ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: BUDOWNICTWO z. 95 Nr kol.1559

Piotr KUBOŃ*
Politechnika Krakowska

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK DYNAMICZNYCH WYBRANYCH ZAPÓR WODNYCH

Streszczenie. W referacie zaproponowano metodykę wyznaczania charakterystyk dynamicznych zapór betonowych lub ziemnych oraz wskazano konieczność podjęcia dalszych badań uwzględniających wymuszenie drgań.

ESTIMATION OF FREE VIBRATIONS FOR EARTH DAMS WITH CORE

Summary. Estimation of free vibrations for chosen earth dams was presented in the paper. Further similar research including special excitation of vibration is planed for earth dams with core.

1. Wstęp

Rozpatrując obciążenia i oddziaływania przekazywane na budowle, a w szczególności obiekty hydrotechniczne, nie można pominąć oddziaływań o charakterze dynamicznym. Czynniki generujące obciążenie dynamiczne budowli można podzielić na dwie kategorie: oddziaływania sejsmiczne mające swoją genezę w żywiole sił natury oraz parasejsmiczne - zależne od człowieka. Do pierwszej z tych kategorii zalicza się: wstrząsy sejsmiczne, falowanie wody, podmuchy wiatru, natomiast w drugiej znajdą się: drgania komunikacyjne, wybuchy i tąpnięcia związane z eksploatacją górniczą, drgania spowodowane odstrzałami w kamieniołomach, pracą urządzeń upustowych, generatorów i in. Dlatego też do parametrów charakteryzujących konstrukcję, oprócz dotąd podawanych cech mechanicznych należy dołączyć następujące charakterystyki dynamiczne: spektrum częstotliwości własnych, odpowiadające im formy własne oraz modalne współczynniki tłumienia.

---

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Roman Ciesielski

Analizując wiele prac poświęconych dynamice zapór, można dojść do wniosku, iż dominującą rolę w przypadku drgań zapory odgrywają drgania poprzeczne, z którymi wiąże się możliwość powstania dodatkowych sił dynamicznych stanowiących potencjalne zagrożenie dla stateczności lub też wytrzymałości zapory.

Zaniedbując wpływ długości zapory na charakter jej drgań, rozpatrywać można drgania poprzeczne zapory jako wydzielonej płaskiej tarczy powstałej przez poprowadzenie dwóch równoległych przekrojów pionowych przez blok piętrzący. O słuszności przyjęcia takiego założenia świadczyć mogą wyniki pomiarów drgań rzeczywistych zapór [3]. Zaobserwowano bowiem, iż poszczególne oddylatowane sekcje zapór drgają w dużym stopniu niezależnie od siebie.

Szybki postęp dokonujący się w zakresie technik komputerowych pozwala nam przyjmować bardziej skomplikowane modele fizyczne lepiej odwzorowujące rzeczywiste konstrukcje. Istnieje możliwość uwzględnienia w obliczeniach dynamicznych wpływu tzw. masy współpracującej wody, poprzez zastosowanie odpowiednich elementów skończonych istniejących, np. w programie DIANA.

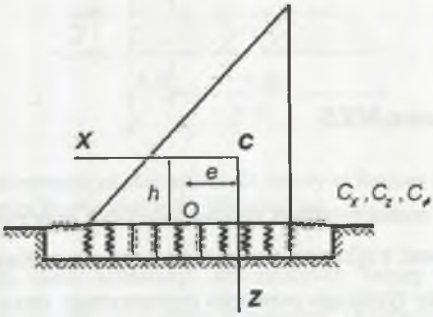
2. Wyznaczenie charakterystyk dynamicznych zapory jako bryły sztywnej na odkształcalnym podłożu Winklera (model płaski)

Jako tło literaturowe rozważmy przypadek płaskiego zadania, w którym zapora traktowana jest jako płaska, jednorodna, nieodkształcalna tarcza posadowiona na odkształcalnym podłożu, opisanym dynamicznymi współczynnikami sztywności podłoża C_x, C_z, C_{φ}, określanymi dla przesuwu poziomego, pionowego i obrotu. Tarcza ta wykonuje małe drgania w płaszczyźnie xz (rys. 1), będące rezultatem nakładania się drgań poziomych, pionowych oraz wahadłowych. Jest to układ o trzech stopniach swobody dynamicznej. Ruch tarczy można opisać układem równań (1), podanym m.in. w pracach [1, 2].

