

(56) 3次元フィルダムの鉛直ダム軸方向振動について

島根県庁 正会員 ○岡 利文
東京工業大学 正会員 大町達夫

1. はじめに

フィルダムの振動特性に関する研究では、近年ダムの兩岸地山の拘束効果を評価し得る3次元動的解析も試みられているが、ダム軸直交方向の振動に主たる関心が向けられており、他の方向の振動を含めた3次元振動についてはあまり報告されていない。²⁾³⁾ またフィルダムの震害例の大半をなしているダム頂部の縦クラックの発生機構については、これまで十分な説明がなされていない。これらの点からも鉛直、ダム軸方向の振動を含めたフィルダムの3次元振動に関する検討が必要と思われる。そこで本研究は、実在ダムの常時微動測定を行なうと共に、室内における3次元小型弾性模型の振動実験および数値解析を行ない、フィルダムの鉛直、ダム軸方向振動を中心に振動性状を詳細に調べた結果について述べる。

2. 実在ダムの常時微動測定

常時微動測定を行ったのは、Fig.1に示す二居ダム（新潟県信濃川水系清津川、堤高87m、堤長280m、中央土質遮水壁型ロックフィルダム）であり、ダム天端3点に3台の微動形を設置し、ダム軸及びダム軸直交方向の微動を測定した。測定して得られた微動の波形とそのフーリエスペクトルをそれぞれFig.2、Fig.3に示す。これらのフーリエスペクトルより、1次固有振動数と考えられる卓越振動数は、ダム軸直交方向2.5Hz、ダム軸方向2.7Hzである。また、これより高次の固有振動数もかなり接近して存在することが推察される。

3. 弾性模型振動実験

フィルダムの低次モードの振動性状をさらに詳しく調べるため、透明で弾性的な材料（アクリルアミドゲル、 ν 約1.5m/s、 $\rho = 1.08\text{g/cm}^3$ 、水分95%）を用いて、Fig.4のようなダム模型を製作し、これを振動台に載せ、入力振動数を変えながらダム軸直交方向、ダム軸方向の2方向に水平加振を行った。実験を行った項目は、

