INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 2/IV/2012, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 105–115
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Mariusz Cholewa

WPŁYW WBUDOWANIA GEOMEMBRANY ORAZ ELEMENTÓW DRENUJĄCYCH NA FILTRACJĘ PRZEZ NASYP Z MIESZANKI POPIOŁO-ŻUŻLOWEJ

INFLUENCE OF BUILDING UP THE GEOMEMBRANE AND THE DRAINING ELEMENTS ON THE FILTRATION THROUGH THE EMBANKMENT MADE OF AN ASH-SLAG MIXTURE

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań modelowych wykonanych w skali półtechnicznej. Autor stara się odpowiedzieć na pytanie, jak zachowa się nasyp z mieszanki popioło-żużlowej piętrzący wodę oraz jaki ewentualny rodzaj uszkodzeń filtracyjnych pojawi się w poszczególnych miejscach konstrukcji. W przeprowadzonych badaniach sprawdzono, czy zastosowany rodzaj i sposób wbudowania geosyntetycznej bariery polimerowej (GBR-P) oraz elementów drenujących zapewni bezpieczne warunki pracy budowli. W warunkach laboratoryjnych określono zmiany położenia krzywej filtracji w korpusie nasypu hydrotechnicznego bez elementów uszczelniających oraz z ekranem GBR-P. Badania wykazały, że odpad paleniskowy, jakim jest popioło-żużel, nie może być wykorzystywany w budownictwie wodnym bez dodatkowych zabiegów zabezpieczających. Zabiegiem takim może być wbudowanie w odpowiednich miejscach nasypu geosyntetycznych elementów uszczelniających i drenujących, zapobiegających zjawiskom sufozji i upłynniania.

Słowa kluczowe: geomembrany, popioło-żużel, nasypy, wodoprzepuszczalność

Summary

The paper presents the results of model tests carried out in a semi-technical scale. Author have been trying to answer the question, how the embankment lifting water made of the ash-slag mixture would behave and what kind of the possible filtration damages would occur in particular parts of the structure. It was verified in the conducted tests whether the applied kind and method of building up the geosynthetic polymer barrier /GBR-P/ and the draining elements would ensure the safe working conditions of the structure. There were determined in laboratory tests the changes of the filtration curve location in the body of the hydraulic embankment without sealing elements and with the GBR-P screen. The tests revealed, that the furnace waste such as the ash-slag, cannot be used in hydraulic engineering without proper procedures. It may be building in geosynthetic sealing elements and drainage preventing from suffusion and liquefaction.

Key words: *geomembranes, ash-slag, embankments, water permeability*

WSTĘP

Budowanie nasypów hydrotechnicznych, w szczególności wysokich i wykonanych z różnorodnych gruntów, wymaga dużego doświadczenia. W przypadku nieodpowiedniego dobrania parametrów nasypu istnieje niebezpieczeństwo deformacji budowli wskutek osiadania, osuwania, wymywania czy też upłynniania wbudowanego gruntu.

Z uwagi na deficyt gruntów naturalnych w budownictwie lądowym do budowy nasypów stosuje się materiały odpadowe z przemysłu ciężkiego, takie jak: szlaka wielkopiecowa, pyły, popioły, żużel oraz mieszanki tych materiałów. W przypadku budowli hydrotechnicznych zastosowanie odpadów przemysłowych wymaga uwzględnienia zjawisk wywołanych stałym oddziaływaniem wody [Zawisza 2001]. Jest to szczególnie istotne przy wykonywania nasypów mających pełnić funkcję budowli piętrzących wodę. Podstawą prawidłowego zaprojektowania tego typu obiektu jest zapewnienie szczelności oraz stateczności wykonanej konstrukcji, na co zwraca się uwagę zarówno w odpowiednim rozporządzeniu ministra środowiska [2007], jak i w literaturze przedmiotu [Borys, Mosiej 2003, Rembeza 2007].

