

Piotr KUBOŃ*

Politechnika Krakowska

DOBÓR MODELU DYNAMICZNEGO ZAPÓR ZIEMNYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono dobór dynamicznego modelu wybranych zapór ziemnych z rdzeniami. Wykonano obliczenia z uwzględnieniem zastanego poziomu piętrzenia wody podczas badań dynamicznych *in situ* analizowanych obiektów. W pracy rozważono trzy warianty modelu. Model analizowanych konstrukcji przyjęto w postaci sprężystej tarczy pracującej w płaskim stanie odkształcenia. W poszczególnych wariantach uwzględniano odpowiednio: 1) stałe materiałowe przyjęte na podstawie danych z literatury, 2) naprężenia efektywne w gruncie wynikające z ciężaru wody i ciężaru gruntu, 3) stopień nasycenia gruntu wodą.

SELECTION OF DYNAMIC MODEL OF EARTH DAMS

Summary. In the paper selection of dynamic model of chosen earth dams have been presented. Calculations were executed with regard of existing water level during dynamic investigation *in situ* of analyzed structures. In the study three variants of dynamic model have been considered. The model of analyzed structures has been assumed as elastic shield in plain strain. In particular variants of model there have been assumed: 1) material data properties taken from literature, 2) effective stresses in soil resulting from weights of water and soil, 3) saturation ratio.

1. Wstęp

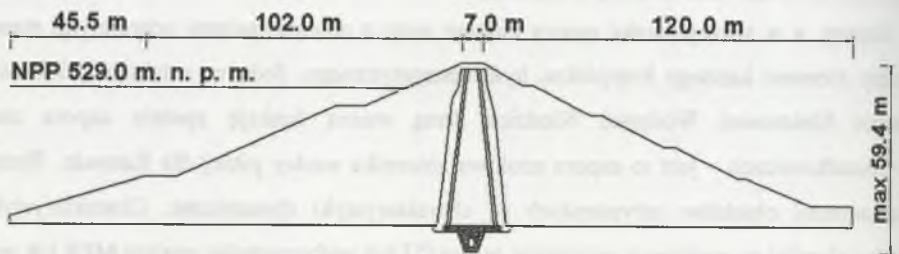
Zapory, a w szczególności zapory ziemne wraz z obwałowaniami ochronnymi stanowią ważny element każdego kompleksu hydroenergetycznego. Jednym z takich obiektów jest Zespół Elektrowni Wodnych Niedzica. Inną ważną funkcję spełnia zapora ziemna w Goczałkowicach – jest to zapora czołowa zbiornika wodny pitnej dla Katowic. Ważnymi parametrami obiektów inżynierskich są charakterystyki dynamiczne. Charakterystyki te można określić na podstawie pomiarów *in situ* [5] lub wykorzystując analizę MES ich modeli dynamicznych. Znajomość tych charakterystyk jest niezbędna do określenia wpływu działań

dynamicznych na konstrukcje zapór, w szczególności na stateczność korpusu zapory i możliwość pojawienia się zjawiska upłynnienia gruntu (liquefaction). W przypadku obiektów hydrotechnicznych narażonych na działania dynamiczne prowadzony jest ciągły monitoring. Jako przykład można podać składowisko odpadów produkcyjnych Żelazny Most, będące pod bezpośrednim wpływem wstrząsów parasejsmicznych.

Modelem obliczeniowym zapór wodnych, najczęściej spotykanym w literaturze, jest element przekroju poprzecznego zapory, pracujący w płaskim stanie odkształceń [1, 3, 7]. Model przestrzenny stosowany jest rzadziej [2]. Rezultaty uzyskane dla przestrzennego modelu różnią się nieznacznie w porównaniu z modelem płaskim [1, 2]. Przedstawienie przestrzennej pracy konstrukcji wymaga zdecydowanie większej liczby elementów oraz zwiększa czasochłonność obliczeń. Wyniki badań doświadczalnych ujmujące pracę całego układu stanowią podstawę do przyjęcia płaskiego modelu odwzorowującego badany układ [5].

2. Opis analizowanych obiektów hydrotechnicznych

W skład Zespołu Elektrowni Wodnych Niedzica wchodzi następujące obiekty hydrotechniczne: zapora czołowa w Czorsztynie-Niedzicy, zapora boczna we Frydmanie oraz zapora w Sromowcach. Zapora w Czorsztynie-Niedzicy jest zaporą ziemną z centralnym rdzeniem uszczelniającym, o charakterystycznych wymiarach: długość – 404 m, wysokość – 56 m, szerokość u podstawy – 265 m, szerokość korony – 7 m. Typowy przekrój poprzeczny zapory w Czorsztynie-Niedzicy pokazano na rys.1.



