

KAROLINA ŁACH, MICHAŁ GRODECKI\*

ODPADY POWĘGŁOWE JAKO ELEMENT  
USZCZELNIAJĄCY WAŁY PRZECIWPOWODZIOWE  
– BADANIA LABORATORYJNE I SYMULACJE  
KOMPUTEROWE

---

THE COLLIERY SPOILS AS THE TIGHT ELEMENT  
OF FLOOD BANKS – LABORATORY TEST  
AND NUMERICAL SYMULATIONS

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań cech fizycznych i mechanicznych odpadów powęglowych pochodzących z KWK Mysłowice-Wesoła. Badania wykonano zgodnie ze specyfikacjami technicznymi PKN-CEN ISO/TS 17892 1-12 z modyfikacją badania w edometrze, w celu lepszego dopasowania krzywej ściśliwości. Przeprowadzono eksperyment numeryczny symulujący zachowanie się wału przeciwpowodziowego z rdzeniem z odpadów powęglowych. Parametry mechaniczne oraz niska przepuszczalność wykazały predyspozycję odpadów do wykorzystania do budowy elementów szczelnych wałów przeciwpowodziowych.

*Słowa kluczowe: odpady powęglowe, stateczność, wał przeciwpowodziowy, filtracja*

Abstract

The paper presents results of investigation of the physical and mechanical properties of the colliery spoils coming from Mysłowice-Wesoła mine. Investigations were performed according to the technical specifications PKN-CEN ISO/TS 17892 1-12. Oedometer test was modified in the order to obtain the best fit of the compressibility graph. A numerical simulation of the behavior of flood bank with the core from colliery spoils was performed. Mechanical parameters and the low permeability demonstrated the predisposition of waste from mine to use for construction elements of flood banks.

*Keywords: colliery spoils, stability, anti-flood embankment, filtration*

---

\* Dr inż. Karolina Łach, Michał Grodecki, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

### Oznaczenia

$\lambda$	–	nachylenie linii pierwotnej konsolidacji w układzie $e - \ln(p)$ [–]
$\kappa$	–	nachylenie linii wtórnej konsolidacji w układzie $e - \ln(p)$ [–]
$\phi$	–	kąt tarcia wewnętrznego [°]
$\gamma$	–	ciężar objętościowy gruntu [kN/m <sup>3</sup> ]
$c$	–	spójność [kPa]
$k$	–	współczynnik filtracji [m/d]
$M_c$	–	nachylenie linii stanu krytycznego [–]
$p_{c0}$	–	początkowa wartość ciśnienia prekonsolidacji [kPa]
SF	–	współczynnik stateczności [–]
$t$	–	czas [d]

## 1. Charakterystyka badanego gruntu antropogenicznego

Badane grunty antropogeniczne, stanowiące odpad procesu wydobywania węgla, pochodzą z kopalni KWK Mysłowice-Wesoła. Zostały pozyskane z hałd przykopalnianych, nie dysponowano informacją na temat głębokości ich pobrania.

Badania cech fizycznych i mechanicznych obejmowały:

- skład granulometryczny uzyskany z przesiewania oraz areometru,
- wilgotność,
- gęstość objętościową,
- badania wilgotności optymalnej w aparacie Proctora,
- badania w edometrze zarówno modułów ściśliwości, jak i swobodnego pęcznienia, ciśnienia pęcznienia, wodoprzepuszczalności gruntu,
- badania w aparacie bezpośredniego ścinania,
- badania w aparacie trójosiowego ściskania,
- określanie granic płynności i plastyczności.