$$\begin{aligned} &M\ddot{u}_C + C_x F u_C + C_x F h \varphi_y = 0, \\ &M\ddot{w}_c + C_z F w_c - C_z F e \varphi_y = 0, \\ &\theta_y \ddot{\varphi}_y + C_x F h u_c - C_z F e w_c + (R_y + C_x F h^2 + C_z F e^2)\varphi_y = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

M – masa ciała; F – powierzchnia podstawy; θ_y – moment bezwładności masy ciała względem osi y przechodzącej przez środek ciężkości ciała C, prostopadle do płaszczyzny rysunku (por. rys. 1); u_c, w_c – składowe przemieszczenia środka ciężkości ciała wzdłuż osi x, z; C_x, C_y, R_y – współczynniki sztywności podłoża ($R_y = C_\phi Io$); Io – biegunowy moment bezwładności podstawy ciała, φ_y – kąt obrotu ciała względem podłoża, e, h – współrzędne środka ciężkości O podstawy ciała.



Rys. 1. Schemat ciała przyjęty do obliczeń dynamicznych
Fig.1. Body diagram applied to calculations

Podstawiając do układu (1) zależności

$$u_c = A_1 \sin(\omega t), \qquad w_c = A_2 \sin(\omega t), \qquad \varphi_y = A_3 \sin(\omega t),$$

otrzyma się równanie częstości kołowych własnych, w następującej postaci (por. [1, 2])

$$\omega^6 - q \cdot \omega^4 + r\omega^2 - s = 0, \tag{2}$$

gdzie:

$$q = \omega_x^2 + \omega_z^2 + \omega_\varphi^2,$$

$$r = (\omega_x^2 + \omega_z^2)\omega_\varphi^2 + \omega_x^2\omega_z^2 - \omega_x^4 \frac{h^2}{\rho_y^2} - \omega_z^4 \frac{e^2}{\rho_y^2},$$

$$s = \omega_x^2\omega_z^2\omega_\varphi^2 - \omega_x^4\omega_z^2 \frac{h^2}{\rho_y^2} - \omega_z^4\omega_x^2 \frac{e^2}{\rho_y^2},$$

$$\omega_x^2 = \frac{C_x F}{M}; \; \omega_z^2 = \frac{C_z F}{M},$$

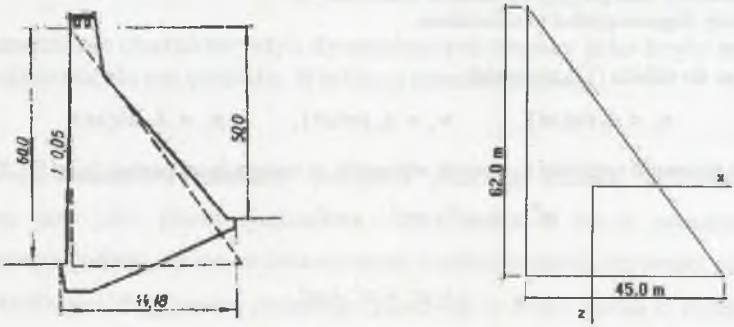
$$\omega_\varphi^2 = \frac{1}{\theta_y}(R_y + C_x F h^2 + C_z F e^2); \; \rho_y^2 = \frac{\theta_c}{M}.$$

Wyliczając pierwiastki równania (2), uzyskuje się kwadraty trzech głównych częstości kołowych własnych zapory ω_i^2 (i = 1, 2, 3), które można interpretować jako drgania wokół trzech środków (centrów) drgań głównych $O_1(x_1, z_1)$, $O_2(x_2, z_2)$, $O_3(x_3, z_3)$, będących śladami drgań głównych w płaszczyźnie xz.

Przyjęcie modelu obliczeniowego zapory jako bryły sztywnej, posadowionej na odkształcalnym podłożu, uzależnia wyniki obliczeń od właściwości sprężystych podłoża. W modelu tym pomija się odkształcenia konstrukcji zapory.

3. Modele obliczeniowe MES

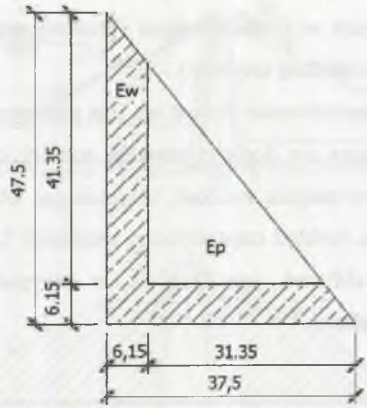
W przypadku zapór monolitycznych typowe przekroje poprzeczne segmentów (sekcji) zapór można aproksymować trójkątami, które dość dobrze modelują rzeczywistą geometrię przekroju. Sposób zamiany typowego przekroju poprzecznego zapory na zastępczy przekrój obliczeniowy przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Przyjęcie zastępczego schematu obliczeniowego (zapora monolityczna)
Fig. 2. Acceptance of the substitute calculation diagram (gravity dam)

Aby rozeznać problem obliczeniowy, rozważono dwa schematy zastępcze: zapory betonowej o zróżnicowanej klasie betonu (zapora w Rożnowie) oraz zapory ziemnej z rdzeniem ziemnym (zapora w Czorsztynie – Niedzicy).

