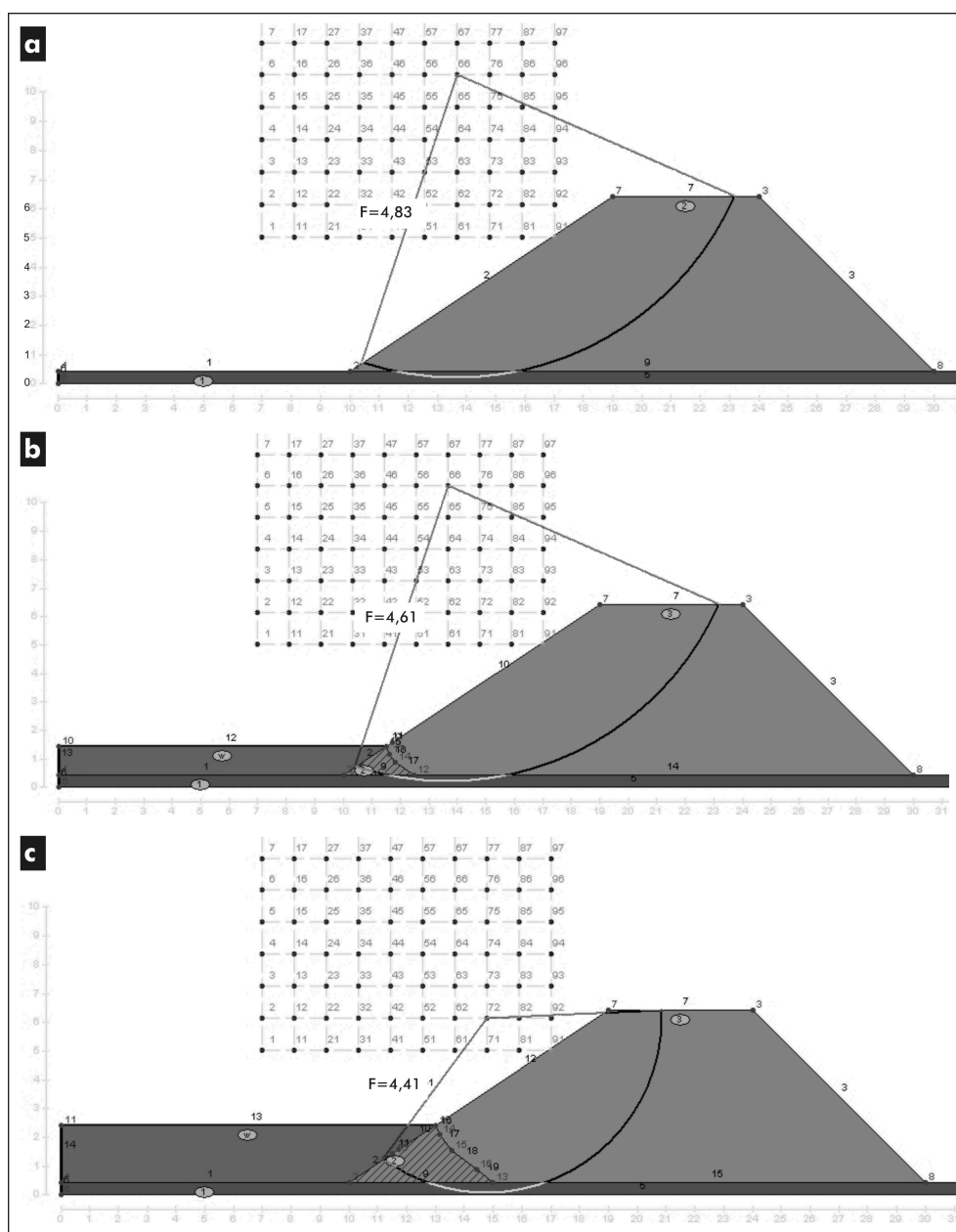
Obliczenia stateczności skarpy odwodnej przeprowadzono numerycznie metodą blokową Bishopa. Zdefiniowany w obliczeniach model komputerowy posiadał wymiary dziesięciokrotnie większe niż model fizyczny wykonany w korycie hydraulicznym. Uwzględniono uszczelnienie przydenne z warstwy ilowej, w obrębie korpusu nasypu wydzielono warstwy poniżej i powyżej krzywej filtracji. Parametry geotechniczne mieszanki popiołowo-żużlowej przyjęto z oznaczeń wykonanych w laboratorium Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki (tab. 1). Założone w obliczeniach numerycznych poziomy zwierciadła wody w korpusie nasypu pochodziły z badań modelowych w korycie hydraulicznym. Obliczenia współczynnika stateczności przeprowadzono dla sześciu schematów różniących się wysokością piętrenia i położeniem krzywej filtracji w korpusie nasypu.