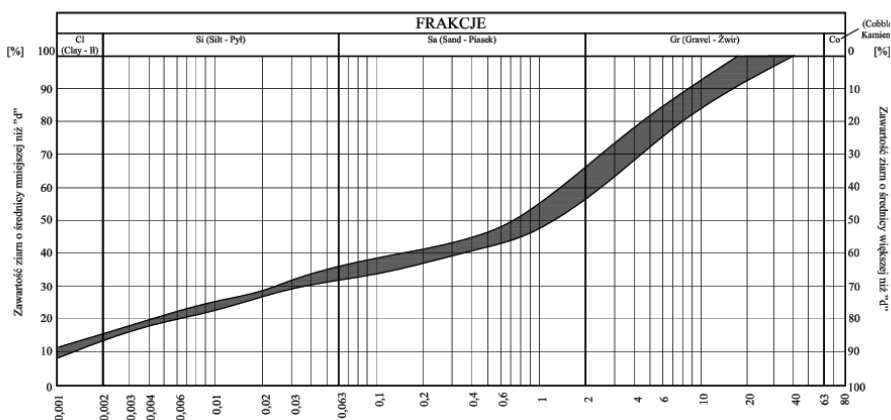
Badania wykonano zgodnie ze specyfikacjami technicznymi PKN-CEN ISO/TS 17892 1–12 na próbkach o wilgotności zbliżonej do optymalnej, chyba że metodyka badań zakładała inaczej. Przygotowane próbki zagęszczano w aparacie Proctora i przycinano do potrzebnych wymiarów. Grunt charakteryzował się obecnością grubszych ziaren co, ze względu na wymiary aparatury, wiązało się z koniecznością odsiania części frakcji.

Badania zagęszczenia przeprowadzono w standardowym aparacie Proctora o średnicy 150 mm i objętości 2,2 dm<sup>3</sup>. Próbki do badań w edometrze, aparacie bezpośredniego ścinania oraz aparacie trójosiowym zostały zmodyfikowane poprzez odsianie grubszych frakcji. Zalecane wymiary edometru powinny spełniać warunek [7]:

$$D \geq 2 \cdot H \geq 5 \cdot d_{90} \quad (1)$$

Odsianie frakcji przez sito o oczku 8 mm, co stanowi maksymalnie 20% gruntu, pozwala na spełnienie powyższego warunku. Odsianie ziarn grubszych niż  $d_{70}$  nie wpływa, w istotny sposób, na porowatość zagęszczanego materiału [7].

Według nomenklatury geotechnicznej, po przeprowadzeniu analizy sitowej i areometrycznej stwierdzono, że badany grunt odpowiada żwirowi ilastemu z domieszką piasku *clGr*; *sacIGr* lub iłowi ze żwirem i piaskiem *sagrCl*. W odpadach dominuje frakcja żwirowa, zawartość frakcji pylastej wynosi około 20%, a ilastej jest mniejsza niż 15% (rys. 1). Grunt, ze względu na uziarnienie, jest przydatny na uszczelnienia mineralne [1].



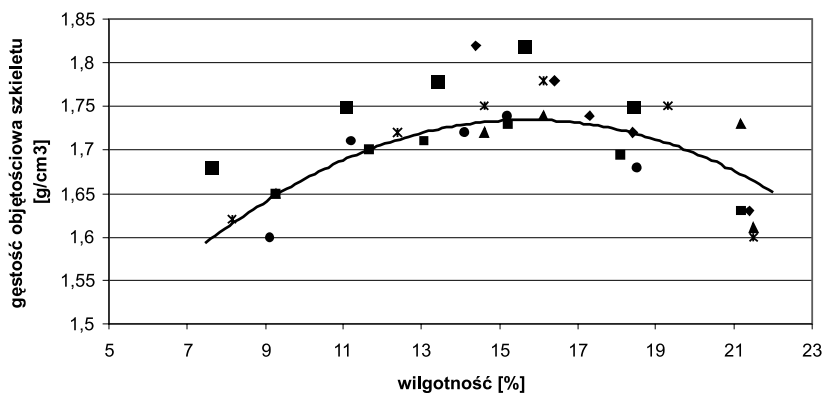
Rys. 1. Uziarnienie materiału odpadowego

Fig. 1. Grain size distribution for waste

Nie wykonywano badań gęstości właściwej. Wartość dla odpadów kopalnianych przyjęto na podstawie prac [8, 9] w wysokości  $2,40 \text{ g/cm}^3$ . Średnia wartość wilgotności optymalnej wynosiła 15,75%, a odpowiadająca jej największa gęstość objętościowa szkieletu  $1,73 \text{ g/cm}^3$  (rys. 2). Średnia wartość granicy plastyczności wynosiła  $w_p = 22,8\%$ , a płynności 29,75%. Granica płynności została zbadana w aparacie Casagrande'a oraz za pomocą penetrometru stożkowego.