W pierwszym przypadku, przekrój poprzeczny podzielono na dwie strefy: od strony wody górnej umiejscowiono beton wyższej klasy (E_w), natomiast od strony wody dolnej klasa betonu (E_p) była niższa. Klasy betonu zmieniano od B 7,5 do B 30 w proporcjach geometrycznych jak na rys. 3.



Rys.3. Modelowe zróżnicowanie jakości betonu dla zapory w Rożnowie
Fig.3. Concrete properties diversification for Rożnów dam

Do analizy przyjęto dwa schematy obliczeniowe: tarczy sprężystej na podłożu sprężystym oraz tarczy sprężystej na podłożu sztywnym. Obliczenia wykonano programem Robot Millennium, przyjmując następujące wartości współczynników sprężystości podpór: K_x = 63000[kN/m^2], K_z = 90000[kN/m^2], H_y = 180000[kNm/rad], gdzie: K_x, K_z współczynniki sprężystości podpór w kierunku osi x i z; natomiast H_y rotacyjny współczynnik sprężystości podpór w kierunku osi y (por. [8]). Elementy zapory zostały zamodelowane jako 4-węzłowe elementy czworokątne o 2 stopniach swobody, uogólniony problem własny został rozwiązany metodą blokowej iteracji podprzestrzennej [8].

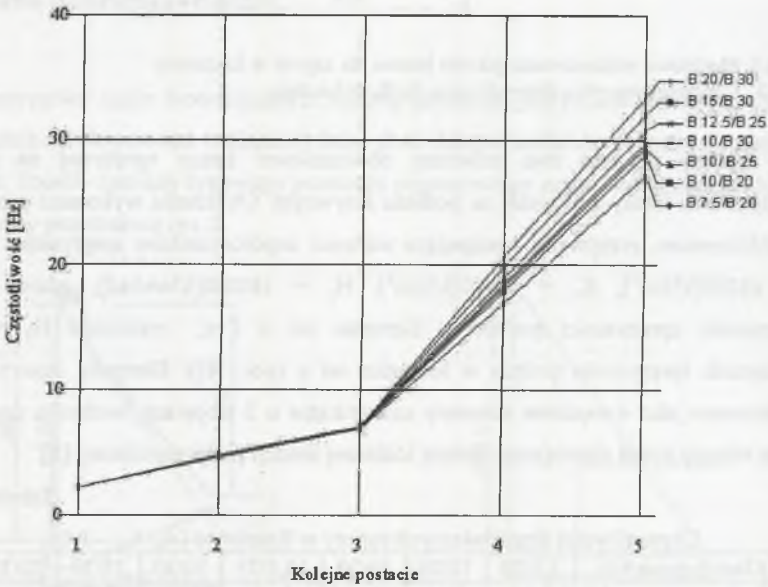
Tabela 1

Częstotliwości drgań własnych zapory w Rożnowie (A_p/A_w - 1:1)

Klasa betonu		7,5/20	10/20	10/25	12,5/25	10/30	15/30	20/30
Podłoże podatne	1	2,16	2,18	2,18	2,19	2,19	2,2	2,2
	2	4,69	4,72	4,72	4,73	4,73	4,73	4,74
	3	6,85	6,92	6,94	6,97	6,96	7,01	7,03
	4	16,93	17,93	18,27	19	18,52	19,82	20,65
	5	27,10	28,86	29,39	30,66	29,77	32,03	33,44
Podłoże niepodatne	1	8,13	8,6	8,82	9,15	8,98	9,58	9,96
	2	18,74	19,81	20,34	21,09	20,72	22,06	22,86
	3	21,34	22,54	23,14	24,01	23,6	25,13	26,2
	4	32,45	34,1	35,13	36,25	35,88	37,89	39,12
	5	46,19	49,36	50,48	52,59	51,24	55,05	57,01

Analizując wyniki obliczeń, można zauważyć, iż dana częstotliwość własna wzrasta w miarę zmniejszania się różnicy w klasach betonu (przekrój poprzeczny staje się bardziej jednorodny, a co za tym idzie bardziej sztywny).

