

**Zeszyty Naukowe**Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 101, s. 347–360

Elżbieta PILECKA*, Justyna MORMAN**

Wykorzystanie drobnoziarnistych odpadów wydobywczych wzmocnionych cementem do modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych drobnoziarnistych odpadów wydobywczych wzmocnionych cementem. Badania wykonano w celu sprawdzenia ich przydatności do modernizacji istniejących obwałowań przeciwpowodziowych rzeki Wisły na km 87+600 – 103+000.

Zaproponowano modernizację wału przez podwyższenie, za pomocą mieszanki odpadów wydobywczych i cementu portlandzkiego. Dla zaproponowanej konstrukcji przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych współczynnika stateczności w programie MIDAS GTS NX dla podstawowego układu obciążeń oraz wyjątkowego układu obciążeń. Modelowano również sposób przepływu wody w korpusie wału podczas fali wezbraniowej o prawdopodobieństwie wystąpienia 0,1%.

Do badań wykorzystano odpad wydobywczy o uziarnieniu od 0 do 2,0 mm z Zakładu Górniczego Sobieski we wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Odpad ten powstaje w wyniku przeróbki węgla. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Laboratorium Katedry Współdziałania Budowli z Podłożem Politechniki Krakowskiej. Wyznaczono właściwości fizyczne i mechaniczne odpadów pobranych z hałdy oraz tych samych odpadów wzmocnionych spoiwem cementowym. Wzmocnienie odpadów wydobywczych zastosowanych w modernizacji wału przeciwpowodziowego miało na celu zmniejszenie degradacji materiału pod wpływem warunków atmosferycznych oraz czynników mechanicznych.

Słowa kluczowe: odpady wydobywcze, wzmocnienie odpadów wydobywczych, obwałowanie przeciwpowodziowe

Utilization of fine-grained mining waste strengthened cement for the modernization of flood embankments

Abstract: The article presents the results of laboratory tests fine-grained mining waste strengthened cement. The tests were carried out to check their suitability for modernization of the existing flood embankments of the Vistula River at km 87 + 600 - 103 + 000.

* Dr hab. inż., Prof. PK,** Mgr inż., Politechnik Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków; e-mail: epilecka@pk.edu.pl, jmorman@pk.edu.pl

Upgrading the flood embankment was proposed by increasing the body, using a mixture of mining waste with cement. The proposed construction presents the results of the numerical stability factor in the MIDAS GTS NX for the basic load system and the unique load system. The water flow in the shaft body during the flood wave has been shown to have a probability of 0.1%.

The research was carried out with mining waste grain size from 0 to 2.0 mm from the Sobieski Mining Plant in the central part of the Upper Silesian Coal Basin. This waste is produced by rinsing and purifying minerals. The paper presents the results of laboratory tests carried out in the Laboratory of Department of Building Cooperation with Grounds of Cracow University of Technology. The paper presents physical and mechanical properties of waste and cement stabilized waste. Reinforcement of mining waste from coal mines is aimed at reducing material degradation under the influence of weather conditions and mechanical processing. It is also important to limit the elimination of fine material from the shaft body.

Keywords: strengthening of extractive waste, flood embankments, mining waste

Wprowadzenie

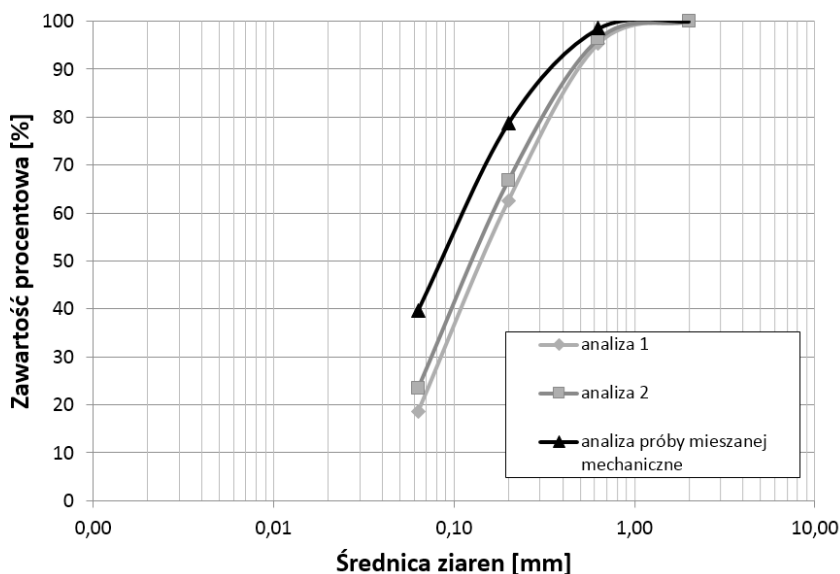
Obwałowania przeciwpowodziowe w Polsce na licznych odcinkach wciąż charakteryzują się dużymi niedoborami przewyższenia korony korpusu wału ponad obliczony poziom przepływu wody miarodajnej i kontrolnej (Rozporządzenie Ministra Środowiska z 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2007, nr 86, poz. 579)). Od wielu lat w celu podniesienia korony obwałowań przeciwpowodziowych stosowane są odpady wydobywcze (Pilecka i Morman 2016). Rozmiar uziarnienia odpadów zależy od technologii, jaką stosują zakłady przerobcze w kopalniach. Najczęściej są to odpady o uziarnieniu od 0–200,0 mm, 0–125,0 mm, 0–31,5 mm, 0–2,0 mm oraz tzw. muły węglowe. Przeważnie do budowy wałów używane są odpady o grubym uziarnieniu, które ze względu na dużą zawartość materiałów ilastych pod wpływem zagęszczania mechanicznego oraz warunków atmosferycznych zmniejszają swój stopień uziarnienia i pod względem geotechnicznym stają się z czasem materiałem mało spoistym. Lasowanie się materiału w czasie może powodować zmianę geometrii wału, co spowoduje powtórny problem niedoboru przewyższenia korony wału ponad prognozowane przepływy.