Próbę oznaczenia współczynnika wodoprzepuszczalności wykonano przy zmiennym gradiencie hydraulicznym. Badanie zostało przeprowadzone w edometrze. Materiał do badań został przygotowany w ten sposób, by – pomimo odsiania grubych okruszków – decydująca o właściwościach filtracyjnych średnica  $d_{10}$  [8] nie uległa zmianie. Wykonano 10 pomiarów dla wilgotności zbliżonej do optymalnej i wskaźniku zagęszczenia 0,9–0,95. Średnia wartość współczynnika filtracji wynosiła  $4,16 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$ .

W edometrze przeprowadzono uzupełniające badania pęcznienia i ciśnienia pęcznienia – obecność frakcji ilastej wskazywała na możliwość wystąpienia przyrostu objętości pod wpływem zawilgocenia. Badany grunt wykazywał średni wskaźnik pęcznienia  $V_p = 3,2\%$  przy pęcznieniu swobodnym i ciśnienie pęcznienia nieprzekraczające 0,5 MPa. Cechy te oraz wartość granicy płynności i plastyczności, na podstawie klasyfikacji zaproponowanej przez Niedzielskiego (za Pisarczykiem) [1], wskazały, że badany grunt charakteryzuje się niskim stopniem ekspansywności.



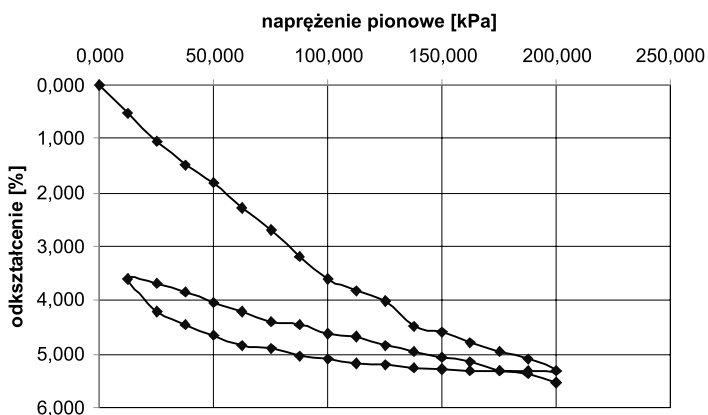
Rys. 2. Uśredniony wykres do wyznaczenia wilgotności optymalnej

Fig. 2. Averaged graf of maximum dry density and optimum moisture

W celu określenia modułów odkształcenia wykonano 10 badań, w tym 7 standardowych oraz 3 zmodyfikowane. Modyfikacja ta służyła dokładniejszemu dopasowaniu krzywej ścisłości oraz określeniu naprężenia prekonsolidacyjnego i polegała na zmianie stopni przykładania obciążenia. Przy normalnej procedurze każdy kolejny nacisk jest 2 razy większy od poprzedniego (współczynnik przyrostu wynosi 1). W zmodyfikowanej procedurze kolejny nacisk był o 12,5 kPa większy od poprzedniego (współczynnik przyrostu był zmienny).

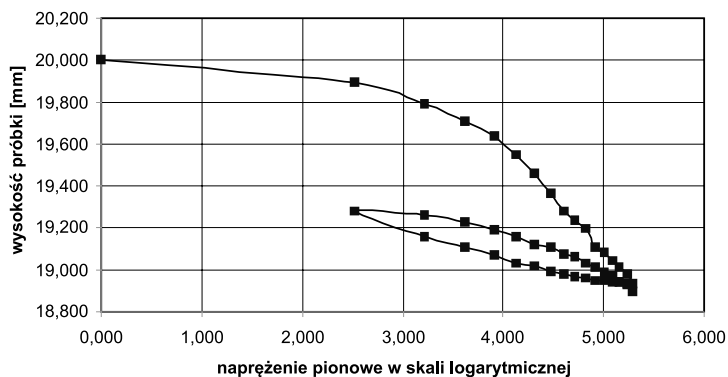
Wartości modułów ścisłości były niewielkie i dla zakresu obciążeń 100–200 kPa wynosiły kilka MPa dla pierwotnych oraz maksymalnie kilkanaście MPa dla wtórnych.