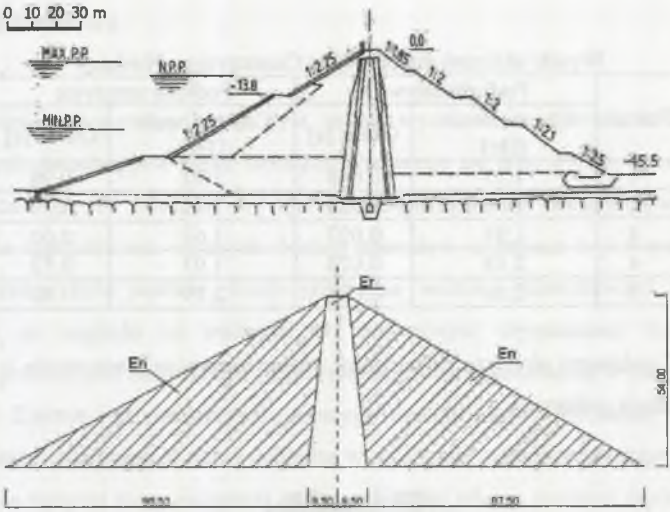
Dla pierwszych trzech częstotliwości wzrost ten jest praktycznie niezauważalny. Wpływ zróżnicowania betonu zaznacza się dopiero powyżej trzeciej częstotliwości własnej (por. rys.4). Można postawić w tym miejscu wniosek, iż różnicując właściwości betonu, można w pewnym stopniu wpływać na rozkład częstotliwości własnych. Drugim ważnym wnioskiem wypływającym z analizy obliczeń jest fakt, iż w przypadku zapór konieczne jest uwzględnienie podatności podłoża.



Rys. 4. Wpływ zróżnicowania klasy betonu na częstotliwości własne
Fig. 4. Influence of the concrete class diversification for natural frequency

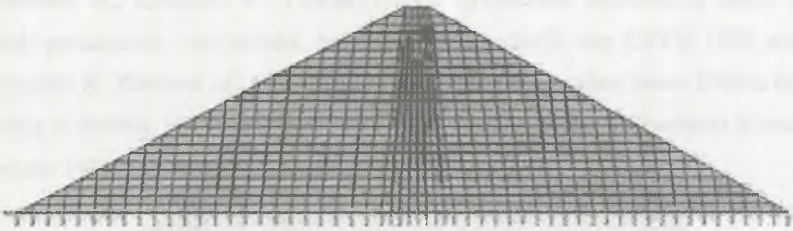
W dalszej kolejności na przykładzie zapory w Czorsztynie – Niedzicy rozważono zaporę ziemną z rdzeniem ziemnym. Zarówno rdzeń, zbudowany z gliny, jak i korpus zapory, złożony z gruboziarnistych żwirów, charakteryzowały się wskaźnikiem zagęszczenia $I_s > 0,95$ [6]; różne były gęstości, które wynosiły odpowiednio $\rho_s = 26,7$ [kN/m^3] w przypadku rdzenia, oraz $\rho_s = 26,5$ [kN/m^3] w odniesieniu do korpusu.

Rozważając typowy przekrój przez zaporę, zaproponowano do wstępnych analiz zastępczy przekrój poprzeczny przyjęty w sposób analogiczny do zapory monolitycznej.



Rys. 5. Przyjęcie zastępczego przekroju poprzecznego (zapora ziemna)
Fig. 5. Acceptance of the substitute calculation diagram (earth dam)

Do obliczeń przyjęto: Er = 70 [MPa], En = 230 [MPa], K_x = 54600 [kN/m^2], K_z = 78000 [kN/m^2], H_y = 156000 [kNm/rad]. Podział na elementy skończone (analogiczne jak w przypadku zapory betonowej) pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Podział na elementy skończone
Fig. 6. Finite elements division

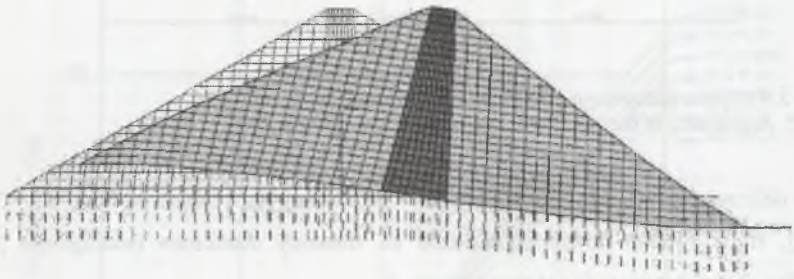
Obliczenia potwierdziły zależność częstotliwości własnych od podatności podłoża. Dla podłoża bardziej podatnego częstotliwości drgań własnych są niższe, co pokazuje tabela 2. Wpływ podatności podłoża jest jednak zdecydowanie mniejszy niż w przypadku zapór monolitycznych.