Nowoczesny sprzęt do zagęszczania i odpowiednie kontrole jakości wykonania robót pozwalają na oszczędne wymiarowanie obwałowań oraz ich szybkie budowanie. Zarówno wytwarzane i stosowane obecnie nowe materiały konstrukcyjne, jak i rozwój technologii budowy pozwalają wykorzystywać do tworzenia tego typu konstrukcji grunty i materiały, wcześniej – z punktu widzenia inżynierskiego – nieprzydatne, takie jak wspomniane odpady przemysłowe. Czynnikiem kluczowym dla ich wykorzystania jest optymalizacja wysokości piętrzenia, którą można uzyskać poprzez użycie odpowiednich drenaży i filtrów, a także elementów uszczelniających w podłożu i korpusie zapory.

W inżynierii lądowej i wodnej szereg zastosowań znajdują obecnie geosyntetyki. Pełnią one zarówno funkcje hydrauliczne (takie jak filtracja, drenaż, uszczelnianie), jak i mechaniczne (wzmacnianie, separacja i ochrona) [Giroud, Badu-Tweneboah, Bonaparte 1992, Maro 2010, Maślanka, Pielichowski 2006]. Materiały pochodzenia syntetycznego spełniają bardzo istotną rolę w obniżaniu materiało- i transportochłonności w budownictwie inżynieryjnym. Stosowane są na coraz większą skalę w krajowej i światowej hydrotechnice [Viswanadham, König 2009, Wesolowski, Krzywosz, Brandyk 2000, Wu C. S. i in 2006]. Szerokie zastosowanie tworzyw sztucznych spowodowane jest ich korzystnymi właściwościami fizyko-mechanicznymi oraz chemicznymi. W niektórych wypadkach istotny jest także ich niewielki ciężar objętościowy. Należy również podkreślić, iż obecnie produkowane geosyntetyki wykazują znacznie korzystniejsze cechy w zakresie odporności na starzenie i procesy biologiczne niż wcześniej produkowane materiały. Uzyskuje się to miedzy innymi dzięki dodawaniu – w trakcie procesów produkcyjnych – specjalnych dodatków hamujących w pewnym stopniu procesy starzenia. Popularność polimerów zaczyna coraz bardziej rzutować zarówno na projektowanie budowli wodnych, jak i na technologię ich wykonywania. Zastosowanie tworzyw sztucznych w budownictwie hydrotechnicznym przynosi znaczne korzyści – nie tylko technologiczne, ale także ekonomiczne.

Celem opisanych w niniejszej pracy badań było sprawdzenie, jak zachowa się nasyp piętrzący wodę wykonany z mieszanki popioło-żużlowej oraz jaki ewentualny rodzaj uszkodzeń filtracyjnych pojawi się w poszczególnych miejscach konstrukcji. Sprawdzono również, czy zastosowany rodzaj materiałów uszczelniających i drenujących oraz sposób ich zabudowania zapewnią bezpieczne warunki pracy budowli. Dla uzyskania odpowiedzi na te pytania zbadano trzy modele nasypów – jeden wykonany tylko z popioło-żużla, drugi i trzeci wzbogacony elementami uszczelniającymi i drenującymi (rys. 2-5), scharakteryzowanymi w dalszej części artykułu.

CHARAKTERYSTYKA MIESZANKI POPIOŁO-ŻUŻLOWEJ

Wykorzystany do budowy nasypu modelowego popioło-żużel pochodził z Elektrowni Skawina. Zakład zajmuje się produkcją energii elektrycznej z wykorzystaniem jako paliwa węgla kamiennego oraz biomasy.

Ze względów technologicznych udział biomasy w spalanym materiale nie przekracza 10%. Ilość tzw. zielonej energii (wyprodukowanej z biomasy) stanowi około 4% uzyskiwanej energii elektrycznej. Opisywana mieszanka popio-

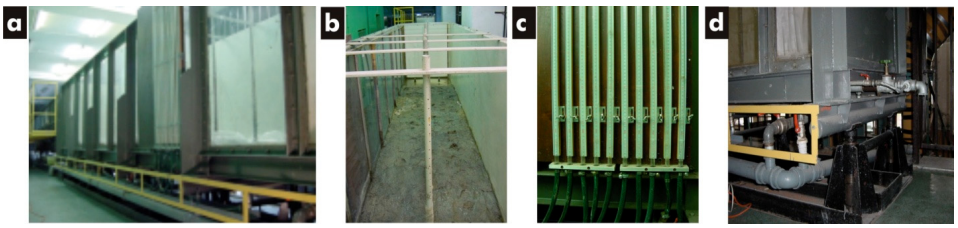
ło-żużlowa jest pozostałością po procesie spalania, odkładającą się w dolnej części kotła, wygarnianą i rozdrabnianą mechanicznie. W laboratorium Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie oznaczono parametry fizyczne mieszanki, którą wykorzystano podczas budowy modeli w korycie hydraulicznym. Pod względem geotechnicznym mieszankę popioło-żużlową można scharakteryzować jako piasek zapylony o zawartości frakcji najdrobniejszych $f_{\pi+i}$ = 24,87%. Podstawowe parametry geotechniczne materiału zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ogólna charakterystyka geotechniczna mieszanki popioło-żużlowej
Table 1. Geotechnical characteristics of the ash-slag mixture

