

(85) フィルダムの3次元動的解析のための簡易手法

東京工業大学 正会員 ○大町産夫
同 正会員 時松孝次

はじめに

我が国の大ダム地点は急峻な溪谷に選定されることが多く、ダム基礎には規模の大小はあるものの断層や破碎帯あるいは未固結堆積物などが分布し、基礎の一体性を損う場合が多い。したがって、合理的なダムの耐震設計手法はこれらの現実的な地形・地質条件をとり込み、それらがダムの振動性状に及ぼす効果を適正に評価することができると同時に、実用性の高いことが必要であろう。

この観点から、筆者らは実用性の高い簡便なフィルダムの3次元動的解析手法を開発した⁽¹⁾⁽²⁾。この手法は、ダムの耐震性を検討する上で最も重要と考えられる上下流方向振動ではせん断変形が卓越すると仮定してダムを有限長の変断面せん断よりで近似し、ダム軸横断面の振動形状を与えて解くものである。本報では、アースダムを対象にその固有振動数・振動形状を求める解析手法の概略を示すと共に、通常の3次元有限要素解と本手法による解を比較して手法の妥当性を検討した例を示す。

解析手法の概要

Fig. 1 に示すように、ダム軸方向にx軸、上下流方向にy軸、鉛直方向にz軸をそれぞれ右手直交系となるように定める。ダム軸に直交する鉛直面でダムを有限個に分割し、その分割要素 j の両端面の高さを H_i, H_j 、ダム頂の長さを l とする。三角形要素 j において断面 i からxの距離にあるダム頂上下流方向変位 $v(x, 0)$ を要素両端におけるダム頂変位 u_i, u_j を用いて次式で表す。

$$v(x, 0) = SC\delta \quad (1)$$

$$\text{ここに } S = \begin{bmatrix} 1 & x \\ -1/l & 1/l \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/l & 1/l \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\delta = [u_i \quad u_j]^T$$

であり、Tは転置を表す。

ダム頂での変位 $v(x, 0)$ と横断面内中立軸の振動形状 $f(x, z)$ が与えられれば、ダム内中立軸上の任意の点での変位 $v(x, z)$ は次式で表現できる。(Fig. 1(c) 参照)

$$v(x, z) = v(x, 0) f(x, z) \quad (3)$$

ここで $f(x, z)$ は次の境界条件を満足する必要がある。

$$f(x, 0) = 1, \quad f(x, H_x) = 0 \quad (4)$$

ただし、 H_x はダム横断面の高さであり

$$H_x = H_i + \frac{x}{l} (H_j - H_i) \quad (5)$$

と書くことができる。

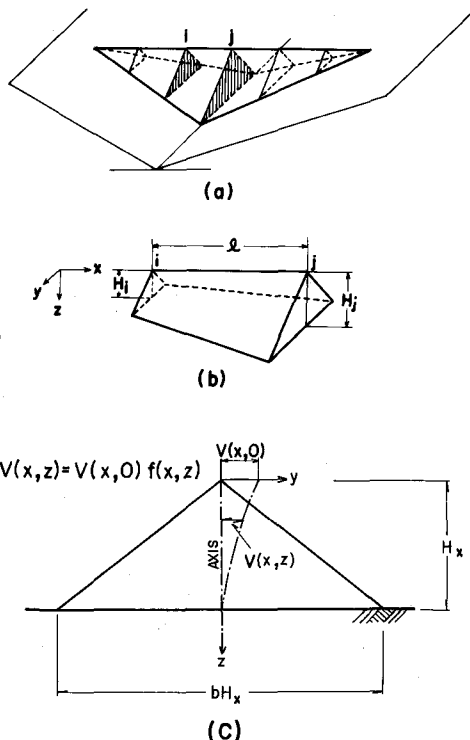


Fig. 1 解析に用いたアースダムモデル

式(1)~(5)より、要素のひずみベクトル $\gamma = [\gamma_{xy} \ \gamma_{yz}]^T = [\partial v / \partial x \ \partial v / \partial z]^T$ は次式で表わせる。

$$\gamma = B C d \quad (6)$$

ここで $B = \begin{bmatrix} f_x(x, z) & f(x, z) + x f_x(x, z) \\ f_z(x, z) & x f_z(x, z) \end{bmatrix}, \quad f_x(x, z) = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad f_z(x, z) = \frac{\partial f}{\partial z} \quad (7)$

したがって、要素剛性マトリックス k_e は次式のようになる。

$$\begin{aligned} k_e &= \int C^T B^T D B C d(vol) \\ &= \left\{ \int G f^2(x, z) C^T N^T N C d(vol) + \int G f(x, z) f_x(x, z) C^T (N^T S + S^T N) d(vol) \right. \\ &\quad \left. + \int G f_x^2(x, z) C^T S^T S C d(vol) + \int G f_z^2(x, z) C^T S^T S C d(vol) \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