Celem prezentowanych badań była ocena możliwości zastosowania odpadów wydobywczych wzmocnionych cementem portlandzkim do modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych. Do badań wykorzystano odpad wydobywczy z Zakładu Górniczego Sobieski o uziarnieniu do 2,0 mm. Modernizacja miałaby polegać na podwyższeniu korony wału stabilizowanymi odpadami wydobywczymi. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych właściwości fizycznych i mechanicznych odpadów wydobywczych oraz ich mieszanki z cementem. Jednym ze sposobów weryfikacji użytych materiałów do budowy wału przeciwpowodziowego jest modelowanie numeryczne (Stanisz i in. 2017). Stateczność zmodernizowanego obwałowania sprawdzono za pomocą obliczeń numerycznych w programie Midas GTS NX.

1. Charakterystyka odpadów wydobywczych o uziarnieniu do 2,0 mm

Odpady wydobywcze o uziarnieniu do 2,0 mm w Zakładzie Górniczym Sobieski zawierają głównie iłowce oraz okruchy iłowcowo-węglowe, zawartość węgla przekracza 10%, osiągając w granicznych przypadkach nawet 20%. Odpad zawiera do 5% siarki (Tauron–Wydobywanie SA 2011).

Pod względem składu granulometrycznego badana próba odpadów wydobywczych zawiera ziarna o udziale procentowym od około 18–23% frakcji pylastej i ilastej oraz około 77–82% frakcji piaskowej. Z krzywej uziarnienia wynika, że odpad jest równoziarnisty ($U = 4,75$), a więc jest to grunt, który pod względem uziarnienia nadaje się do stabilizowania spoiwem cementowym (PN-S-96012.1977). Na rysunku 1 zaprezentowano dwie krzywe uziarnienia dla prób odpadów wydobywczych o uziarnieniu do 2,0 mm z ZG Sobieski pobranych z hałdy oraz jedną krzywą uziarnienia próby tego samego odpadu pobranego z hałdy i podanej procesowi suszenia oraz mieszania w mieszadło mechanicznym. Zawartość procentowa frakcji mniejszych od średnicy 0,063 mm wzrosła w próbce mieszanej do 43% – świadczy to o małej odporności materiału na wietrzenie.



Rys. 1. Krzywe granulometryczne prób odpadów wydobywczych o uziarnieniu do 2,0 mm

Fig. 1. Granulometric curves for mining waste of grain size up to 2.0 mm

Problemem występującym w trakcie wykorzystania badanego materiału do budowy obwałowań przeciwpowodziowych jest ilość wymywanych cząstek drobnych z materiału. Podczas badań przepływu wody w edometrze, dla ciśnienia zmiennego przy zmianach naporu wody od $H_1 = \max. 90$ cm do $H_2 = \min. 10$ cm (PKN-CEN ISOTS 17892-11), przez próbę zagęszczoną do wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93$, zaobserwowano wpływ mętnej

wody. Podczas pionowego przepływu 1000 ml wody z próby zostało wymyte około 0,5% cząstek w stosunku do masy szkieletu gruntowego badanej próby. W materiale zachodzi zjawisko sufozji, które jest szczególnie niekorzystne w gruntach zastosowanych do budowy korpusu wału. Sufozja zachodzi zarówno w korpusie, jak i w podłożu wału, doprowadzając stopniowo do wymywania drobnych cząstek gruntu, jego rozluźniania, a w konsekwencji do osiadań. Może to doprowadzić do skoncentrowania dróg filtracji, powodujących tzw. przebicie hydrauliczne.

W celu zmniejszenia sufozji oraz rozdrabiania się materiału eksperymentalnie przeprowadzono badania właściwości fizycznych i mechanicznych odpadu wydobywczego z domieszką cementu portlandzkiego.