Parametr	Jednostka	Wartość
Zawartość frakcji wg PN-EN ISO 14688-1:2006 żwirowa 2–63 mm piaskowa 0,063–2 mm pyłowa 0,002–0,063 iłowa ≤ 0,002	[%]	 19,36 55,77 22,38 2,49
Rodzaj gruntu według normy PN-B-02481:1998	[-]	Po
Rodzaj gruntu według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009	[-]	siSa
Wskaźnik niejednorodności uziarnienia	[-]	14,71
Wilgotność naturalna	[%]	40,83
Gęstość objętościowa	[g · cm^{-3}]	1,456
Gęstość objętościowa szkieletu	[g · cm^{-3}]	1,078
Wilgotność optymalna	[%]	35,00
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	[g · cm^{-3}]	1,135
Współczynnik filtracji k_{10} (dla I_S = 0,95)	[m/s]	3,95 · 10^{-6}

STANOWISKO DO BADAŃ MODELOWYCH

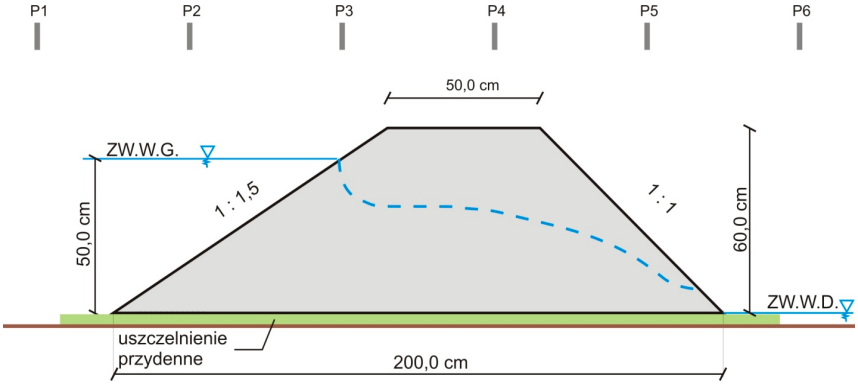
Stanowisko badwcze zorganizowano w korycie hydraulicznym (rys. 1), o wymiarach wewnętrznych: długość 600 cm, szerokość 100 cm, wysokość 120 cm. Wewnątrz koryta umieszczono przegrody przelewowe, umożliwiające dowolną regulację poziomu wody górnej i dolnej, oraz rurki piezometryczne do pomiaru poziomu wody wewnątrz modelu obwałowania. Odpowiedni system przewodów i przelewów umożliwiał regulację dopływającej wody i pomiar wydatku filtracyjnego przepływającego przez nasyp [Cholewa 2008].



Rysunek 1. Średniowymiarowy aparat do badania filtracji przez modele nasypów: a) widok ściany czołowej, b) wnętrze aparatu z iłowym uszczelnieniem przydennym, c) tablica pomiarowa do odczytu poziomu wody w piezometrach, d) zawory pomiarowo-upustowe
Figure 1. Medium size apparatus for testing filtration through model embankments: a) headwall view, b) inside of the apparatus with the clayey bottom sealing, c) table for measurements of water level in piezometers, d) measurement-and-spillway valves