上式の積分は要素に関する体積積分を意味し、マトリックス N, D は、それぞれ次式で表わせる。

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8)の各項を第1項から順に、 $k_{e1}, k_{e2}, k_{e3}, k_{e4}$ とおけば、 $k_e = k_{e1} + k_{e2} + k_{e3} + k_{e4}$ と表わすことができる。

また、要素質量マトリックス m はダム材料の密度を ρ とすれば次式で表わせる。

$$m = \int \rho f^2(x, z) C^T S^T S C d(vol) \quad (10)$$

全要素について k_e, m マトリックスが定められれば、それらを適宜重畳することにより構造全体に関するマトリックス K, M が求められる。固有円振動数を P 、ダム頂の各節点の変位ベクトルを X とすれば、非減衰系のダムの固有振動数と固有振動形は、次式を固有値問題として解くことにより求められる。

$$[K - P^2 M] X = 0 \quad (11)$$

ダム軸横断面内の振動形状

先に述べた簡易解法はダム軸横断面内の振動形が既知であるという前提に基づいている。従って本解析法の解の精度は、この振動形状として現実的な形状を採用し得るか否かに依存する。

自然地震観測、常時微動観測、正弦波起振実験および破壊振動測定など^{3)~9)}により明らかにされたダム軸横断面の上下流方向水平1次振動形を Fig. 2 に示す。図の横軸は最大振幅を1に基準化した振幅であり、縦軸はダム高で基準化したダム頂からの深さである。

図中の太い実線はダムを2次元楔形せん断ざりとし、せん断剛性がダム内部で一定の場合(即ち $G = \text{const.}$) 及び深さに比例するとした場合(即ち $G = G_0 z$) の振動形を示している。図から分るように実ダムの振動形はダム高の2/3 1/4 以上で変形が急増する形を呈しており、1次の振動形のみならず、剛性を一定と考えるよりは深さと共に剛性が増加すると考えた

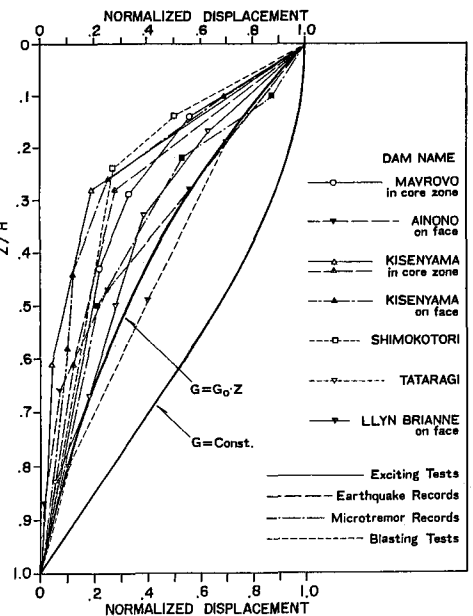


Fig. 2 フィルダムの上下流方向1次振動形

方が妥当であることが分る。また、ダム内の弾性波速度の測定でも、ダムのせん断剛性 G は、 $G = a z^b$ の形で表わることが報告されている。¹¹⁾¹²⁾ したがって、本報告ではダムのせん断剛性がダム内で一定の場合($G = \text{const.}$)とダム頂からの深さに比例して増加する場合($G = G_0 z$)について考えた。

ダムを2次元楔形せん断ばねと見なし剛性率分布が前述のように与えられるとき、木平面内のせん断応力分布を一樣と仮定すれば、ダム軸横断面の非減衰固有振動形状 $f(x, z)$ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} G = \text{const. の時} \quad f(x, z) &= J_0(\zeta) \\ G = G_0 z \quad \text{の時} \quad f(x, z) &= \frac{2}{\sqrt{\zeta}} J_1(\sqrt{\zeta}) \end{aligned} \right\}, \quad \zeta = \frac{z_m z}{H x} \quad (12)$$

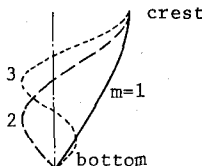
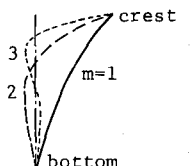
ここで J_0, J_1 は、0次及び1次の第1種ベッセル関数であり、各 z_m は $J_0(z) = 0$ あるいは $J_1(\sqrt{z}) = 0$ となる m 番目の0点の値である。

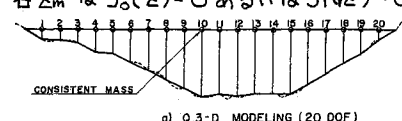
式(8)~(10)に式(12)を代入して得られる要素剛性マトリックスと質量マトリックスを Table 1 に示す。なお該導過程の詳細は文献1)2)を参照されたい。