Schemat na rysunku 5a przedstawia stan przed rozpoczęciem piętrenia wody - materiał i geometria nasypu umożliwiają uzyskanie współczynnika stateczności 4,83, co klasyfikuje przyszlą skarpe odwodną jako samostateczną.

Schematy na rysunkach 5b i 5c ukazują stan w trakcie procesu podnoszenia i stabilizowania zwierciadła wody swobodnej na stanowisku górnym oraz krzywej filtracji w korpusie nasypu. Przy poziomie piętrenia wynoszącym 10 cm (rys. 5b), który został osiągnięty po 1 godzinie, pomiary piezometryczne wykazały nieznaczne zawilgocenie korpusu nasypu. Wynik obliczenia współczynnika stateczności pozwolił uznać skarpe odwodną za samostateczną przy wartości  $F = 4,61$ . Poziom piętrenia wynoszący 20 cm (rys. 5c) uzyskano po 2 godzinach. Dla tego schematu obliczeniowego objętość gruntu nasypu w strefie saturacji była niewielka, obserwacje modelu fizycznego nie wykazały przesiąkania wody przez korpus nasypu. Wartość współczynnika stateczności w dalszym ciągu była bardzo korzystna - wynosiła 4,41.

Poziomy piętrenia 30 i 40 cm (rys. 6a, 6b) zostały osiągnięte odpowiednio po 3 i 4 godzinach. Ustalone na podstawie pomiarów piezometrycznych linie krzywych filtracji wskazują, że objętość gruntu nasypu w strefie aeracji była w dalszym ciągu przeważająca. Obserwacje powierzchni skarpy odpowietrznej nie wykazały możliwości przefiltrowania wody przez korpus nasypu. Obliczone współczynniki stateczności wyniosły odpowiednio 4,66 i 5,09.

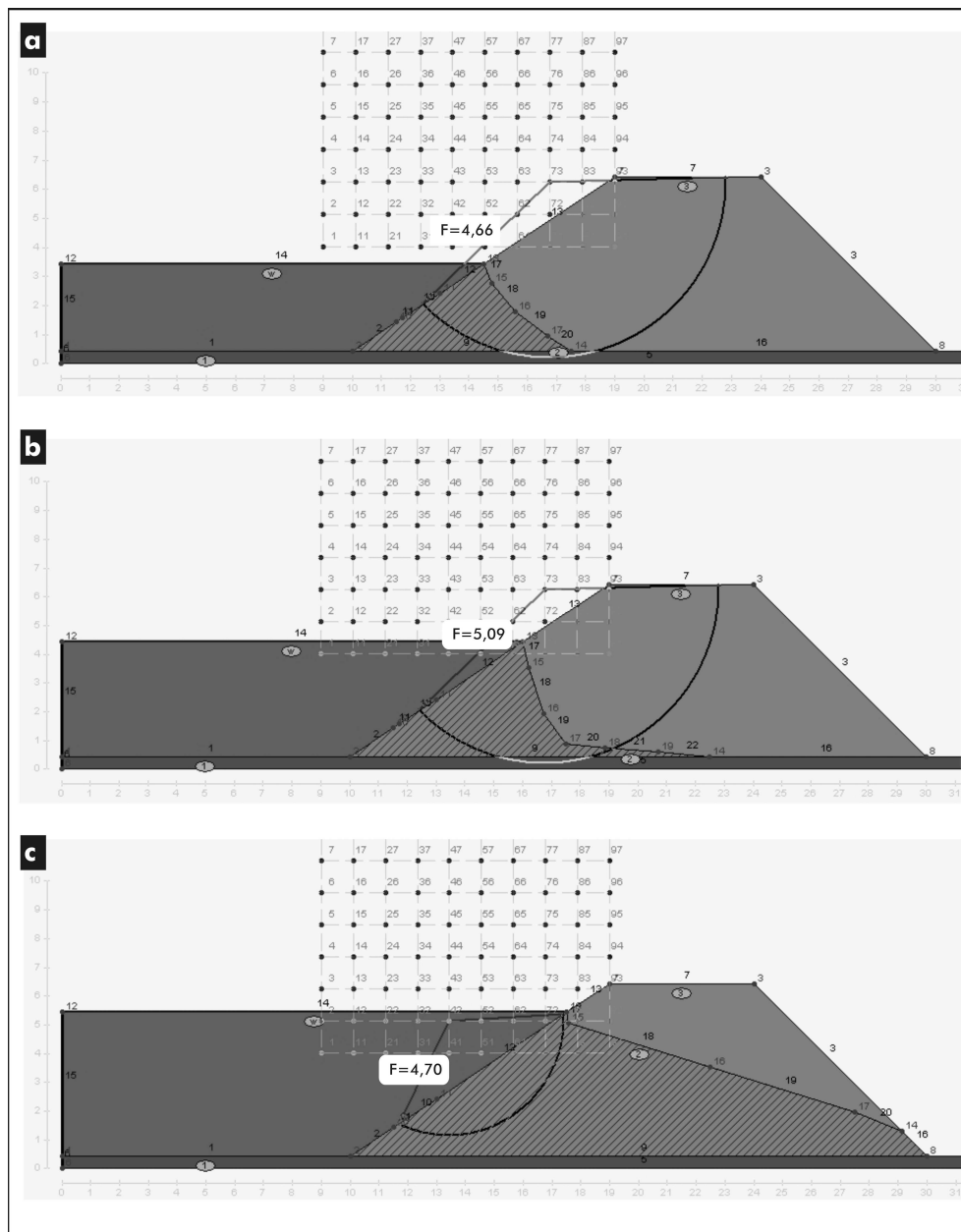
Docelowy poziom piętrenia (rys. 6c) osiągnięto po 5 godzinach. Pojawienie się przesiąkającej wody w podstawie skarpy odpowietrznej nastąpiło po 8 godzinach i 20 minutach.