W badaniach użyto spoiwa cementowego typu portlandzkiego CEM I 42,5 R. Jest to cement o składzie 95–100% klinkieru oraz domieszki gipsu około 0–5%. Według producenta wczesna wytrzymałość na ściskanie (po 2 dobach) wynosi $\geq 20,0$ MPa i normowa (po 28 dobach) $\geq 42,5$ MPa. Badania przeprowadzono dla próby odpadów wydobywczych oraz dla odpadów z dodatkiem spoiwa cementowego w ilości 8% w stosunku do suchej masy próby i przy wilgotności w granicach (0,7–1,15) wilgotności optymalnej w_{opt} .

Badanie filtracji wody w edometrze dla próby z dodatkiem cementu wykazały, że przepływająca przez próbę woda była klarowna. Początkowy współczynnik filtracji dla próby bez dodatku cementu wyniósł $4,3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Dla próby odpadów z dodatkiem cementu współczynnik filtracji zmniejszył się o dwa rzędy wielkości i wyniósł średnio $3,1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

O zmniejszonej ilości wymywania drobnych części z materiału świadczą również wyniki badania odczynu pH odcieków z odpadów wydobywczych bez i z dodatkiem cementu (tab. 1).

TABELA 1. Odczyn pH odpadów wydobywczych i odcieków wodnych

TABLE 1. The pH of mining waste and effluents water

Rodzaj materiału	Średni odczyn pH	Temperatura [°C]
Odpad wydobywczy	6,87	22,4
Odciek wody z odpadów wydobywczych	7,47	22,3
Próba odpadu wydobywczego z cementem	12,43	22,8
Odciek wody z próby odpadu wydobywczego z cementem	7,12	22,5

Dla badanego materiału wykonano również badanie wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wg PN B-04481:1988 metoda I. Natomiast dla próby z dodatkiem cementu u celu określenia parametrów zagęszczalności zastosowano metodę podaną przez Pisarczyka (2015). Maksymalna wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego odpadu wydobywczego wynosi $1,87 \text{ g/cm}^3$ przy wilgotności 13,3%. Wilgotność optymalna próby z cementem została obliczona i wynosi 12,31% (wzór 1). Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu odpadu z cementem to $\rho_d^{cm} = 1,88 \text{ g/cm}^3$ (wzór 2), gdzie gęstość objętościowa mieszanki określona przy jednokrotnym ubiciu próbki według

normalnej metody Proctora ρ^{cg} wynosi $2,14 \text{ g/cm}^3$. Dla porównania piaski średnie stabilizowane cementem (8% w stosunku do masy suchej) wykazują wilgotność optymalną na poziomie 10,5% i maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego $\rho_d = 1,87 \text{ g/cm}^3$ (Pisarczyk 2105).

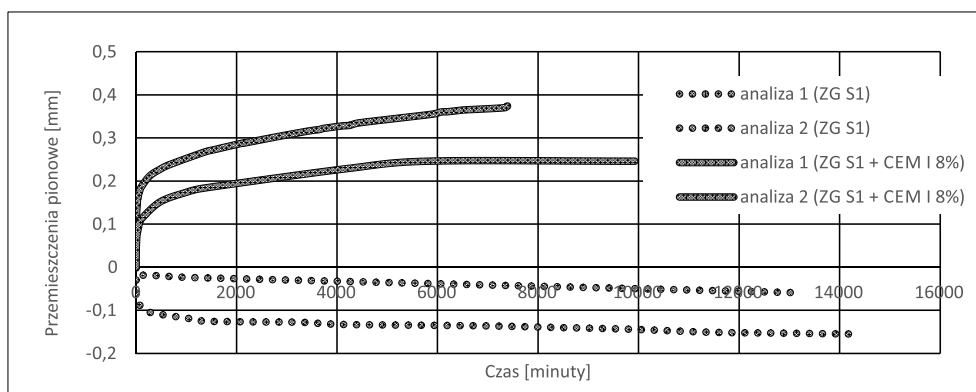
$$w_{opt}^{cg} = \frac{100w_{opt}}{100+c} \quad (1)$$

$$\rho_{ds}^{cg} = \frac{100\rho^{cg}}{100+w_{opt}} \quad (2)$$

gdzie:

- w_{opt}^{cg} – wilgotność optymalna próby z dodatkiem cementu [%],
- w_{opt} – wilgotność optymalna gruntu stabilizowanego [%],
- c – dodatek cementu do gruntu (procent wagowy) [%],
- ρ_{ds}^{cg} – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu mieszanki cementowo-gruntowej [g/cm^3],
- ρ^{cg} – gęstość objętościowa mieszanki określona przy jednokrotnym ubiciu próbki wg normalnej metody Proctora (metoda I wg PN B-04481:1988) i przy wilgotności optymalnej gruntu [g/cm^3].

Przedmiotowe odpady wydobywcze poddano również badaniom wskaźnika pęcznienia zgodnie z metodą według PKN-CEN ISOTS 17892-5. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany wysokości próbki zanurzonej w wodzie. Zaobserwowano, że dla prób odpadów wydobywczych zagęszczonych do wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93$ po wypełnieniu porów wodą maleje wysokość próbki, natomiast próby z dodatkiem cementu, po 30 dobach wiązania wykazują pęcznienie.



