

Stateczność zapory Czaniec przy uwzględnieniu wykonywanej przesłony antyfiltracyjnej

Janusz M. Dłużewski¹
Antoni Tomaszewicz²
Krzysztof Ciuhak³
Władysław Jankowski³

1. WSTĘP

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych obejmujące analizę zapory ziemnej czołowej zbiornika Czaniec. Analizowano współpracę zapory z podłożem gruntowym w kolejnych etapach pracy zbiornika. Do analizy numerycznej wykorzystano sprężysto-plastyczne modele gruntu bazujące na warunku plastyczności Coulomba - Mohra i niestowarzyszonym prawie płynięcia. Do modelowania sprężysto-plastycznego zachowania się zapory wraz z podłożem zastosowano procedurę pseudo-lepkiej iteracji, wykorzystującą teorię lepkoplastyczności Perzyny [6]. Sformułowanie to zastosowane było po raz pierwszy przez Cormeau i Zienkiewicza [7] do rozwiązywania zagadnień sprężysto-plastycznych.

Do analizy problemów stateczności zastosowano procedurę $c-\phi$ redukcji zaaplikowaną w programie HYDRO-GEO [1]. Symulację numeryczną utraty stateczności zapory wykonano dla dwóch wariantów jej pracy: pierwszego przed wybudowaniem przesłony antyfiltracyjnej i drugiego po jej wykonaniu. Porównano otrzymane mechanizmy zniszczenia i współczynniki bezpieczeństwa.

2. OPIS OBIEKTU I PODŁOŻA

Zapora zbiornika Czaniec jest usytuowana na rzece Sole w km 28.75. Zbiornik Czaniec ma powierzchnię około 43 ha. Pracuje on w kaskadzie z wyżej położonymi zbiornikami Porąbka i Tresna. Budowę zbiornika rozpoczęto w 1962 roku, a eksploatację rozpoczęto w 1967 roku. Obiektami piętrzącymi wodę do wysokości 4.5 m są zapory boczne i zapora czołowa. Skarpa odpowietrzna zapory czołowej oraz partie zapór bocznych o najwyższej wysokości zostały dociążone nasypem w latach 1983-86. Zapora czołowa jest przedzielona przelewem na jazie o podwyższonym progu o trzech przesłach z zamknięciami (klapy powłokowe). Zbiornik i zapora są zakwalifikowane do klasy 2.

¹⁾ prof. dr hab. inż., Wydział Inżynierii Łądowej - Politechnika Warszawska

²⁾ dr, Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór - Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa

³⁾ mgr inż., Ośrodek Technicznej Kontroli Zapór - Inst. Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa

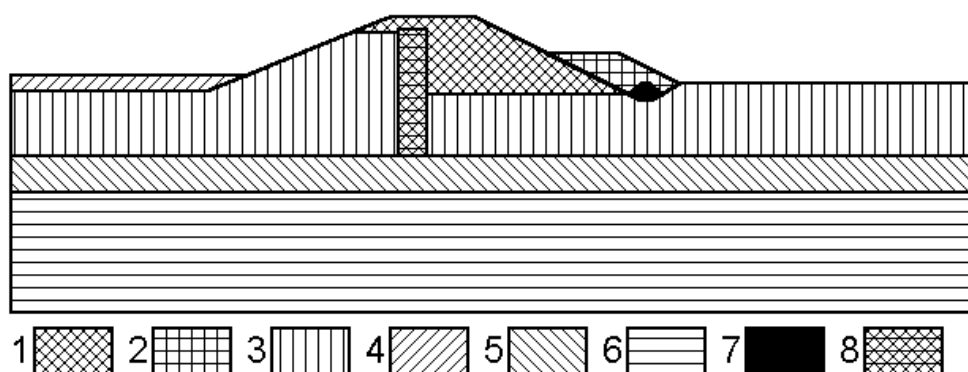
Zaporę czołową i boczne zbudowano z miejscowego materiału aluwialnego: otoczków piaskowca, żwirów i piasków o różnym stopniu zaglinienia. Głównym zadaniem, jakie spełnia zbiornik, jest wyrównywanie odpływów pracującej szczytowo elektrowni Porąbka, a także ujęcie wody dla potrzeb przemysłu, gospodarki komunalnej miasta Bielska-Białej i aglomeracji śląskiej.