Rys. 1. Typowy przekrój poprzeczny – zapora w Czorsztynie-Niedzicy
 Fig. 1. Typical cross-section – Czorsztyn-Niedzica earth dam

Zapory we Frydmanie oraz Sromowcach stanowią przykład zapór ziemnych z elementem szczelnym w postaci ekranu z płyt betonowych uszczelnianych taśmami PCV oraz fartuchem glinianym. Charakterystyczne wymiary zapory we Frydmanie wynoszą: długość - 2,5 km, wysokość - 19 m, szerokość korony - 3 m, szerokość u podstawy - 80 m; w Sromowcach: długość - 370 m, wysokość - 11 m, szerokość korony - 11 m, szerokość u podstawy - 56 m.

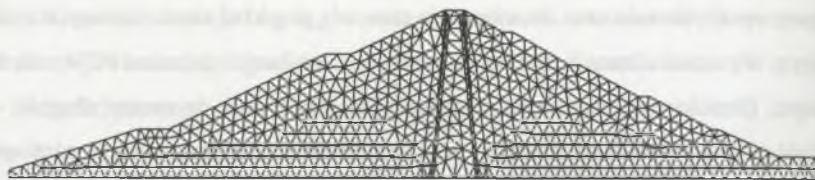
Kolejnym rozważanym obiektem hydrotechnicznym jest zapora ziemna w Goczałkowicach. Zapora ta jest najdłuższą zaporą ziemną w Polsce - długość jej wynosi ok. 3 km, szerokość korony - 5 m, szerokość u podstawy - 76 m, a wysokość zapory - 16 m. Uszczelnienie zapory stanowi rdzeń ukośny (ekran) zbudowany z żużla.

3. Warianty modelu obliczeniowego

Obliczenia numeryczne zapór ziemnych i obwałowań wykonano w kilku wariantach. We wszystkich wariantach przyjęto płaski model zapory w postaci sprężystej tarczy pracującej w płaskim stanie odkształceń. Wszystkie obliczenia dynamiczne wykonano programem Abaqus [13]. Obliczenia naprężeń efektywnych, filtracji oraz nasycenia gruntu wodą wykonano programem Z_Soil [14]. W rozważanych wariantach modelu obliczeniowego pominięto dynamiczny wpływ „wody związanej”. Można to zrealizować zgodnie z [9].

3.1. Wariant I

W przypadku zapory w Goczałkowicach wyjściowe parametry gruntu: moduł Younga E , liczbę Poissona ν oraz gęstość objętościową gruntu γ przyjęto za polską normą [10] oraz z wyników badań polowych zawartych w [8]. W modelu zapory w Czorsztynie-Niedzicy parametry rdzenia oraz korpusu, jak również charakterystyczne przekroje poprzeczne przyjęto za opisem technicznym [12] oraz monografią [6]. Dla pozostałych obiektów ZEW Niedzica dane gruntowe przyjęto jako analogiczne z danymi charakteryzującymi zaporę główną. Wariant I stanowi przypadek podstawowy. Przykładowy podział na elementy skończone zapory w Czorsztynie-Niedzicy pokazano na rys.2.



Rys. 2. Podział na elementy skończone - zapora w Czorsztynie-Niedzicy

Fig. 2. Finite Elements mesh - Czorsztyn-Niedzica earth dam

3.2. Wariant II

Pierwotny moduł sprężystości poprzecznej Kirchhoffa G_o (dla małych odkształceń) wyznaczono korzystając z empirycznych zależności podanych w [4]. Przykładowo, zależność (1) pozwala wyznaczyć moduł G_o dla gruntów spoistych – np. gliny [4]:

$$G_o = 3270 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_o)^{0.5} \quad (1)$$

gdzie:

e – porowatość,

σ'_o – średnie naprężenie efektywne.

Moduł odkształcenia pierwotnego E_o , odpowiadający określonej poziomej naprężeniu, oraz moduł sprężystego odkształcenia gruntu E wyznaczono z zależności [8, 10]:

$$E_o = G_o \cdot 2(1 + \nu) \quad (2)$$

$$E = \frac{E_o}{\beta} \quad (3)$$

gdzie:

β – wskaźnik konsolidowania gruntu.

Korpus rozważanych obiektów hydrotechnicznych został dodatkowo podzielony na strefy materiałowe o zmiennych wartościach modułu E wyliczonych z zależności (3), pozostałe parametry materiałów (γ , ν) przyjęto jak w wariantcie I.