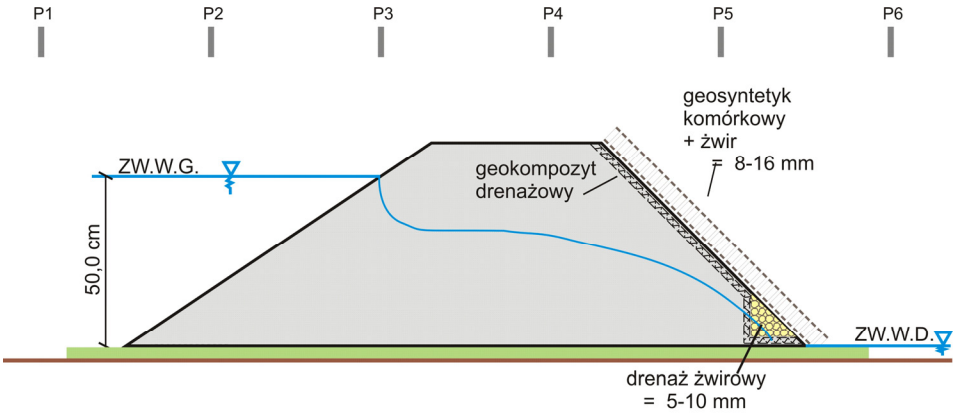
METODA BADAŃ MODELOWYCH

Nasypy modelowe budowano w korycie hydraulicznym warstwami o grubości 10 cm, zagęszczając je mechanicznie do I_S = 0,95. Po wybudowaniu poszczególnych modeli przeprowadzano piętrzenie wody górnej z prędkością 10 cm/h, co pozwoliło osiągnąć pełny poziom piętrzenia po 5 godzinach. Następnie w odstępach 24-godzinnych mierzono wydatek filtrującej przez nasyp wody oraz dokonywano odczytów położenia zwierciadła wody w piezometrach zainstalowanych w rozstawie poziomej co 50 cm. Na rysunkach 2, 4, 5 przedstawiono przekroje poprzeczne nasypów z podaniem ich wymiarów geometrycznych, w tabeli 2 zestawiono warunki, przy jakich prowadzono badania. Modele wykonano na podłożu iłowym o grubości 4 cm, które zastępowało warstwę nieprzepuszczalną. Pomiary prowadzono do uzyskania stabilizacji przepływu filtracyjnego bądź wystąpienia oznak przebicia hydraulicznego. Odczyty poziomu wody w piezometrach wykonywano w odstępach 6-minutowych. Po zakończeniu badania obniżano zwierciadło wody górnej i obserwowano zachowanie się skarpy odwodnej.

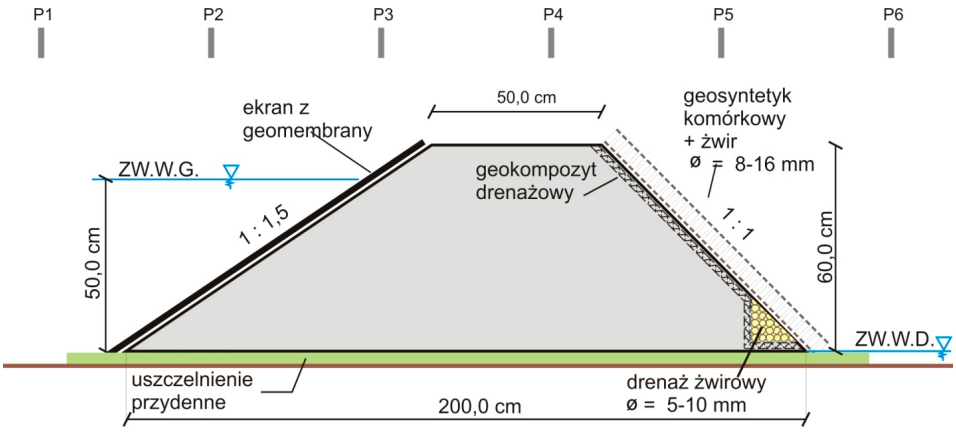


Rysunek 2. Przekrój poprzeczny przez model nasypu I (P1–P6 — piezometry)
Figure 2. Cross-section through the model embankment I (P1–P6 – piezometers)

Rysunek 3. Materiały geosyntetyczne zastosowane w modelu nr II i III; a) geosyntetyczna bariera polimerowa, b) geosyntetyk komórkowy, c) geokompozyt drenażowy
Figure 3. Geosynthetics materials applied in the models II and III a) polymeric geosynthetic barier, b) geocell, c) draining geocomposite