Przykładowe krzywe zależności naprężenia efektywnego (w skali liniowej) od odkształcenia oraz przemieszczenia od naprężenia efektywnego (w skali logarytmicznej) dla metody zmodyfikowanej przedstawiono na rys. 3, 4.



Rys. 3. Przykładowa zależność naprężenia efektywnego od odkształcenia

Fig. 3. Example plot of stress-strain rate behaviour of oedemeter test



Rys. 4. Przykładowa krzywa ściśliwości – naprężenie efektywne w funkcji wysokości próbki

Fig. 4. Example plot for the relationship between vertical stress and settlement

Wytrzymałość na ścinanie badano w aparacie bezpośredniego ścinania oraz trójosiowego ściskania (dla dwóch próbek). Wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego uzyskane z badań w aparacie AB oraz trójosiowego ściskania są podobne, natomiast wartość kohezji wyraźnie jest różna, znacznie większa z aparatu AB (tab. 1). W prezentowanych w dalszej części pracy symulacjach numerycznych przyjęto średnią wartość efektywnego kąta tarcia wewnętrznego z obu aparatów  $28^\circ$  oraz (by pozostać po stronie bezpiecznej) średnią wartość kohezji efektywnej 9,5 kPa z badań trójosiowych.

Tabela 1

#### Wyniki badań parametrów mechanicznych

nr próbki	kohezja [kPa]	kąt tarcia wew. [°]
1 – AB	19,8	32,2
2 – AB	21,8	28,8
3 – AB	28,2	24,5
4 – AB	15,4	26,8
5 – AB	26,5	30,9
6 – AB	27,2	33,0
7 – AB	21,4	27,5
8 – AT	6,0	23,1
9 – AT	13,0	26,0

## 2. Eksperyment numeryczny – symulacja badań edometrycznych

Wykonano eksperyment numeryczny polegający na symulacji badań edometrycznych w celu określenia parametrów modelu Modified Cam Clay. Parametry modelu dobrano tak, by uzyskać jak najlepszą zgodność uzyskiwanych numerycznie i doświadczalnie zależności wskaźnika porowatości i odkształcenia pionowego od obciążenia (analiza wsteczna).

Obliczenia wykonano za pomocą systemu MES Z\_Soil.PC (dokładną charakterystykę można znaleźć w pracach [1, 6]) z wykorzystaniem modelu sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra. Przyjęto niestowarzyszone prawo plastycznego płynięcia ( $\psi = 0$ ). Wszystkie obliczenia wykonano przy założeniu osiowej symetrii.

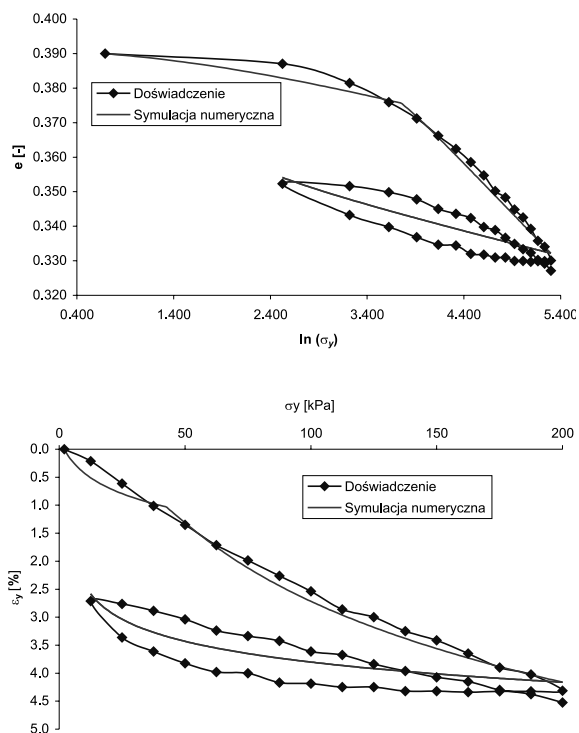
Uzyskane rezultaty wskazują iż model Modified Cam Clay dobrze odzwierciedla zachowanie się badanego gruntu w czasie obciążania. Znacznie gorzej opisuje proces odciążania (nie opisuje widocznej w wynikach badań edometrycznych histerezy).