3.3. Wariant III

W trzecim wariantcie modelu została uwzględniona filtracja wody poprzez zapórę. Znając poziom piętrzenia wody, określono strefy nasycenia badanych obiektów – por. rys. 3.



Rys. 3. Stopień nasycenia – zapora Czorsztyn-Niedzica
Fig. 3. Saturation ratio – Czorsztyn-Niedzica earth dam

W strefie pełnego nasycenia wodą moduł Younga E_{und} określono zgodnie z zależnością [11]:

$$E_{und} = \frac{3E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

gdzie:

E, ν – moduł Younga oraz liczba Poissona dla materiału „suchego”.

W analizowanych obiektach wartości stosunku E_{und} / E zmieniają się w przedziale 1,13–1,25. Gęstość objętościową materiału γ_u badanych obiektów wyznaczono z uwzględnieniem nasycenia wodą, zgodnie z [11]:

$$\gamma_u = \gamma_{such} + \gamma_{wody} \cdot e \cdot s \quad (5)$$

gdzie:

γ_{such} – ciężar objętościowy materiału „suchego”,

γ_{wody} – ciężar objętościowy wody,

s – stopień nasycenia ($s = 1$ odpowiada pełnemu nasyceniu gruntu wodą).

Tablica 1

Zmiana wartości modułu Younga materiału rdzenia
w poszczególnych wariantach obliczeniowych
na przykładzie zapory w Czorsztynie-Niedzicy

Materiał	Moduł Younga [MPa]		
	Wariant I	Wariant II	Wariant III
Rdzeń 01	137,00	314,32	354,50
Rdzeń 02	137,00	444,52	501,34
Rdzeń 03	137,00	544,43	614,01
Rdzeń 04	137,00	628,65	709,00
Rdzeń 05	137,00	702,85	792,69
Rdzeń 06	137,00	769,93	868,35
Rdzeń 07	137,00	831,62	937,92
Rdzeń 08	137,00	889,04	1002,68
Rdzeń 09	137,00	942,97	1063,50
Rdzeń 10	137,00	993,98	1121,03
Rdzeń 11	137,00	1042,50	1175,75

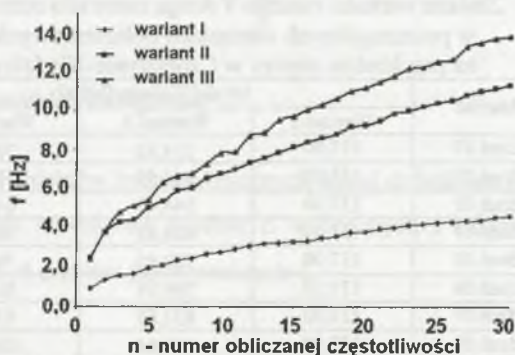
W strefie pełnego nasycenia wodą, wartość liczby Poissona przyjęto $\nu = 0.4999$.

W tabelicy 1 pokazano zmianę wartości modułu Younga dla materiału rdzenia zapory w Czorsztynie-Niedzicy w zależności od przyjętego wariantu obliczeniowego. Z tabelicy 1 wynika, że: a) w wariantcie I wartość E jest stała po wysokości rdzenia, b) wpływ naprężeń efektywnych na moduł E jest zmienny po wysokości rdzenia - od 2,3 do 7.6 razy, c) wpływ filtracji na zmianę modułu E jest stały po wysokości rdzenia i wynosi ok. 13%.

4. Analiza wyników obliczeń

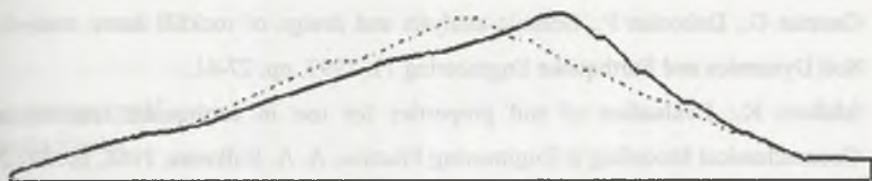
Analiza wyników przeprowadzonych obliczeń wykazała istotne różnice wartości częstotliwości drgań własnych zapór w zależności od przyjętego wariantu modelu obliczeń - por. rys. 4. Zaobserwować można istotny wzrost częstotliwości wyznaczonych dla wariantu I w stosunku do wariantu II, co wynika ze wzrostu wartości modułów E warstw w kierunku od korony do podstawy zapory. Znacznie mniejsza różnica pomiędzy obliczonymi częstotliwościami drgań własnych występuje w przypadku wykorzystania wariantów II i III, co szczególnie dobrze jest widoczne dla zapór we Frydmanie i Sromowcach. Powyższe wynika z różnic konstrukcyjnych ww. zapór - por. p. 2.