Rysunek 4. Przekrój poprzeczny przez model nasypu II (P1–P6 — piezometry)
Figure 4. Cross-section through the model embankment II (P1–P6 – piezometers)



Rysunek 5. Przekrój poprzeczny przez model nasypu III (P1–P6 — piezometry)
Figure 5. Cross-section through the model embankment III (P1–P6 – piezometers)

Tabela 2. Charakterystyka techniczna badanych modeli i warunki badania
Table 2. Technical characteristics of the tested models and testing conditions

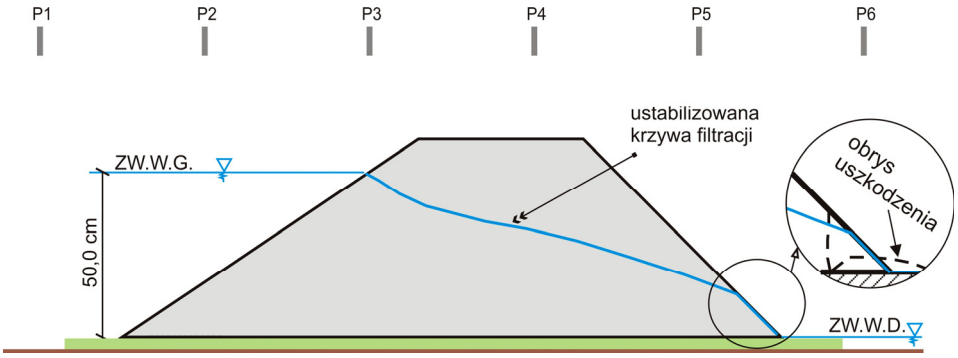
Parametry modeli	Jednostka	Model I	Model II	Model II
Wskaźnik zagęszczenia (I_S)	[-]	0,95		
Średni gradient hydrauliczny ($\Delta H_{śr}$)	[m]	0,50		
Spadek hydrauliczny (i)	[-]	0,35		
Czas trwania badania	[doby]	0,5	30	
Objętościowe natężenie przepływu Q_V	[cm^3/godz]	1700-2500	1700-1900	0
Przyczyna zakończenia badania	[-]	narastające uszkodzenia	stabilizacja przepływu	

PRZEBIEG BADAŃ, WYNIKI I ANALIZA

Model I

W modelu I, wykonanym tylko z mieszanki popioło-żużlowej, pełny poziom piętrzenia osiągnięto po 5 godzinach. Pojawienie się przesiąkającej wody w podstawie skarpy odpowietrznej nastąpiło po 8 godzinach i 20 minutach. Materiał na skarpie odpowietrznej został zawilgocony do wysokości 15 cm od dna modelu. Miejscami był również rozluźniony i zaczynał się upłynniać. Badania dla tego modelu zakończono po upływie 12 godzin i 30 minut od rozpoczęcia piętrzenia wody z uwagi na postępujące zniszczenie modelu wskutek wynoszenia cząstek gruntu przez filtrującą wodę. Przebieg krzywych filtracji w korpusie

modelu I (rys. 6) obrazuje zjawisko przesiąkania wody przez nasyp, które stało się przyczyną późniejszych uszkodzeń. Pomiary wykonane przez zainstalowane na koronie nasypu trzy repery powierzchniowe nie wykazały żadnych przemieszczeń pionowych w okresie prowadzenia badania.



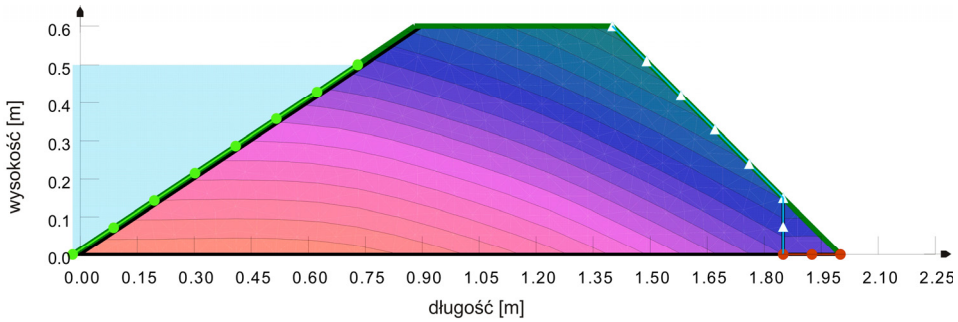
Rysunek 6. Wykresy piezometrycznych poziomów wody w modelu I podczas piętrzenia wody na stanowisku górnym; P1–P6 – piezometry
Figure 6. Graphs of the piezometric water levels in the model I while lifting up water at the up-stream stand (P1–P6 – piezometers)