Najlepszą zgodność wyników symulacji numerycznych i badań doświadczalnych (rys. 5) uzyskano przy wartościach parametrów modelu Modified Cam Clay zestawionych w tabeli 2.

Tabela 2

**Parametry modelu Modified Cam Clay uzyskane metodą analizy wstecznej testów edometrycznych**

$M_c$ [-]	$\nu$ [-]	$\lambda$ [-]	$\kappa$ [-]	$p_{co}$ [kPa]
1,29	0,4	0,029	0,007	35

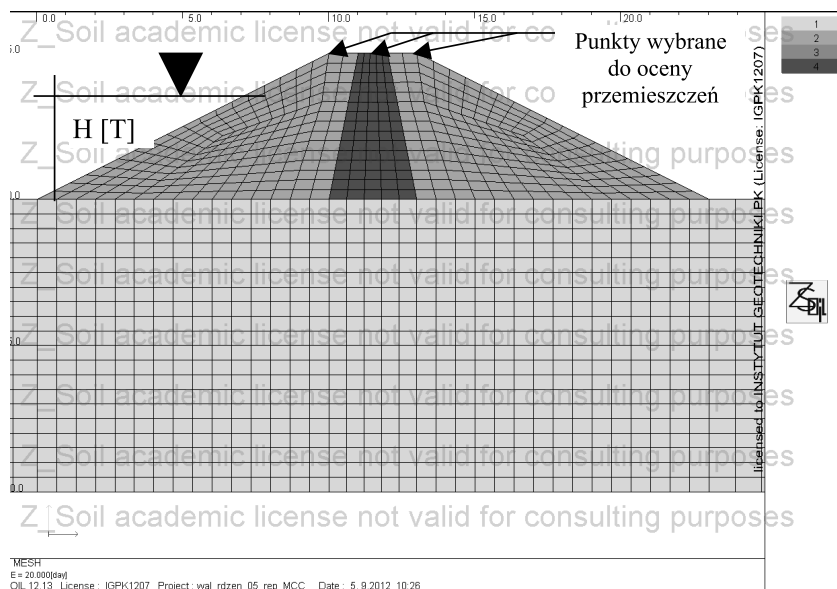


Rys. 5. Wyniki testów edometrycznych i ich symulacji numerycznych – zależność pomiędzy wskaźnikiem porowatości  $e$  i odkształceniem pionowym  $\epsilon_y$ , a naprężeniem pionowym  $\sigma_y$

Fig. 5. Results of the oedometric tests and their numerical simulations – relationship between void ratio  $e$ , vertical strain  $\epsilon_y$  and vertical stress  $\sigma_y$

### 3. Eksperyment numeryczny – symulacja zachowania się wału przeciwpowodziowego z rdzeniem z odpadów powęglowych

Analizowano wał o wysokości 5 m, szerokości korony 3 m i nachyleniu skarp 1:2, o korpusie zbudowanym z piasku średniego o  $I_D = 0,50$  ( $k = 5$  m/d) i podłożu z gliny o  $I_L = 0,20$  ( $k = 0,01$  m/d), wyposażony w rdzeń z odpadów powęglowych ( $k = 0,0004$  m/d) (rys. 6).



Rys. 6. Model numeryczny wału

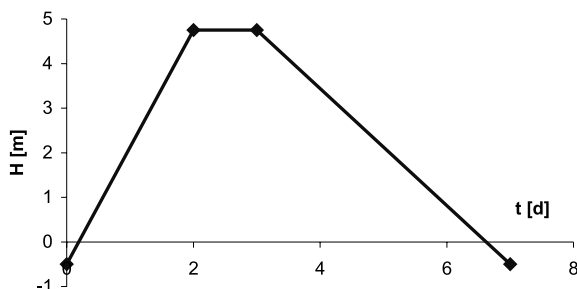
Fig. 6. Numerical model of the embankment

Symulacje wykonano z wykorzystaniem modelu sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra (dla podłoża i nasypu statycznego). Dla rdzenia zastosowano modele Coulomba-Mohra i Modified Cam Clay w celu porównania uzyskanych wyników. Współczynniki stateczności określono metodą proporcjonalnej redukcji parametrów wytrzymałościowych ( $c$ - $\phi$  redukcji), omawianą wyczerpująco w pracy [3]. Obliczenia wykonano przy założeniu płaskiego stanu odkształceń, stosując model filtracji nieustalanej z opisem strefy niepełnego nasycenia wg van Genuchtena [5]. W celu porównania symulowano też zachowanie się wału bez rdzenia. Wykorzystano parametry modelu Modified Cam Clay określone na podstawie opisaną uprzednio analizy wstecznej testów edometrycznych.