Podstawowe parametry zapory:

- Długość zapory czołowej 560 m,
- Długość zapór bocznych 2500 m,
- Wysokość maksymalna 6.50 m,
- Szerokość zapory czołowej w koronie 7.0 m,
- Nachylenie skarp: odwodnej 1:2.5, odpowietrznej 1:2,
- Rzędna korony 299.50 m n.p.m.
- Rzędna piętrzenia dopuszczalnego 298.00 m n.p.m.
- Maksymalna rzędna nasypu dociążającego 296.50 m n.p.m.

Podczas przeprowadzonych w ostatnich latach obserwacji i ocen stanu technicznego zbiornika stwierdzono nadmierną filtrację pod zaporą oraz procesy sufozji [3,4,5]. Aby zapobiec niekorzystnym zjawiskom rozpoczęto w roku 2000 budowę przesłony antyfiltracyjnej, której zakończenie planowane jest na rok 2001. Przesłona dochodząca do warstwy praktycznie nieprzepuszczalnej, wykonywana jest metodą traconego stożka. Zastosowano zaczyn iniekcyjny wodno-cementowy z dodatkami (Sika, Mixbet, soda).

Podłoże. Zapora czołowa jest posadowiona bezpośrednio na utworach aluwialnych: żwirach i piaskach z otoczkami, zaglinionymi. Około 7.00 m głębiej znajduje się strop podłoża praktycznie nieprzepuszczalnego mającego miąższość ok. 3 m, utworzonego przez otoczki, rumosze i gliny pylaste. Pod nim zalegają łupkowate skały fliszu karpackiego - ility piaszczyste. Na rysunku 1 pokazany jest przekrój poprzeczny przez zaporę z zaznaczonymi strefami materiałowymi.



Rys.1. Przekrój przez zaporę i podłoże dla wariantu II - po wykonaniu przesłony.
Numeracja stref materiałowych zgodna z tabelą 1.

3. PARAMETRY MATERIAŁOWE

Zestawienie wartości liczbowych parametrów charakteryzujących zapórę i podłoże przytoczono w tabeli 1. Przyjęto następujące oznaczenia: E - moduł Younga (sprężystości podłużnej), ν - współczynnik Poissona, γ - ciężar objętościowy, c - spójność, ϕ - kąt tarcia wewnętrznego, c^F - spójność zmniejszana w procedurze c- ϕ redukcji, ϕ^F - kąt tarcia wewnętrznego zmniejszany w procedurze c- ϕ redukcji.

Tabela 1

Nr	Strefa materiałowa	E [kPa]	ν	γ [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]	c^F [kPa]	ϕ^F [°]
1	żwiry + otoczaki+piaski nad poziomem wody	120 000	0.2	20.0	2	38	0.88	19.1
2	nasyp dociążający żwiry + otoczaki+piaski nad poziomem wody	120 000	0.2	20.0	2	38	0.88	19.1
3	żwiry + otoczaki+piaski pod poziomem wody	120 000	0.2	20.0	2	38	0.88	19.1
4	fartuch ilowy	30 000	0.3	19.5	80	40	-	-
5	otoczaki+rumosz+glina pylasta podłoże nieprzepuszczalne	180 000	0.2	22.0	8	30	-	-
6	ił piaszczysty podłoże fliszowe	70 000	0.35	21.0	40	17	-	-
7	drenaż	21 700	0.3	19.5	12	42	-	-
8	przesłona antyfiltracyjna	500 000	0.25	21.0	200	42	-	-

Numeracja materiałów podanych w tabeli odpowiada numeracji przedstawionej na rysunku. 1.

4. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Przygotowanie modelu numerycznego wymaga skompletowania wielu informacji dotyczących korpusu budowli, podłoża i jego układu warstw, parametrów materiałowych opisujących cechy fizyczne gruntów, jak też właściwej oceny obciążeń działających na obiekt.