Określona na podstawie ostatniego pomiaru krzywa filtracji jest praktycznie linią prostą przecinającą skarpę odpowietrzną na wysokości 15 cm. Jej przebieg wskazuje na mały opór hydrauliczny mieszanki popioło-żużlowej przy tych wymiarach geometrycznych nasypu. Przecięcie krzywej filtracji z powierzchnią niezabezpieczonej skarpy odpowietrznej spowodowało wymywanie materiału z jej podstawy. Materiał nasypu – z uwagi na jego parametry geotechniczne – bardzo łatwo poddawał się zjawisku sufozji. Pomierzone objętościowe natężenie przepływy było w przedziale 1700-2000 cm^3/godz.

Model II

Model II zmodernizowano w oparciu o analizę uszkodzeń filtracyjnych w modelu I. Na powierzchni skarpy odpowietrznej wyłożono geokompozyt drenażowy (rys. 3c, 4) uzupełniony w podstawie drenażem żwirowym o przekroju trójkątnym 15 × 15 cm. Całą powierzchnię skarpy przykryto geosyntetykiem komórkowym (rys. 3b) i zasypano żwirem o granulacji 8–16 mm. Pełny poziom piętrzenia został osiągnięty po 5 godzinach. Czas przejścia wody przez nasyp wyniósł 8 godzin 5 minut. Wypływająca w podstawie drenażu woda nie wymywała cząstek popioło-żużla. Ustabilizowana krzywa filtracji przecinała wykonany w podstawie drenaż żwirowy. Wydatek filtracyjny zawierał się w przedziale 1700–1900 cm^3/godz.

Korzystając z programu „GeoStudio 2007" wykonano analizę filtracji przy użyciu aplikacji„SEEP". Parametry geometryczne i geotechniczne przyjęto takie jak dla nasypu fizycznego wykonanego w korycie hydraulicznym. Przedstawiony na rys. 7 wykres linii jednakowych ciśnień wskazuje na duża zbieżność z rezultatem badań laboratoryjnych.



Rysunek 7. Wykresy linii jednakowych ciśnień w modelu II
Figure 7. Graphs of the disintegration line of identical pressures in the model II

Model III

Model III posiadał wszystkie elementy modelu II, ale został uzupełniony o ekran uszczelniający (rys. 5). Skarpa odwodna została wyłożona obustronnie gładką geosyntetyczną barierą polimerową GBR-P o grubości 2 mm (rys. 3a). Zabudowanie geomembrany miało na celu uszczelnienie nasypu i zabezpieczenie skarpy odwodnej przed erozją wodną. Piętrzenie wody na stanowisku górnym do założonego poziomu 50 cm trwało 5 godzin. Odczyt poziomu wody w piezometrach wykonywano co 6 minut. Po ustabilizowaniu poziomu odczyty wykonywano co 24 godziny, sprawdzając ewentualne przecieki. Zastosowana geosyntetyczna bariera polimerowa okazała się całkowicie nieprzepuszczalna dla piętrzonej wody. Krzywa depresji nie uformowała się z uwagi na brak filtracji.

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania, wykonane obliczenia oraz analiza wyników pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

1. Mieszanka popioło-żużlowa – z uwagi na swoje parametry geotechniczne – bez odpowiednich zabiegów wzmacniających i uszczelniających nie powinna być wykorzystywana do budowy nasypów hydrotechnicznych.

2. Główne uszkodzenia w modelu I spowodowane były wymywaniem cząsteczek gruntu z podstawy skarpy odpowietrznej przez filtrującą wodę. Skarpa odwodna nie wykazywała znaczących uszkodzeń nawet po szybkim obniżeniu zwierciadła wody górnej.

3. Zabudowanie w podstawie skarpy odpowietrznej drenażu żwirowego (model II) pozwala zapobiec zjawiskom sufozji i upłynniania. Zastosowanie geosyntetyku drenażowego i systemu komórkowego wypełnionego żwirem na skarpie odpowietrznej stabilizuje skarpę oraz zapobiega jej rozmywaniu.