Wykorzystane wartości parametrów modelu Coulomba-Mohra zawarto w tab. 3. Dokładny opis zastosowanego podejścia obliczeniowego (w tym przyjętych warunków brzegowych) podano w pracy [4].

Parametry modelu Coulomba-Mohra wykorzystane w symulacji numerycznej

Grunt	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	E [MPa]	c [kPa]	$\phi$ [°]
Korpus wału $P_s$ o $I_D = 0,50$	17,0	0,3	80	0	33
Podłoże $G$ o $I_L = 0,20$	21,5	0,3	20	17	15
Rdzeń wału odpad powęglowy	18,2	0,4	1,5	9,5	28



Rys. 7. Wykorzystany hydrogram fali powodziowej

Fig. 7. Used hydrograph of the flood wave

Symulacja zachowania się wału bez rdzenia wykazała, że nie jest on szczelny (maksymalne wycieki wynoszą  $2,75 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ), a jego stateczność jest zagrożona ( $\text{SF} = 1,0$  w czasie  $t = 4 \text{ d}$ ). Zagrożenie stateczności jest skutkiem wysokiego położenia krzywej filtracji, widocznego na rys. 8.

Zastosowanie rdzenia powoduje zanik wycieków oraz podnosi minimalny współczynnik stateczności do wartości  $\text{SF} = 1,40$

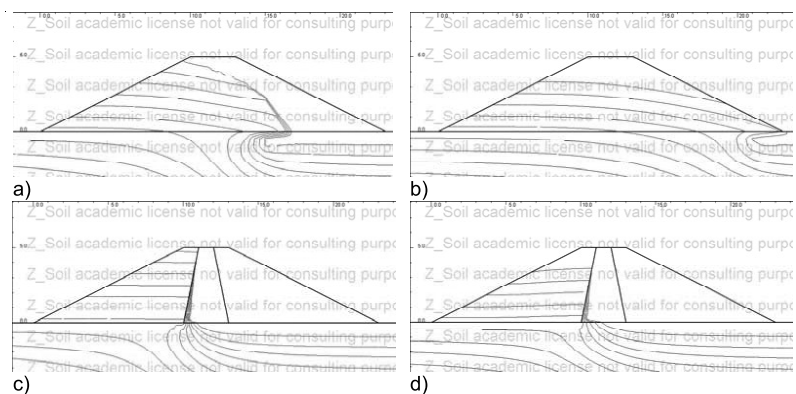
Tabela 4

Uzyskane wartości współczynnika stateczności SF

t [d]	Bez rdzenia	Z rdzeniem
3	1,52	1,63
4	1,00	1,46
5	1,25	1,41
6	1,26	1,40

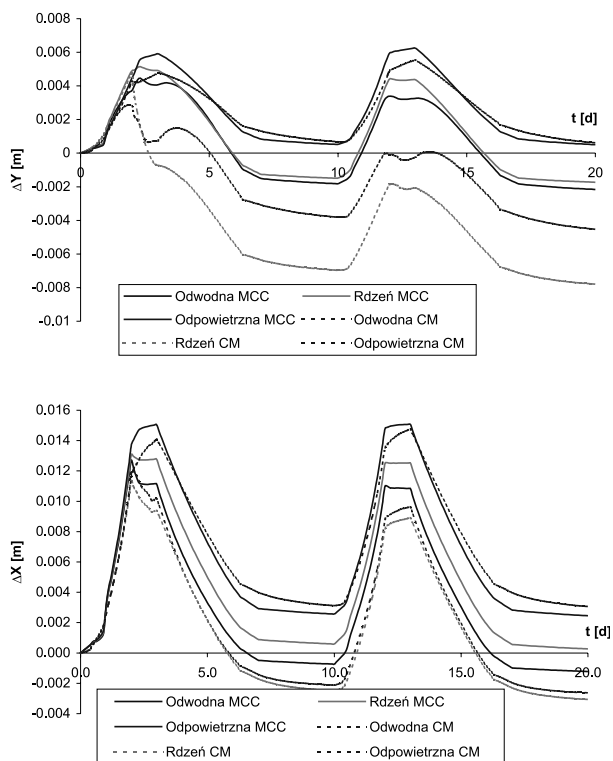
W celu oceny wielkości przemieszczeń korpusu wału z rdzeniem szczelnym wykorzystano falę wielokrotną, złożoną z dwóch fal przedstawionych na rys. 7 w odstępnie 3 dni. Analizie poddano przemieszczenia punktów zlokalizowanych na koronie wału – w jego osi (będącej też osią rdzenia), po stronie odpowietrznej i odwodnej (rys. 6). Uzyskane wykresy przemieszczeń pionowych i poziomych w czasie wezbrania zilustrowano na rys. 9.