Rys. 2. Wykres zmiany wysokości próbki zanurzonej w wodzie

Fig. 2. Diagram of height change sample submerged in water

Wyniki badań jednoosiowego ściskania w edometrze według PKN-CEN ISOTS 17892-5 dla odpadów wydobywczych oraz dla próby odpadów związanych cementem po 30 dniach wiązania zostały przedstawione w tabeli 2. W obu przypadkach próby przed badaniem zostały zagęszczone do wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93$ przy wilgotności optymalnej danego materiału. W tabeli 2 przedstawiono wartości uśrednione z dwukrotnie powtórzonego badania. Stwierdzono, że dodatek 8% cementu w stosunku do masy szkieletu odpadu wydobywczego spowodował prawie dwukrotny wzrost pierwotnego i wtórnego modułu ścisłości.

TABELA 2. Moduły ścisłości pierwotnej i wtórnej oraz wskaźnika ścisłości odpadów wydobywczych i odpadów z cementem

TABLE 2. The primary and secondary compressibility modulus and compression index mining waste and mining waste stabilized cement

Material / Parametry	Pierwotny moduł ścisłości M_o [MPa]	Wtórny moduł ścisłości M [MPa]	Wskaźnik ścisłości C_c [-]
Odpad wydobywczy	11,6	22,9	0,005
Odpad wydobywczy z cementem	21,9	54,7	0,003

2. Propozycja modernizacji obwałowania przeciwpowodziowego

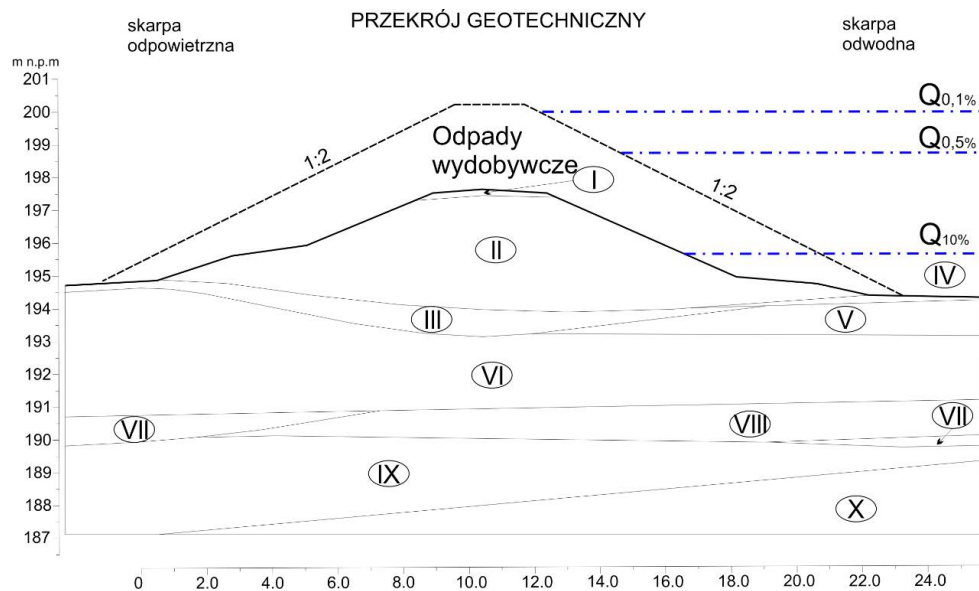
Propozycja modernizacji obwałowania została wykonana dla przekroju poprzecznego lewego wału Wisły zlokalizowanego w Krakowie, na osiedlu Chałupki w km 94+952 (rys. 4), na którym niedobór przewyższenia korony wału wynosi 2,5 m.

Korpus wału w tym przekroju zbudowany jest z gruntów nasypowych. Pierwszą warstwę korpusu wału stanowią średnio zagęszczone ($I_D = 0,46$) nasypowe piaski drobne z domieszkami humusu. Drugą warstwę budującą korpus wału stanowią spoiście grunty nasypowe takie jak pyły, gliny pylaste, o stopniu plastyczności $I_L = 0,00$.

W podłożu wału od strony odwodnej znajdują się luźne grunty rodzime w postaci piasków drobnych i pylastych z domieszkami i przewarstwieniami (warstwa IV), o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,28$ oraz głębiej leżące gliny pylaste w stanie półwartym o $I_L = 0,00$ (warstwa V). Po stronie skarpy odpowietrznej pierwszą warstwę podłoża stanowią utwory rodzime, średnio zagęszczone piaski pylaste z domieszką piasków gliniastych i przewarstwieniami gruntów próchnicznych, o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,55$ (warstwa III). Głębsze warstwy podłoża wału tworzą grunty rodzime wykształcone w postaci pyłu w stanie twaroplastycznym o $I_L = 0,14$ (warstwa VI). Warstwa VII to piaski średnie z domieszkami i przewarstwieniami żwiru, o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,59$. Warstwa VIII z kolei to zagęszczone piaski drobne – $I_D = 0,73$. Warstwa IX to również zagęszczone piaski średnie o $I_D = 0,72$. Natomiast warstwa X to zagęszczone grunty rodzime wykształcone w postaci pospółek o $I_D = 0,70$ (Geopartner sp. z o.o. 2012).