固有振動数と固有振動モード

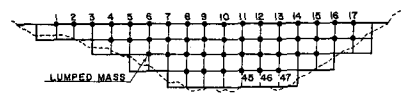
本解析の妥当性を、W.O. Keightley¹³⁾ によって報告された Bouquet Canyon Dam の正弦波起振実験と比較検討してみる。このダムは、表面応水壁型アースダムで、ダム頂の長さ363m、ダム高66.4m、ノリ面勾配1:3、深さ8.5mの地点でのS波速度は387m/秒である。解析では、ダムを Fig. 3(a) に示すようにダム軸直断面で21要素に分割し20自由度で、固有振動数及びダム頂の上下流方向振動モードを求めた。

Table 1 本手法で用いた要素剛性・質量マトリックス

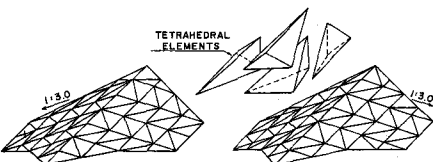
	$G = \text{constant}$		$G = G_0 z$	
Shape Function $f(x, z)$	$J_0(\zeta)$		$\frac{2}{\sqrt{\zeta}} J_1(\sqrt{\zeta})$	
z_m Values	z_1 2.405 z_2 5.520 z_3 8.654		14.68 49.22 103.50	
Stiffness Matrix, k	k_1	$G_k \frac{H_1^2 + H_2^2 + H_1 H_2}{\ell^2} \begin{bmatrix} 2 & -2 \\ -2 & 2 \end{bmatrix}$	$20G_0 \eta (H_1^3 + H_1^2 H_2 + H_1 H_2^2 + H_2^3) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$	
	k_2	$G_k / \ell^2 \begin{bmatrix} 2(2H_1^2 - H_1 H_2 - H_2^2) & 2H_1 H_2 - H_1^2 - H_2^2 \\ 2H_1 H_2 - H_1^2 - H_2^2 & 2(2H_2^2 - H_1 H_2 - H_1^2) \end{bmatrix}$	$20G_0 \eta (H_1 + H_2) \begin{bmatrix} 3H_1^2 + H_2^2 + 2H_1 H_2 & -(H_1^2 - H_2^2) \\ -(H_1^2 - H_2^2) & -(H_1^2 + 3H_2^2 + 2H_1 H_2) \end{bmatrix}$	
	k_3	$G_k (4 + z_m^2) \frac{(H_1 - H_2)^2}{\ell^2} \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 1/3 & 2/3 \end{bmatrix}$	$G_0 \eta (16 + z_m) (H_1 - H_2)^2 \begin{bmatrix} 3H_1 + H_2 & H_1 + H_2 \\ H_1 + H_2 & H_1 + 3H_2 \end{bmatrix}$	
	k_4	$G_k z_m^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$	$5G_0 \eta \ell^2 z_m \begin{bmatrix} 3H_1 + H_2 & H_1 + H_2 \\ H_1 + H_2 & H_1 + 3H_2 \end{bmatrix}$	
Mass Matrix, m		$\rho K \begin{bmatrix} (6H_1^2 + H_2^2 + 3H_1 H_2)/5 & (3H_1^2 + 3H_2^2 + 4H_1 H_2)/10 \\ (3H_1^2 + 3H_2^2 + 4H_1 H_2)/10 & (H_1^2 + 6H_2^2 + 3H_1 H_2)/5 \end{bmatrix}$	$4\rho \eta \ell^2 \begin{bmatrix} 2(6H_1^2 + H_2^2 + 3H_1 H_2) & 3H_1^2 + 3H_2^2 + 4H_1 H_2 \\ 3H_1^2 + 3H_2^2 + 4H_1 H_2 & 2(H_1^2 + 6H_2^2 + 3H_1 H_2) \end{bmatrix}$	
		$\kappa = b \ell J_1^2(z_m)/12$	$\eta = b J_0^2(\sqrt{z_m})/(60 \ell z_m)$	



a) 3-D MODELING (20 DOF)



b) 47 DOF S-W MODELING



c) 3-D F.E.M. MODELING (111 DOF)

Fig. 3 ダムの解析モデル

Fig. 4には、同ダムで観測された固有振動数に、小さいものから順に番号をつけて示している。また、図には本解析による結果及びG.A. Frazier¹⁴⁾によって計算された3次元有限要素法など（Fig. 3 (b)(c) 参照）の結果も示している。この図から固有振動数に関して、本解析結果は観測結果と比較的良好に対応するとともに、わずか20自由度で111自由度の3次元有限要素法で得られた結果と同程度の精度があることが分る。なお、図中にたとえば(1,2)モードとはダム軸横断面内では1次モード、ダム軸方向では2次モードで振動するモードを意味する。