Rys. 8. Charakterystyczne rozkłady ciśnień filtracyjnych: a) wał bez rdzenia,  $t = 3$  d, b) wał bez rdzenia  $t = 4$  d, c) wał z rdzeniem,  $t = 3$  d, d) wał z rdzeniem,  $t = 4$  d

Fig. 8. Characteristic pore pressure distributions: a) without core,  $t=3$  d, b) without core,  $t=4$  d, c) with core,  $t = 3$  d, d) with core,  $t = 4$  d



Rys. 9. Przesunięcia pionowe i poziome wybranych punktów korony wału w trakcie przejścia fali powodziowej

Fig. 9. Vertical and horizontal displacements of the crest of the embankment during the flood

Zastosowanie modelu Modified Cam Clay prowadzi do uzyskania mniejszych wartości osiadań korony wału (co jest najbardziej widoczne w przypadku punktu położonego w osi wału) przy nieco większych (w stosunku do modelu Coulomba-Mohra) przemieszczeniach poziomych. Zwracają uwagę występujące przemieszczenia trwałe (plastyczne) – po przejściu fali powodziowej one nie zanikają.

#### 4. Wnioski

Analizowany materiał nadaje się do budowy rdzeni wałów przeciwpowodziowych ze względu na szczelność i wysokie parametry wytrzymałościowe. Z powodu dużej odkształcalności ma ograniczoną przydatność do budowy nasypów statycznych – komunikacyjnych i hydrotechnicznych. Do oceny wartości przemieszczeń pionowych (zwłaszcza trwałych) obiektów wykonanych z opisywanego materiału zasadne jest stosowanie modelu Modified Cam Clay.

#### Literatura

- [1] Pisarczyk S., *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [2] Podleś K., Truty A., Urbański A., *Analiza zagadnień geotechnicznych w systemie Z\_SOIL*, X Jubileuszowa Konferencja Naukowa, Metody Numeryczne do Projektowania i Analizy Konstrukcji Hydrotechnicznych, Korbielów 1998, 100-108.
- [3] Truty A., Urbański A., Grodecki M., Podleś K., *Komputerowe modele zagadnień osuwiskowych oraz ich zabezpieczeń*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej w Krakowie nr 88 (zeszyt 144), 2009.
- [4] Urbański A., Truty A., Grodecki M., *Modelowanie numeryczne nieustalanej filtracji i stateczności wałów przeciwpowodziowych*, Materiały Pokonferencyjne IX Konferencji Technicznej Kontroli Zapór Ryto 29-31.05.2001, IMGW 2001.
- [5] Van Genuchten M.Th., *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, American Society of Soil Sciences, 1980.
- [6] *Z\_Soil.PC, Theoretical Manual*, ZACE Services Ltd., Lozanna 1998.
- [7] Wiłun Z., *Zarys geotechniki*, WKŁ, Warszawa 1985.
- [8] Zapał A., *Analiza możliwości wykorzystania odpadów kopalnianych z uwzględnieniem ich wpływu na środowisko naturalne*, rozprawa doktorska, Kraków 2000.
- [9] Zawisza E., *Geotechniczne i środowiskowe aspekty uszczelniania grubookruchowych odpadów powęglowych popiołami lotnymi*, Zeszyty Naukowe AR, zeszyt 280, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Kraków 2001.