Rys. 5. Krzywe poślizgu dla przyjętych schematów obliczeniowych: przed piętrzeniem (a), przy poziomie piętrzenia wynoszącym 10 cm (b) i 20 cm (c)

Ustalony na podstawie pomiarów piezometrycznych ustabilizowany poziom krzywej filtracji był praktycznie linią prostą przecinającą skarpę odpowietrzną na wysokości 15 cm. Przebieg tej linii wskazywał na mały opór hydrauliczny mieszanki po-

piołowo-żuźłowej przy tych wymiarach geometrycznych nasypu. Przecięcie krzywej filtracji z powierzchnią niezabezpieczonej skarpy odpowietrznej spowodowało wymywanie materiału z podstawy skarpy modelu fizycznego.



Rys. 6. Krzywe poślizgu dla przyjętych schematów obliczeniowych: przy poziomie piętrzenia wynoszącym 30 cm (a), 40 cm (b), 50 cm (c)

Z uwagi na swoje parametry geotechniczne materiał nasypu bardzo łatwo poddawał się zjawisku sufozji. Współczynnik stateczności obliczony dla przypadku szóstego - z uwzględnieniem parametrów geotechnicznych nawodnionej mieszanki popioło-żużlowej - wyniósł 4,70.

Ustalone metodą analizy wstecznej parametry mechaniczne, przy których współczynnik stateczności jest mniejszy niż 1,3, to  $6^\circ$  dla kąta tarcia i 6 kPa dla spójności. Z badań przeprowadzonych w aparacie bezpośredniego ścinania w skrzynce o wymiarach  $12 \times 12$  cm wynika jednak, że wartości parametrów mechanicznych nawodnionej mieszanki nie ulegają tak znaczącej redukcji. W przypadku ścinania pod wodą kąt tarcia wewnętrzny praktycznie się nie zmienił (wyniósł około  $36^\circ$ ), natomiast kilkakrotnie zmniejszyła się spójność (9,8 kPa).

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania oraz wykonane obliczenia dają wyniki zgodne w kwestii zachowania stateczności skarpy odwodnej modelu przy każdym z poziomów piętrzenia. Pomimo stosunkowo niekorzystnej geometrii skarpy oraz warunków gruntowo-wodnych wyliczona wartość współczynnika stateczności jest powyżej 4. Obserwacje modelu fizycznego nie wykazały uszkodzeń skarpy odwodnej. Obserwacje i pomiary prowadzono zarówno podczas piętrzenia wody z prędkością 10 cm/godz., jak i w czasie utrzymywania stałego poziomu wynoszącego 50 cm. Ważną informacją było zachowanie się skarpy odwodnej przy szybkim obniżaniu poziomu wody, pojawiające się wówczas ciśnienie sphywowe nie doprowadziło do utraty stateczności.

Wpływ na takie wyniki mają wartości parametrów mechanicznych gruntu nawodnionego. Wykonane badania  $\sigma$  i  $c$  w aparacie bezpośredniego ścinania dają wartości kąta tarcia wewnętrznego takie jak podczas ścinania przy wilgotności zbliżonej do optymalnej. Kilkakrotnie są natomiast mniejsze wartości spójności (9,8 kPa). Parcie piętrzonej wody również oddziałuje korzystnie w przyjętych schematach obliczeniowych. Natomiast można by oczekiwać deformacji filtracyjnych związanych z oddziaływaniem ciśnienia sphywowego, jednak obserwując model fizyczny podczas gwałtownego obniżenia zwierciadła, nie zauważono takich procesów.