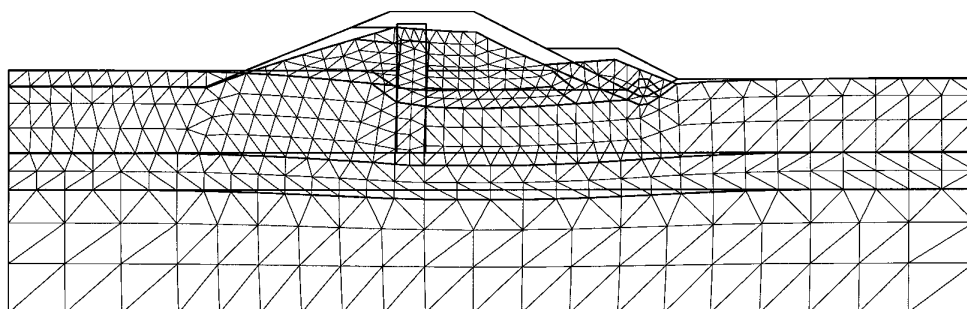
Do dyskretyzacji badanego obszaru wykorzystano program "SIATKA" [2], opracowany w Ośrodku Technicznej Kontroli Zapór IMGW, będący preprocesorem programu HYDRO-GEO. Siatkę elementów zaprojektowano tak, można było wykonać obliczenia w dwóch wariantach: przed i po wykonaniu przesłony. Zastosowano elementy trójkątne sześciowęgłowe. Wygenerowana siatka zawiera 792 elementy i 1675 węzłów.

Obliczenia zostały przeprowadzone dla parametrów materiałowych podanych w Tabeli 1 dla 4-ch etapów budowy modelu w dwóch wariantach.

ETAP 1. Do podłoża wprowadzono naprężenia początkowe wynikające z ciężaru

zalegających warstw gruntowych, doprowadzając do stanu wyjściowego przed rozpoczęciem budowy zapory. Rozkład obliczonych naprężeń jest ważnym testem poprawności budowanego modelu.

ETAP 2. Wzniesiono na podłożu zapórę poprzez dołożenie elementów. W tym schemacie obciążenie stanowił ciężar dokładanych elementów. W wariantcie I maksymalne przemieszczenie wyniosło 19.8 mm, a w wariantcie II 18.8 mm. Na rysunku 2 przedstawiono deformację siatki dla wariantu II.

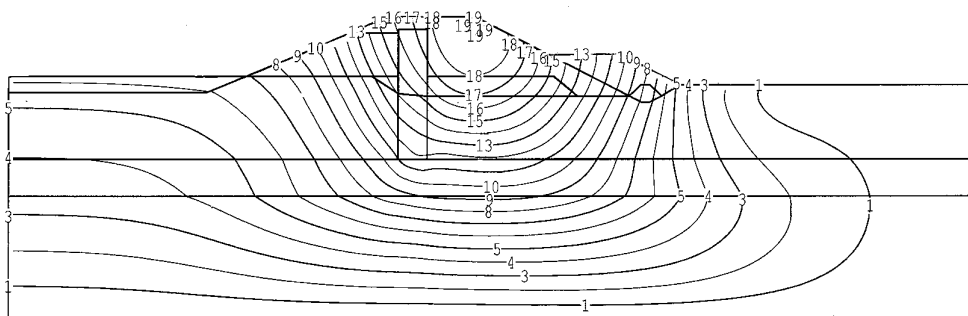


Rys.2. Wariant II - schemat deformacji siatki po wybudowaniu zapory. Maksymalne przemieszczenie wypadkowe wynosi 18.8 mm.

ETAP 3. Przyłożono obciążenia wynikające z piętrzenia wody w zbiorniku.

Wariant I. Maksymalne przemieszczenie wypadkowe wynosi 20.2 mm.

Wariant II. Przemieszczenia wypadkowe w formie izolinii pokazane są na rysunku 3. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 19.1 mm.



Rys.3. Wariant II - przemieszczenia wypadkowe po spiętrzeniu wody w zbiorniku. Izolinie kreślone co 1 mm.