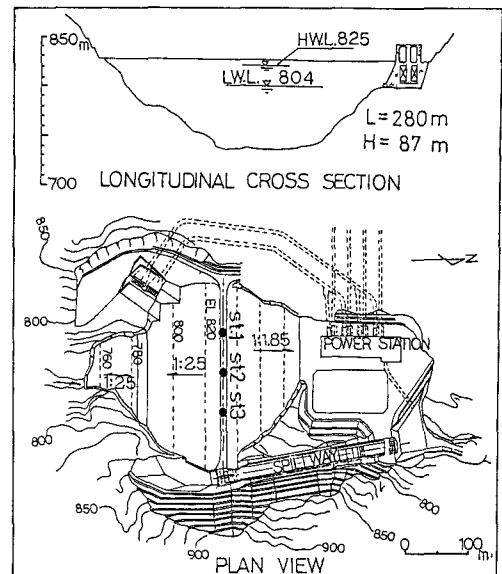


Fig.1 OUTLINE OF FUTAI DAM

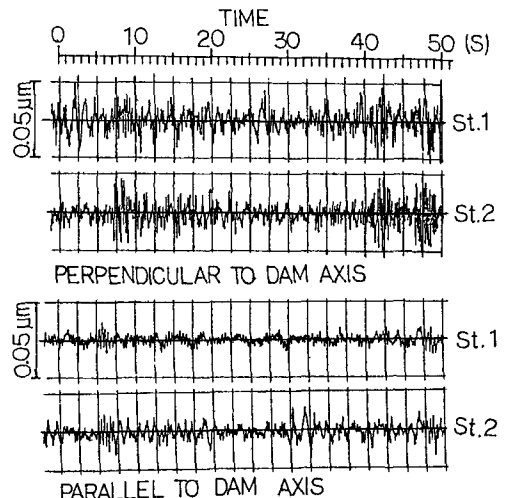


Fig.2 MICRO TREMOR

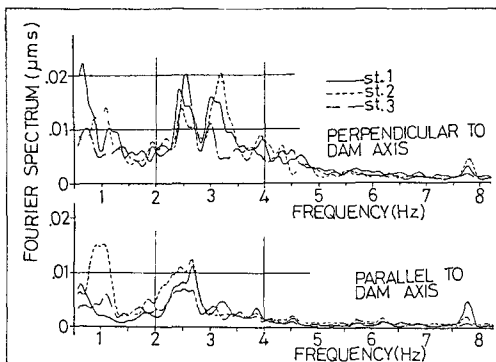


Fig.3 FOURIER SPECTRUM OF OBSERVED MICRO TREMOR

次のとおりである。

- (1) ダム軸を含む鉛直な中立面内及び表面に振動を拘束しないような細いゴム糸を格子状に張り、この振動形を写真撮影することにより、共振振動形を測定した。
- (2) ダム頂の3点及び支持材に小型圧電式加速度計(1.2gf, $\phi=6\text{mm}$, $l=10\text{mm}$)を設置し、入力振動数を変えながらダム頂での応答を測定した。

4. 解析手法の概要

解析手法は、模型実験でダム全体としての振動が低次では、ダム軸直交方向とそれ以外の方向に分離できることを確認したので、これに基づき比較的小さい自由度で3次元振動を解析し得る有限要素モデルである。モデルの概要は、(1) ダム全体の振動をダム軸直交方向とダム軸及び鉛直方向の2つに分離し、ダム軸直交方向振動ではせん断振動のみを考え、それ以外の方向の振動では、せん断変形と体積変形の両方を考慮する。(2) 要素はフィルダムを中立面に関し格子状に分割して得られる四角柱要素である。(3) 要素剛性及び要素質量マトリクスを求める際の要素内の変位分布は、要素の4辺の変位補間関数を用いて次のように表わす。

ダム軸直交方向の場合、(Fig. 5)

- (i) 鉛直2点間(①～②, ③～④)の変位補間関数を求める。
- (ii) 水平2点間(①～③, ②～④)の変位補間関数を求める。
- (iii) 要素内の変位補間関数を(i)の補間関数と(ii)を用いてさらに補間することにより

$$V(x, z) = V_{12}(z) + \{V_{34}(z) - V_{12}(z)\} \frac{x}{l} \quad \text{--- ①}$$

ここで

$$V_{12}(z) = V_1 + (V_2 - V_1)g(z)$$

$$V_{34}(z) = V_3 + (V_4 - V_3)g(z)$$

$$g(z) = \frac{\int_{z_i}^{z_i+z'} \frac{dz}{GZ}}{\int_{z_i}^{z_i+h} \frac{dz}{GZ}}$$

G : 深さによって可変のせん断剛性

ここで①式は、ダム軸直交方向、ダム軸方向、鉛直方向の3方向で振動を独立して扱う場合に共通なものであり、マトリクス表示すると、

$$V(x, z) = S C I H \delta_v \quad \text{--- ②}$$

$$S = [1 \ x] \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \delta_v = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

$$I H = \begin{bmatrix} 1-g(z) & g(z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-g(z) & g(z) \end{bmatrix}$$

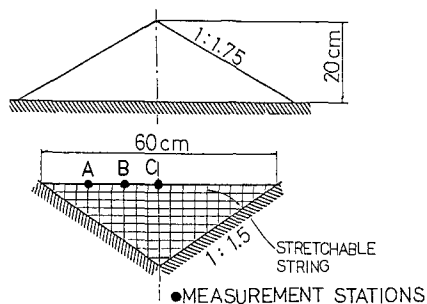
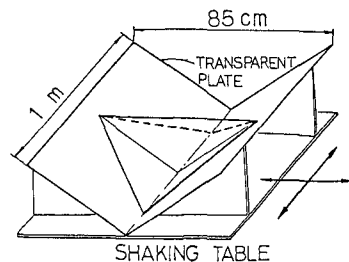
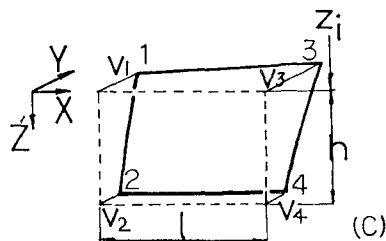
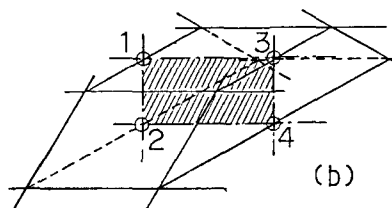
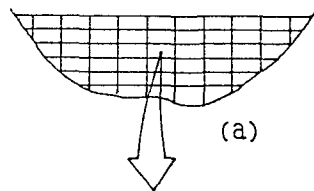