Jako rozwiązanie nadbudowy wału zaproponowano wykorzystanie odpadów wydobywczych stabilizowanych cementem (rys. 3). Ma to na celu wzmocnienie wału oraz spełnienie

wymogów przewyższenia korony wału ponad prognozowaną rzędną przepływu wody kontrolnej o prawdopodobieństwie wystąpienia 0,1%. Parametry fizyczne i mechaniczne proponowanego materiału zostały opisane w rozdziale 2 i w tabeli 3.



Rys. 3. Przekrój geotechniczny lewego wału Wisły wraz z prognozą poziomu przepływu wody kontrolnej i miarowej oraz propozycją podwyższenia wału, warstwą odpadów wydobywczych

Fig. 3. The geotechnical profile of the left Vistula embankment together with a forecast of the level of flow of control and measurement water and the proposal for raising the body of the shaft with layer of mining waste

3. Wyniki obliczeń numerycznych oraz ich analiza

Obliczenia zostały wykonane metodą elementów skończonych MES (ang. *Finite Element Method*) w programie Midas GTS NX. Model płaski jest zbudowany z blisko 70 tys. węzłów i 23 tys. elementów (rys. 4). Wymiar siatki korpusu wału i przypowierzchniowych warstw podłoża do głębokości 4 m p.p.t. wynosi 10×10 cm, a w głębszych warstwach podłoża wału 50×50 cm. Do obliczeń przyjęto model Coulomba-Mohra dla warstw o parametrach zamieszczonych w tabeli 3.

Obliczenia wykonano w celu sprawdzenia współczynnika stateczności korpusu wału dla podstawowego układu obciążeń, a więc obciążenia warstwami nasypowymi podłoża wału. Wskaźnik stateczności obliczono również dla wyjątkowego układu obciążeń, czyli podczas dodatkowego obciążenia w postaci maksymalnego piętrzenia wody na skarpcie odwodnej. Wskaźnik stateczności w programie Midas GTS NX wyznaczony jest metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie (SRM). Metoda polega na osłabieniu w kolejnych

TABELA 3. Parametry warstw geotechnicznych (Geopartner sp. z o.o. 2012)

TABLE 3. The parameters of geotechnical layers

Numer warstwy	Symbol	Stan gruntu	Wilgotność [%]	Gęstość objętościowa ρ [g/cm ³]	Kohezja c_u [kPa]	Kąt tarcia wewnętrzznego φ_{it} [°]	Moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 [MPa]	Współczynnik filtracji k [m/s]*
I	$P_d + H$	szg	s/mw	1,65	–	30,2	57,4	10^{-5}
II	G	pzw	mw/s	2,15	30	18	48,3	10^{-7}
III	P_d	szg	mw	1,65	–	30,7	67,9	10^{-5}
IV	P_π	ln	mw	1,6	–	29,3	40,9	10^{-6}
V	G_p	pzw	mw	2,1	30	18	48,3	10^{-6}
VI	π	tpl	w	2,0	19,8	15,8	33,8	10^{-6}
VII	P_s	szg	w	1,85	–	33,6	110,4	10^{-4}
VIII	P_d	zg	w	2,0	–	31,5	93,4	10^{-5}
IX	P_z	zg	w	1,8	–	34,4	136,4	10^{-3}
X	P_o	zg	w	2,1	–	39,9	196,1	10^{-3}
Warstwa odpadów**	P_g	zw	w	1,8	20	31	11,6	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Warstwa odpadów + cement**	$P_g + cm$	zw	mw	1,9	22	34,1	21,9	$3,1 \cdot 10^{-6}$

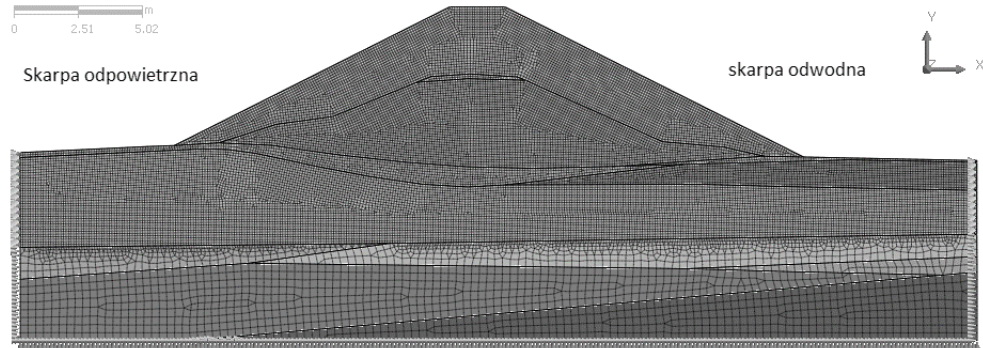
* Parametry wg Wiłun 2010.