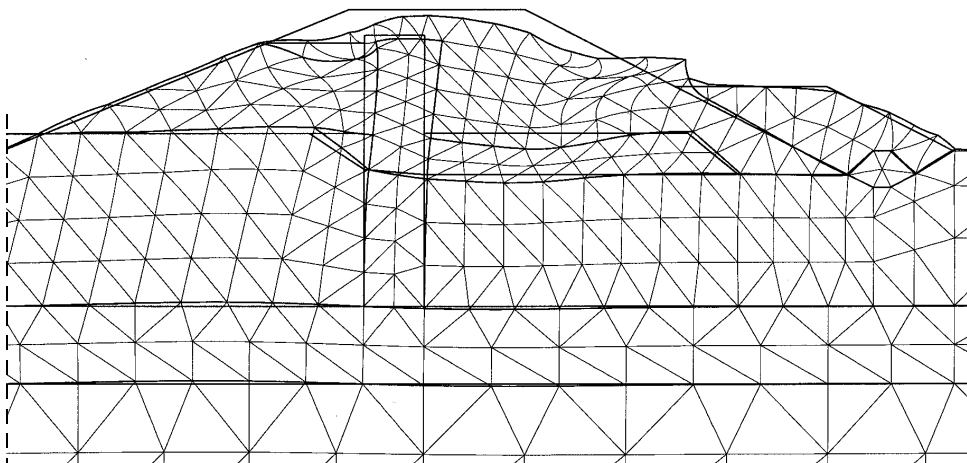
ETAP 4. Do badania stateczności zastosowano procedurę $c-\phi$ redukcji. Do analizy przyjęto procedurę przyrostowo-iteracyjną pozwalającą uchwycić moment zniszczenia

budowli.

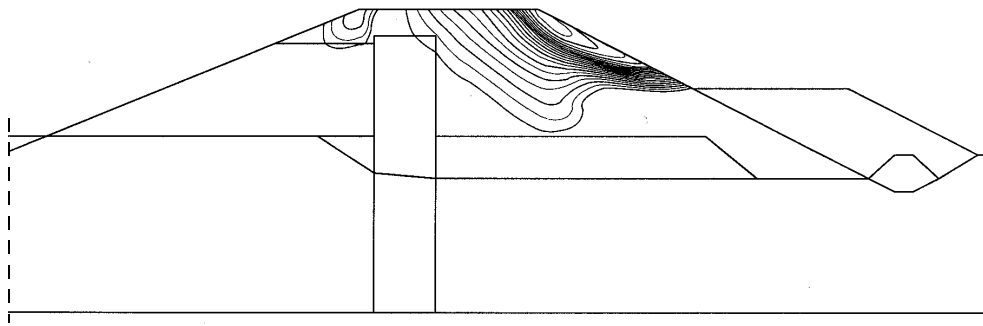
Procedura $c-\phi$ redukcji polega na sukcesywnym zmniejszaniu, w kolejnych iteracjach, wartości liczbowych parametrów materiałowych: spójności - c i tangensa kąta tarcia wewnętrznego - $\text{tg}\phi$, z zachowaniem ich stosunku $F = c/c^F = \text{tg}\phi/\text{tg}\phi^F$, który określa współczynnik bezpieczeństwa, gdzie c^F i ϕ^F oznaczają spójność i kąt tarcia wewnętrznego w "chwili" utraty stateczności budowli albo budowli wraz z częścią podłoża.

Procedurę $c-\phi$ redukcji przeprowadzono dla wybranych stref materiałowych (materiały 1, 2, 3, 8, tabela 1). Rezultatem obliczeń było określenie współczynnika bezpieczeństwa z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Otrzymano mechanizmy zniszczenia budowli.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano dla obu wariantów współczynniki stateczności równe 2.25. Wartości parametrów materiałowych c^F i ϕ^F , przy których na modelu inicjuje się mechanizm zniszczenia, podane są w Tabeli 1. Na siatce zdeformowanej (rysunek 4) uchwyciono moment zniszczenia budowli. Wystąpił tu zsuw skarpowy od strony odpowietrznej. Na rysunku 5 zagęszczone izolinie lokalizują powierzchnię poślizgu.