Z analiz wyników obliczeń (tu nie prezentowanych) można stwierdzić, że najodpowiedniejszym elementem skończonym do przeprowadzenia obliczeń tego typu konstrukcji jest element trójkątny CPE3. Największy wpływ wymiarów oraz typu użytych elementów obserwuje się dla najniższych częstotliwości drgań własnych.



Rys. 4. Wartości częstotliwości drgań własnych dla przyjętych wariantów modelu - zapora Czorsztyn-Niedzica

Fig. 4. Natural frequencies for assumed variants of the model - Czorsztyn-Niedzica earth dam



Rys. 5. Przykładowa postać drgań własnych – zapora Czorsztyn-Niedzica
Fig. 5. Exemplary mode – Czorsztyn-Niedzica earth dam

5. Podsumowanie

Zaproponowane warianty modelu dynamicznego zapór ziemnych pozwalają wyznaczyć częstotliwości i odpowiadające im postacie drgań własnych. Wzrost częstotliwości wyznaczonych dla wariantów I i II zmienia się w zakresie od 20% dla zapory w Goczałkowicach do 140% dla zapory w Czorsztynie. Związane jest to z wymiarami poprzecznymi zapory, co wpływa na wartości naprężeń efektywnych w gruncie. Wzrost częstotliwości pomiędzy wariantami II i III wynosi odpowiednio: ok. 50% dla zapory w Goczałkowicach, ok. 20% dla zapory w Czorsztynie oraz ok. 10% dla obiektów w Sromowcach i Frydmanie. Wynika to z zasadniczych różnic w budowie elementów szczelnych tych zapór. W przypadku Czorsztyna-Niedzicy – rdzeń centralny oraz Goczałkowic – rdzeń ukośny, strefa pełnego nasycenia jest znacznie większa; natomiast w przypadku pozostałych zapór, gdzie uszczelnienie zapory realizowane jest poprzez gliniany fartuch oraz płyty żelbetowe uszczelniane taśmami PCV, strefa pełnego nasycenia jest znacznie mniejsza. W obliczeniach niezbędne jest uwzględnienie naprężeń efektywnych wynikających z ciężaru wody oraz ciężaru warstw zapory, bowiem czynniki te wpływają w istotny sposób na charakterystyki materiałowe przyjmowane w analizach, a co za tym idzie wartości obliczonych częstotliwości.

LITERATURA

1. Blarowski A., Ciesielski R.: Charakterystyki dynamiczne betonowych zapór ciężkich Polski południowo – wschodniej, *Archiwum Hydrotechniki*, tom XXVII, z. 4, 1980, s. 525-542.
2. Dulińska J.: Analiza odpowiedzi dynamicznej zapory ziemnej w Czorsztynie-Niedzicy na nierównomierne wymuszenie kinematyczne, *Inżynieria i Budownictwo* 7, 2005, s. 378-382.

3. Gazetas G., Dakoulas P.: Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 11, 1992, pp. 27-61.
4. Ishihara K.: Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, *Geomechanical Modeling in Engineering Practice*, A. A. Balkema, 1986, pp. 241-275.
5. Kuboń P., Tatara T.: Badania dynamiczne zapór ziemnych i obwałowań w skali naturalnej, 51 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2005, Tom 4, s. 33-40.
6. Michalik S., Witkowski i in.: Zespół zbiorników wodnych Czorsztyn – Niedzica i Sromowce Wyżne im. Gabriela Narutowicza, Monografia, RZGW w Krakowie, Kraków 2003.
7. Udin N.: A dynamic procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation, *Computers & Structures* 72, 1999, pp. 409-421.
8. Wiłun Z.: Zarys geotechniki, WKŁ, Warszawa 2003.
9. Westergaard H. M.: Water pressure on dams during earthquakes, ASCE Paper No 1835, New York 1931, pp. 418-433

NORMY I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

10. PN-81/B-03020 Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
11. Soil Mechanics Study Guide, School of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Pretoria, July 2002.
12. Zespół Zbiorników Wodnych Czorsztyn-Niedzica i Sromowce Wyżne, Opis techniczny, 1984.
13. Abaqus/Standard User's Manual, Version 6.2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 2001.
14. Z_Soil.PC 2003, User Manual, Zace Services Ltd, (<http://www.zace.com>).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Konderla

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003/2005 jako projekt badawczy Nr 5 T07E 069 25.