** Parametry zmierzone metodą A wg PN-81/B – 03020, 1981.

krokach obliczeniowych parametrów geotechnicznych gruntu do momentu utworzenia płaszczyzny poślizgu.

W obliczeniach przyjęto, że poziom wody podnosił się w czasie od momentu startu obliczeń i osiągnął maksymalny poziom piętrzenia o wysokości 5,0 m n.p.t. po dwóch dobach. Najwyższy poziom wody utrzymywał się przez trzy doby, a następnie poziom wody w rzece opadał z prędkością około 1,0 m/d. W modelowaniu nie uwzględniano ruchu wody w rzece wzdłuż wału.

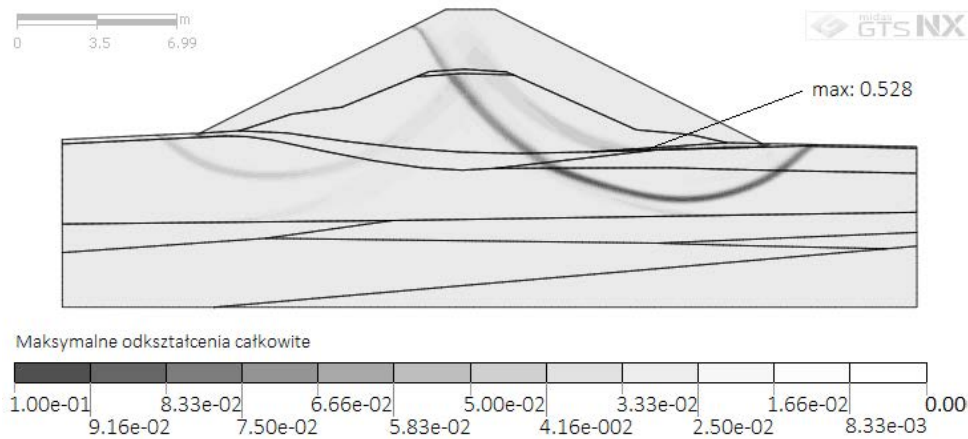
Na rysunku 5 przedstawiono możliwe płaszczyzny poślizgu w wale i podłożu dla podstawowego układu obciążeń. Rysunek 6 przedstawia strefy przemieszczeń poziomych w wale dla podstawowego układu obciążeń. Zaobserwować można, że pierwsza płaszczyzna poślizgu zarysowała się, przechodząc przez warstwę luźnych utworów IV po stronie skarpy odwodnej. W tym miejscu występują największe odkształcenia oraz przemieszczenia pozio-



Rys. 4. Model numeryczny przekroju wału przeciwpowodziowego po modernizacji

Fig. 4. The numerical model cross section of the flood embankment after modernization

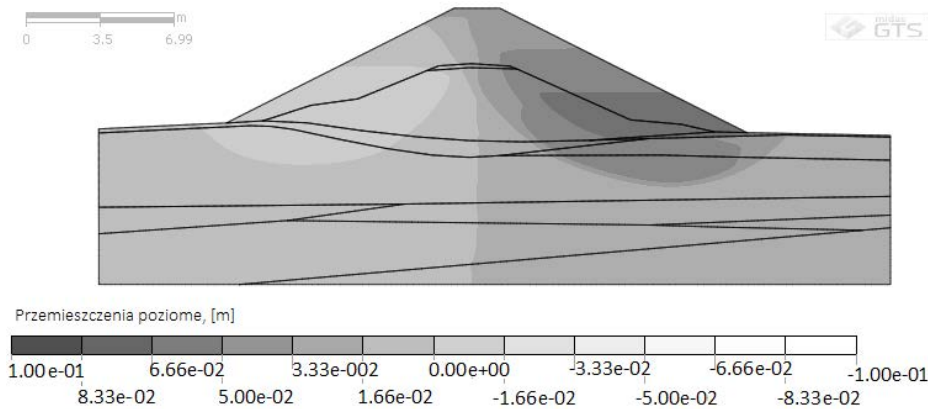
me. Warstwa ta może stanowić osłabienie całej konstrukcji, dlatego też należało podczas modernizacji wału zwrócić szczególną uwagę na tę warstwę. Współczynnik stateczności dla konstrukcji wynosi 2.38.



Rys. 5. Maksymalne odkształcenia całkowite w wale przeciwpowodziowym po modernizacji – podstawowy układ obciążeń