4. Zastosowanie geomembrany GBR-P blokuje przepływ wody przez nasyp (model III), a także zabezpiecza skarpę odwodną przed rozmyciem. Zabudowanie jej w formie ekranu w skarpie odwodnej obwałowania może być zabiegiem doszczelniającym remontowane lub nowo budowane obwałowanie.

Wyniki przeprowadzonych badań modelowych mogą być podstawą do prognozowania przebiegu pracy nasypów popioło-żużlowych współpracujących z geosyntetykami. Stosowane w praktyce wymiary geometryczne przekrojów poprzecznych nasypów, poziom piętrzenia i wartości spadku hydraulicznego są na ogół znacznie bezpieczniejsze niż te przyjęte w badaniach modelowych. Dlatego prezentowane wyniki posiadają duży zapas bezpieczeństwa w stosunku do spodziewanych wartości w obiektach rzeczywistych.

Ważne jest określenie wpływu geosyntetyków wbudowanych w nasyp hydrotechniczny na charakter przepływu filtracyjnego przez te budowle. Temat ten jest aktualny ze względu na wzrastające potrzeby wykonywania obiektów w tej technologii.

Badania procesu filtracji przez modele nasypów wykonanych w skali półtechnicznej prowadzi się sporadycznie ze względu na ich dużą pracochłonność. Wyniki badań modelowych filtracji przez nasypy są najbardziej zbliżone do warunków filtracji przez naturalne obwałowania. Modele dają możliwość wbudowania dodatkowych elementów, takich jak elementy doszczelniające, drenażowe, oraz zainstalowania urządzeń pomiarowych.

BIBLIOGRAFIA

Borys M., Mosiej K. *Wytyczne wykonywania ocen stanu technicznego i bezpieczeństwa wałów przeciwpowodziowych*. Wydaw. IMiUZ, Falenty 2003, 89 ss.

Cholewa M. *Modelowe badania filtracji przez nasypy hydrotechniczne wykonane z gruntów antropogenicznych*. Przegląd Górniczy, nr 11/12, 2008, s. 49–55.

GeoStudio 2007. GEO-SLOPE International, Ltd.

Giroud J. P., Badu-Tweneboah K., Bonaparte R. *Rate of Leakage through a Composite Liner due to Geomembrane Defects.* Geotextiles and Geomembranes, 11, 1, 1992, s. 1–28.

Maro L. *Geosyntetyki do powierzchniowego wzmacniania gruntu*. Wydaw. Lemar, Łódź 2010, 289 ss.

Maślanka K., Pielichowski J. *Geosyntetyki w inżynierii i ochronie środowiska*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne TEZA, Kraków 2006, 141 ss.

PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne — Badania laboratoryjne gruntów —

Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego.
PN-B-02481:1998 Geotechnika — Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
PN-EN ISO 14688-1:2006 Badania geotechniczne — Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów — Część 1: Oznaczanie i opis.
Rembeza L. *Nieustalony przepływ filtracyjny przez wał przeciwpowodziowy z uszczelnieniami*. Gospodarka Wodna, nr 9, 2007, s. 380–382.
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).
Viswanadham B. V. S., König D. *Centrifuge Modeling of Geotextile-Reinforced Slopes Subjected to Differential Settlements*. Geotextiles and Geomembranes, 27, 2, 2009, s. 77–88.
Wesolowski A., Krzywosz Z., Brandyk T. *Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich*. Wydaw. SGGW, Warszawa 2000, 231 ss.
Wu C. S., Hong Y. S., Yan Y. W., Chang B. S. *Soil-Nonwoven Geotextile Filtration Behavior under Contact with Drainage Materials*. Geotextiles and Geomembranes, 24, 1, 2006, s. 1–10.
Zawisza E. *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi*. Wydaw. AR, Kraków 2001, 178 ss.

(Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy.)
(Scientific work financed from the budgetary resources for science in 2010-2012 as a research project.)

Dr inż. Mariusz Cholewa
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy
Al. Mickiewicza 24/28
30-059 Kraków
Tel. 12 6624150
e-mail: mcholewa@ur.krakow.pl