Zjawiska filtracji wody badane w modelach nasypów wykonanych w skali zmniejszonej są najbardziej zbliżone do procesów filtracji przez naturalne obwałowania. Wyniki takich badań mogą stanowić informację o przewidywanym przebiegu pracy nasypów popioło-żużlowych czy też innych gruntów o zbliżonych parametrach. Modele tego rodzaju dają możliwość obserwacji zjawisk filtracyjnych - nawet tych krytycznych - bez obawy o konsekwencje całego eksperymentu. Wznosząca się woda infiltruje do zbocza i nawadnia korpus nasypu stopniowo, redukując parametry wytrzymałościowe gruntu w strefie saturacji. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że stosowane w praktyce budowlanej wymiary geometryczne nasypów, poziomy piętrzenia oraz wartości spadku hydraulicznego są na ogół znacznie



korzystniejsze niż przyjęte w prezentowanych badaniach modelowych. Badania modelowe mogą wyraźnie potwierdzić obliczenia stateczności przeprowadzone na podstawie określonych laboratoryjnie parametrów geotechnicznych.

### Podziękowania

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy.*

### Literatura

- [1] PN-B-12095-1997 Urządzenia wodno-melioracyjne - Nasypy - Wymagania i badania przy odbiorze.
- [2] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie, DzU 2007, Nr 86, poz. 579.
- [3] Bednarczyk S., Bolt A., Mackiewicz S., Stateczność oraz bezpieczeństwo jazów i zapór, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009.
- [4] Ma K.C., Tan Y.C., Chen C.H., The influence of water retention curve hysteresis on the stability of unsaturated soil slopes, *Hydrological Processes* 2011, 25, 23, 3563-3574.
- [5] Jia G.W., Zhan T.L.T., Chen Y.M., Fredlund D.G., Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels, *Engineering Geology* 2009, 106, 1-2, 92-103.
- [6] Fenton G.A., Griffiths D.V., Slope Stability, [in:] *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New York 2008, 381-400.
- [7] Wesley L.D., Slope Stability and Slope Engineering, [in:] *Geotechnical Engineering in Residual Soils*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New York 2010, 151-188.
- [8] PN-EN ISO 14688-1:2006 Badania geotechniczne - Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów - Część 1: Oznaczanie i opis.
- [9] PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne - Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów - Część 2: Zasady klasyfikowania.
- [10] PN-B-02481:1998 Geotechnika - Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
- [11] PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne - Badania laboratoryjne gruntów - Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego.
- [12] Michalski P., Cholewa M., Laboratoryjne badania filtracji wody w zbrojonych i niezbrojonych nasypach z odpadów powęglowych, *Inżynieria Morska i Geotechnika* 2002, 6, 319-323.

### Stability of Saturated Slope Formed from Ash-Slag Mixture

Furnace waste that is produced in power plants is, among other things, ash-slag mixture. Considering high production of this material nowadays it is used in different fields of engineering as a valuable anthropogenic soil. Good compaction parameters of this type of waste are the reason for its often usage in forming embankments (also hydrotechnical). Ash-slag mixture can be used for these types of constructions providing that it will be carefully protected from water influence. Inappropriately selected design parameters can lead to instability of structures' slopes.

The paper presents results from tests on the physical model and numerical calculations concerning a stability of riverside slope of embankment. The physical model of hydrotechnical embankment was built in a half-technical scale in hydrotechnical trough, inside of which there were devices that enabled free control of water levels installed, as well as piezometer tubes with electronic measurement of water levels inside the model.

Tested material came from Skawina Power Plant. It was furnace waste from process of burning hard coal, which is the main fuel of the power plant. Initially, basic physical and mechanical parameters of tested soil necessary for forming the model embankment were determined in laboratory tests. Determined in laboratory parameters of density, angle of internal friction and cohesion as well as piezometric levels from model tests were used for carrying out numeric calculations in order to determine a safety factor of riverside slope. Calculations were carried out using Bishop's method for six calculation schemes with different retention levels of water as well as with changing position of filtration curve in the embankment body. Tests results indicate that there is a relation between position of filtration curve, geotechnical parameters of saturated ash-slag mixture and obtained values of safety factors. Observation and measuring were carried out during water level rising as well as during keeping target water level at 50 cm. The riverside slope was also controlled at quick lowering of the water level. Flow pressure that occurs at that time did not contribute to slope instability or to damages in the riverside slope, despite the inclination 1 : 1.5. Tests and calculations gave results that were concordant in regard to stability of the riverside model slope at every retention level. Model tests can distinctly verify stability calculations based on geotechnical parameters that were determined in laboratory.

**Keywords:** ash-slag, hydraulic embankments, slope stability