Tabela 2

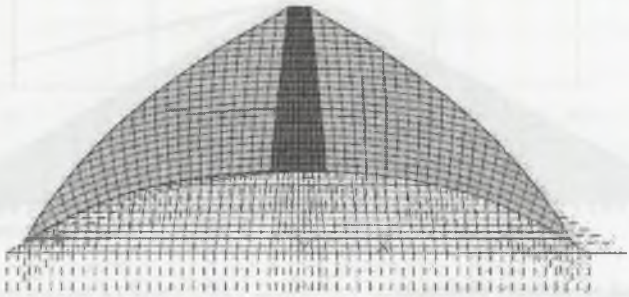
Wyniki obliczeń dla zapory w Czorsztynie - Niedzicy

Postać	Podłoże sztywne		Podłoże sprężyste	
	Częstotliwość [Hz]	Okres [s]	Częstotliwość [Hz]	Okres [s]
1	1.15	0.048	1.02	0.98
2	1.66	0.028	1.40	0.71
3	1.95	0.027	1.67	0.60
4	2.18	0.028	1.93	0.52
5	2.63	0.028	2.19	0.46

Na rys. 7 pokazano pierwsze dwie formy własne zapory w Czorsztynie – Niedzicy w przypadku podłoża podatnego.



Postać 1 (1.02 Hz)



Postać 2 (1.40 Hz)

Rys. 7. Wybrane postacie drgań własnych zapory w Czorsztynie –Niedzicy
Fig. 7. Selected free vibrations shapes Czorsztyn – Niedzica dam

4. Uwagi końcowe

Przedmiotem powyższej pracy była próba wyznaczenia wybranych charakterystyk dynamicznych dwóch typów zapór wodnych. Przyjmuje się jako wyjściowy model podłoża nieodkształcalnego. W stosunku do tego rozważenie podłoża odkształcalnego powoduje zmniejszenie częstotliwości własnych. Można zauważyć, iż zmiana ta jest tym większa, im bardziej podatne było podłoże. Ścisłe obliczenie wartości częstotliwości własnych jest niemożliwe ze względu na trudności w precyzyjnym wyznaczeniu współczynników podatności podłoża pod fundamentem zapory oraz pewne uproszczenia w przyjętym modelu konstrukcji. Celowe jest poszukiwanie lepszego modelu zapory betonowej lub ziemnej z rdzeniem, umożliwiającego w miarę dokładne wyznaczenie spektrum własnego takiej zapory, oraz zbadanie wpływu masy związanej na częstotliwości własne zarówno zapór betonowych, jak i ziemnych.

LITERATURA

1. Blarowski A.: Drgania własne betonowych zapór masywnych, Materiały sympozjum „Wpływy sejsmiczne na budowle", Wyd. monograficzne, Kraków 1979.
2. Blarowski A., Ciesielski R.: Charakterystyki dynamiczne betonowych zapór ciężkich Polski południowo – wschodniej, Archiwum Hydrotechniki, tom XXVII, 1980, zeszyt 4.
3. Ciesielski R., Pieronek M.: Badanie wpływu eksploatacji kamieniołomu Bóbrka na zaporę wodną w Solinie, Opracowanie Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Kraków 1970.
4. Ciesielski R., O identyfikacji parametrów dynamicznych budowli, Inżynieria i Budownictwo, Nr 4/2001.
5. Chmielewski T., Zembaty Z.: Podstawy dynamiki budowli, Arkady, Warszawa 1998.
6. Marczewski J. Założenia konstrukcyjne i realizacja zapory Czorsztyn, Wydawnictwo konferencji organizowanej przez Sekcję Konstrukcji Hydrotechnicznych KILiW PAN, Klimkówka 1995.
7. The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering: Some recent earthquake engineering research and practice in Japan, Tokyo, Japan, 1973.

8. Robot Millennium - Podręcznik użytkownika, RoboBAT, Kraków 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Marian Klasztorny, prof. Politechniki Warszawskiej

Abstract

The paper describes selected problems connected with dynamic analysis of concrete and earth dams. Determining an adequate dynamic model is difficult due problems with adequate estimation of dynamic soil factors (C_x, C_z and C_ϕ) as well as selection of analytic models.

Further similar research is planed including special cases of vibration excitation and taking into account coupled vibrating.