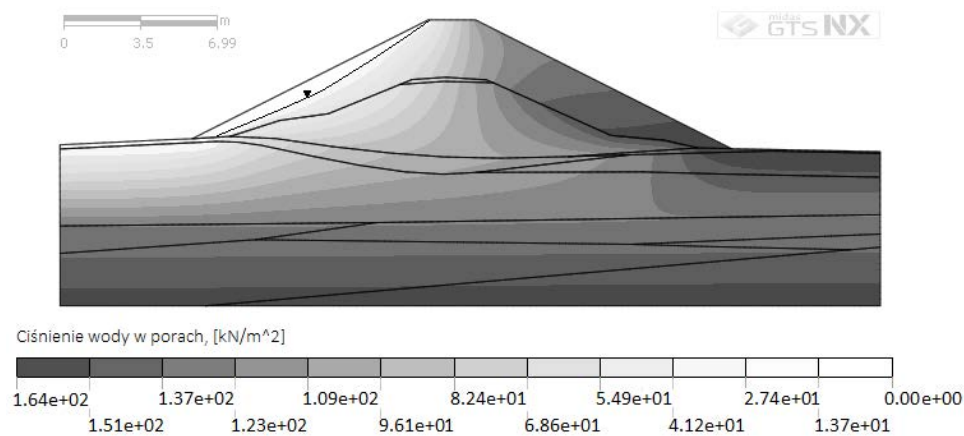
Fig. 5. Maximum shear strain in the flood embankment after modernization – basic load system

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład ciśnienia porowego w korpusie wału przeciwpowodziowego po modernizacji podczas maksymalnego piętrzenia wody na skarpie odwodnej po 4 dobach. Zaobserwować można, że warstwa odpadów wydobywczych o większym współczynniku filtracji od glin, występujących w korpusie wału tworzy strefę uprzywilejowaną dla przepływu wody. Przebieg krzywej depresji wody w wale podczas maksymalnego piętrzenia wody jest niekorzystny i może doprowadzić do utraty stateczności całej konstrukcji.



Rys. 6. Przesunięcia poziome w wale przeciwpowodziowym po modernizacji – podstawowy układ obciążeń

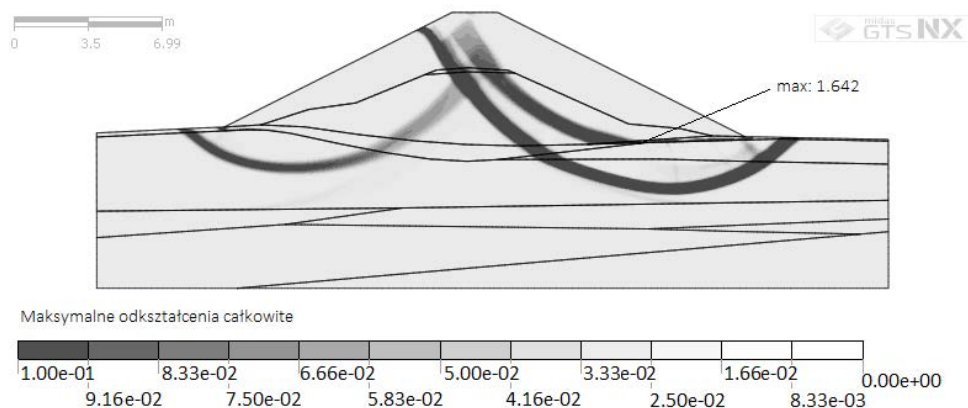
Fig. 6. Horizontal displacement in the flood embankment after modernization – basic load system



Rys. 7. Ciśnienie wody w porach i wysokość zwierciadła wody gruntowej podczas maksymalnego piętrzenia fali powodziowej

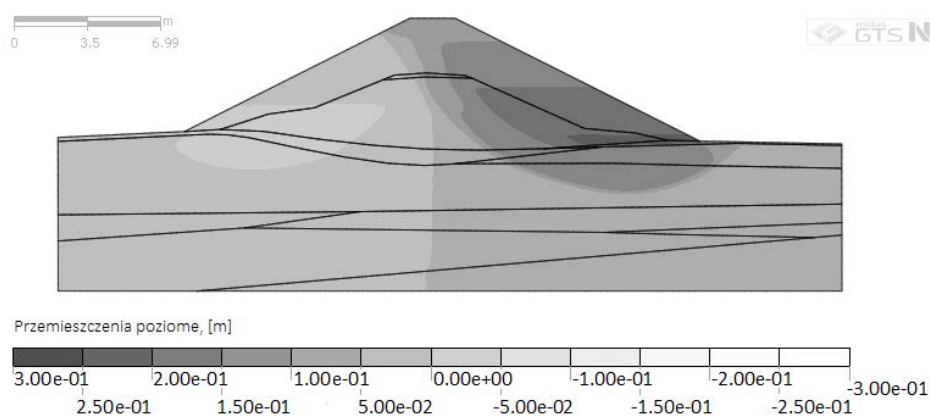
Fig. 7. Water pressure in the pores and height of ground water level during maximum damming flood wave

Po spiętrzeniu wody na skarpie odwodnej walu ponownie sprawdzono współczynnik bezpieczeństwa oraz przesunięcia poziome (rys. 8 i 9). Na rysunku 8 zarysowały się również dwie płaszczyzny poślizgu po stronie skarpy odwodnej i jedna po stronie skarpy odpowietrznej. Jednak największe odkształcenia i przesunięcia poziome wystąpiły w słabej warstwie IV po stronie skarpy odwodnej. Współczynnik stateczności dla walu wynosi 2,28. Przy modernizacji należy wzmocnić podłoże walu.