Fig. 5は、ダム軸方向1次および2次振動モードについて、同様の比較を行ったものであるが、ダムの固有振動形に關しても本解析法は3次元有限要素法による解と同程度の精度で観測結果と良く合うことが分る。

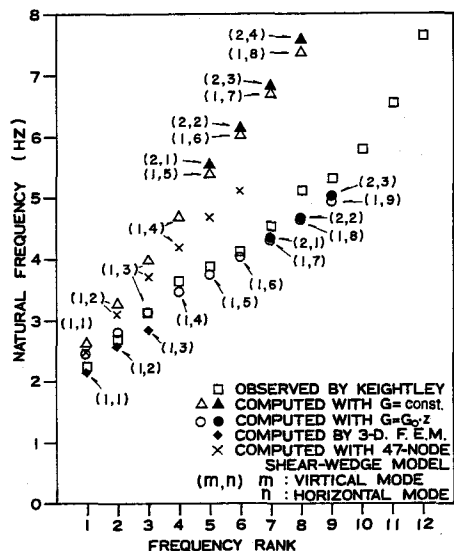


Fig. 4 計算及び観測で求められた固有振動数

おわりに

ダムの鉛直方向の振動モードを既知として解く本解析手法により、3次元的なフィルダムの振動数や振動モードを、3次元有限要素法に比べわずかの自由度で、しかも実用上充分の精度を保って求められることが示された。また、本手法はダム軸方向及び鉛直方向の振動に關しても適用することが可能である。

今後、さらに非線型性や非定常応答の問題を克服するよう解析法を拡張することにより、より実用性の高い解析手法になると考えられる。

なお、本研究の一部は、東京工業大学土木工学科卒業生であった超智武雄君によるところが大きい。記して謝意を表する。

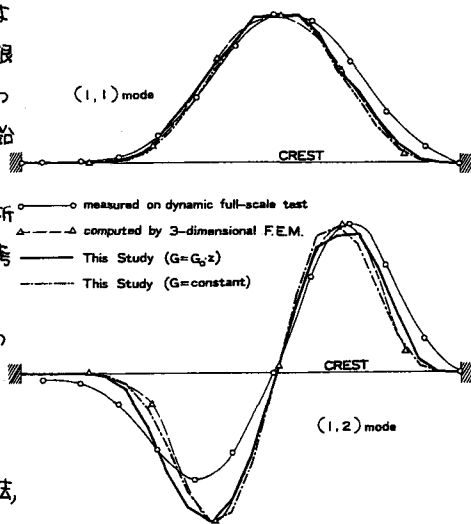


Fig. 5 ダム軸方向振動モード

参考文献

- 1) 大野達夫: フィルダムの3次元振動モードに関する実用的解法, 東京工業大学土木工学科研究報告 No. 26, pp. 125-136, 1980.
- 2) 大野達夫, 時松孝次, 超智武雄: 有限せん断ばりモデルによる3次元アースダムの振動解析, 東京工業大学土木工学科研究報告 No. 27, pp. 123-149, 1980.
- 3) 河上房義, 柳沢栄司, 森 芳信: フィルダムの安定解析における地震力のとり方と問題点, 土と基礎, Vol. 23, No. 267, pp. 21-26, 1975.
- 4) 国生剛治他: フィルタイプダムの動特性—起振実験による喜望山ダムの振動特性—, 電力中央研究所報告, No. 73539, 1973.
- 5) 増子芳天他: フィルダムの動特性(常時微動観測による喜望山ダムの振動特性), 電力中央研究所報告, No. 72555.
- 6) R.T. Severn et al: Prototype Dynamic Studies on a Rockfill Dam and on a Butress Dam, 13th ICOLD, 1979.
- 7) T. Takahashi et al: Study on Dynamic Behaviors of Rockfill Dams, 第4回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 687-694, 1975.
- 8) 河上房義他: フィルタイプダムの振動特性, 第7回工電工学研究発表会講演集, pp. 567-570, 1972.
- 9) J. Petrovski et al: Dynamic Full-Scale Test of an Earthfill Dam, Géotechnique 24, No. 2, pp. 193-206.
- 10) 沢田善博他: 弾性波動に基づく喜望山ダムの内部物性分布とその経年変化, 電力中央研究所報告, No. 73539.
- 11) Y. Sawada et al: Study on the Material Properties and Earthquake Behaviors on Rockfill Dams, 第4回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 695-702, 1975.
- 12) W.O. Kelghtley: Vibrational Characteristics of an Earth Dam, B.S.S.A., Vol. 56, No. 6, 1969.
- 13) G.A. Frazier: Vibration Characteristics of Three Dimensional Solids with Application to Earth Dams, ph.D thesis MSU 69.