Rys. 4. Wariant II - schemat deformacji w chwili zniszczenia wskutek osłabiania parametrów materiałowych automatyczną procedurą $c-\phi$ redukcji. Uzyskano współczynnik stateczności $F=2.25$ przy napełnionym zbiorniku do 298.20 m n.p.m.



Rys. 5. Wariant II - przemieszczenia w chwili zniszczenia wskutek osłabienia parametrów materiałowych automatyczną procedurą $c-\phi$ redukcji. Współczynnik stateczności $F=2.25$ przy napełnionym zbiorniku do 298.20 m n.p.m. Zagęszczone izolinie wskazują powierzchnię poślizgu.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje numeryczne stateczności zapory czołowej zbiornika Czaniec pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Stateczność zapory ziemnej zbiornika wodnego Czaniec jest zachowana, a współczynnik bezpieczeństwa ma tę samą wartość dla obu wariantów (przed i po remoncie) i wynosi $F=2.25$.
- Wybudowanie przesłony ogranicza nadmierną filtrację oraz procesy sufozji, natomiast z punktu widzenia otrzymanych współczynników bezpieczeństwa i mechanizmów zniszczenia nie ma większego znaczenia.
- Po osłabieniu parametrów materiałowych w procedurze $c-\phi$ redukcji dla wybranych stref materiałowych, na modelu inicjuje się pierwszy mechanizm zniszczenia od strony odpowietrznej.
- Analiza numeryczna zapory Czaniec pozwoliła na ocenę zjawisk zachodzących na obiekcie. Wykonane za pomocą metody elementów skończonych symulacje numeryczne umożliwiły przeprowadzenie całościowej analizy współpracy budowli z podłożem gruntowym dostarczając informacji dotyczących stanu przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w badanym obiekcie.

6. WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Janusz M. Dłużewski: HYDRO-GEO. Program elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [2] Antoni Tomaszewicz: Program "SIATKA" do dyskretyzacji obszarów płaskich. Wiadomości IMGW, tom XXI (XLII), zeszyt 3, Warszawa, 1998.
- [3] Ryszard Ryżak z zespołem: Pomiary przemieszczeń i ocena stanu technicznego obiektów piętrzących zbiornika Czaniec. IMGW OTKZ Warszawa, grudzień 1998.

- [4] Janusz M. Dłużewski, Krzysztof Ciuhak, Antoni Tomaszewicz, Władysław Jankowski: Określenie stopnia zagrożenia jakie stanowi budowla piętrząca Czaniec w oparciu o model numeryczny tej budowli. IMGW OTKZ, Warszawa, grudzień 2000.
- [5] Andrzej Mazurczyk, Władysław Jankowski, Andrzej Wita: Badanie rzeczywistych warunków filtracji oraz wykonanie komputerowego modelu symulacyjnego dla potrzeb optymalnych rozwiązań poprawy warunków szczelności zapory Czaniec. IMGW OTKZ Warszawa, listopad 1993.
- [6] P. Perzyna: Fundamental problem in viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 9, 1966.
- [7] I.C. Corneau, O.C. Zienkiewicz: Viscoplasticity-plasticity and creep in elastic solids - a unified numerical solution approach. *Int. J Numerical Methods in Engineering*, Vol. 8, 1974.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych obejmujące analizę zapory ziemnej czołowej zbiornika Czaniec dla dwóch wariantów jej pracy: pierwszego przed wybudowaniem przesłony antyfiltracyjnej i drugiego po jej wykonaniu. Wykorzystano sprężysto-plastyczne modele gruntu bazujące na warunku plastyczności Coulomba - Mohra i niestowarzyszonym prawie płynięcia. Do modelowania sprężysto-plastycznego zachowania się zapory wraz z podłożem zastosowano procedurę pseudo-lepkiej iteracji, wykorzystującą teorię lepkoplastyczności Perzyny. Do badania stateczności zastosowano procedurę $c-\phi$ redukcji zaaplikowaną w programie HYDRO-GEO.