Rys. 8. Maksymalne odkształcenia całkowite w wale przeciwpowodziowym po modernizacji – wyjątkowy układ obciążeń

Fig. 8. Maximum shear strain deformation in the flood embankment after modernization – unique load system



Rys. 9. Przemieszczenia poziome w wale przeciwpowodziowym po modernizacji – wyjątkowy układ obciążeń

Fig. 9. Horizontal displacement in the flood embankment after modernization – unique load system

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania odpadów wydobywczych z Zakładu Górniczego Sobieski o uziarnieniu do 2,0 mm wzmocnionych cementem portlandzkim do modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych na przykładzie lewego wału rzeki Wisły na odcinku w Krakowie, os. Chałupki.

Zastosowanie spoiwa hydraulicznego w postaci cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R w ilości 8% w stosunku do suchej masy próby spowodowało ograniczenie wymywania materiału z próby i odczynu pH odcieków wodnych, zmniejszenie współczynnika filtracji oraz zwiększenie wytrzymałości na ściskanie. Mieszanka cement portlandzki–odpady wydobywcze jest mieszką pęczniącą. Dodanie cementu do odpadów wydobywczych spowodowało wzrost maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu przy jednoczesnym obniżeniu wilgotności optymalnej.

Podczas piętrzenia wody na skarpie odwodnej przepływ wody w wale jest duży. Wodoprzepuszczalność materiału odpadów wydobywczych z cementem wynosi $3,1 \cdot 10^{-6}$ m/s, co jest powodem szybkiej filtracji. W dalszych badaniach w celu zmniejszenia wodoprzepuszczalności materiału należy rozważyć dodanie większej ilości cementu do mieszanki lub mułów węglowych i popiołów. Możliwe jest również zastosowanie materiałów przeciwfiltracyjnych na skarpie odwodnej lub przesłon przeciwfiltracyjnych w korpusie.

Dla podstawowego układu obciążeń obliczenia współczynnika stateczności modernizowanego wału wykazują jego wartość 2,38. Dla wyjątkowego układu obciążeń konstrukcja również wykazuje duży współczynnik stateczności równy 2,28. Z wykonanych obliczeń wynika, że wykonanie podwyższenia wału za pomocą odpadów wydobywczych wzmocnionych cementem zapewnia spełnienie warunku stateczności dla konstrukcji wału.

W świetle dużego zapotrzebowania na tanie i wytrzymałe materiały mogące służyć modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych prezentowane badania i obliczenia wykazały celowość stosowania odpadów wydobywczych o uziarnieniu do 2,0 mm z Zakładu Górniczego Sobieski stabilizowanych cementem w budownictwie hydrotechnicznym.

Literatura

- Borys, M. 2007. Przepisy i wymogi oraz aktualny stan obwałowań przeciwpowodziowych w Polsce. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, t. 7 z. 2a, s. 25–44.
- Geopartner sp. z o.o., 2012. Opracowanie oceny stanu technicznego obwałowań przeciwpowodziowych na terenie powiatu krakowskiego, tarnowskiego i dąbrowskiego będących w administracji Małopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Krakowie – badania okresowe (pięcioletnie) – zgodnie z art. 62, ust. 1, pkt 2 ustawy Prawo Budowlane (Dz. U. z 2010 Nr 243, poz. 1623, z późn. zmianami) – cz. I, II, III.
- IMI GW Państwowy Instytut Badawczy, Oddział w Krakowie, Biuro Prognoz Hydrologicznych w Krakowie, 2012 – „Obliczenie przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla wybranych profili rzeki Wisły i Dunajca”, grudzień.
- PKN-CEN ISOTS 17892-5, 2009 – Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 5: Badania edometryczne gruntów. Specyfikacja Techniczna, Polski Komitet Normalizacyjny.
- PKN-CEN ISOTS 17892-11, 2009 – Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 11: Badanie filtracji przy stałym i zmiennym gradiencie hydraulicznym.
- Pilecka, E. i Morman, J. 2016. Stateczność wałów przeciwpowodziowych z wbudowaną warstwą odpadów powęglowych w świetle obliczeń numerycznych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 94, s. 173–184.
- Pisarczyk, S. 2015. *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- PN-81/B – 03020, 1981. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości.
- PN-88/B-04481, 1988. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości.
- PN-S-96012.1977. Drogi samochodowe – Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem.

- Rozporządzenia 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).
- Stanisz i in. 2017 – Stanisz, J., Borecka, A., Pilecki, Z. i Kaczmarczyk, R. 2017. Numerical simulation of pore pressure changes in levee under flood conditions. *E3S Web of Conferences* 24, 03002, AG 2017 – 3rd Int. Conf.on Applied Geophysics, DOI: 10.1051/e3sconf/20172403002.
- Tauron – Wydobycie S.A., 2011. Opracowanie programu gospodarowania odpadami wydobywczymi (PGOW) dla PKW S. A. w Jaworznie – Zakład Górniczy Sobieski.
- Wiłun, Z. 2010. *Zarys geotechniki*. Warszawa: Wyd. Komunikacji i Łączności.