Fig. 4 MODEL EXPERIMENT



(PERPENDICULAR TO DAM AXIS)

Fig. 5 ELEMENT

鉛直及びダム軸方向の場合。

前述のようにダム軸方向の振動では、ポアソン比による側方変形を伴うのでダム軸方向・鉛直方向の振動を独立して扱えないので、Fig. 6のように考慮した。

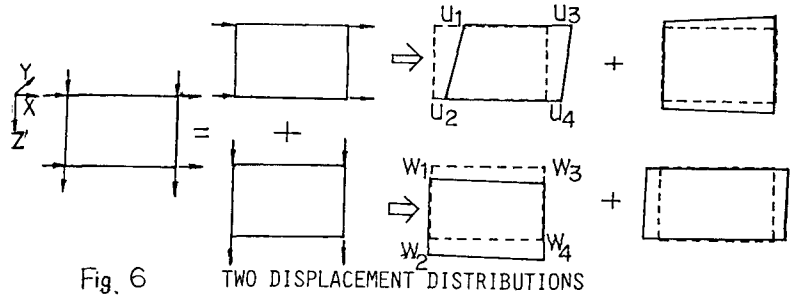


Fig. 6

TWO DISPLACEMENT DISTRIBUTIONS

(i) ダム軸及び鉛直方向に荷重が作用した時の荷重状態を2方向に分離する。

(ii) それぞれの荷重状態に対し2つの変位分布(荷重方向の変位分布と側方変位)で表わす。

(iii) 各変位分布は0式を求めると同様の扱いをする。

このようにして次のような変位分布を表わす補関関数を得る。

PERPENDICULAR TO DAM AXIS	Table 1 要素剛性・質量マトリクス	
	$K_1 = \int_V \rho \dot{C}^T G S C H dV$ $K_2 = \int_V \rho \dot{C}^T G S C H dV$	$M = \int_V \rho \dot{C}^T S^T C H dV$
PARALLEL TO DAM AXIS	$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$ $K_1 = \begin{bmatrix} K_A & K_B \\ K_B^T & K_D \end{bmatrix}$ $K_2 = \frac{2}{1-\nu} \begin{bmatrix} K_E & K_F \\ K_F^T & K_G \end{bmatrix}$ $K_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_E \end{bmatrix}$ $K_4 = \frac{2}{1-\nu} \begin{bmatrix} K_H & K_I \\ K_I^T & K_A \end{bmatrix}$	$M = M_1 + M_2$ $M_1 = \begin{bmatrix} M_A & M_B \\ M_B^T & M_D \end{bmatrix}$ $M_2 = \begin{bmatrix} M_E & M_F \\ M_F^T & M_A \end{bmatrix}$
VERTICAL AND	$K_A = \int_V \rho \dot{C}^T G S C H dV, K_B = \int_V \rho \dot{C}^T G S C J dV$ $K_D = \int_V \rho \dot{C}^T S^T C J dV, K_E = \int_V \rho \dot{C}^T G S C H dV$ $K_F = \int_V \rho \dot{C}^T G S C J dV, K_G = \int_V \rho \dot{C}^T S^T C J dV$ $K_H = \int_V \rho \dot{C}^T G G I dV, K_I = \int_V \rho \dot{C}^T G S C H dV$	$M_A = \int_V \rho \dot{C}^T S^T C H dV, M_B = \int_V \rho \dot{C}^T S^T C J dV$ $M_D = \int_V \rho \dot{C}^T S^T C J dV, M_E = \int_V \rho \dot{C}^T G G I dV$ $M_F = \int_V \rho \dot{C}^T G S C H dV$ G: セン断剛性 ρ: 密度 ν: ポアソン比

$$\begin{bmatrix} U(x,z) \\ W(x,z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S C H & S C J \\ G I & S C H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta w \end{bmatrix} \quad \text{--- ③}$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & g(z) & g(z) \end{bmatrix}$$

$$I = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} 0 & -A & 0 & A \\ B & 0 & -B & 0 \end{bmatrix}$$

$$J = \frac{1}{2} g(z) \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \int_0^h g(z) dz \quad B = \int_0^h 1 - g(z) dz = h - A$$

②③式をもとに要素剛性マトリクス・要素質量マトリクスを求めるとTable 1 のようになる。全要素について K , M マトリクスを求め、構造全体で重畳し、全体に関する $\bar{K}$, $\bar{M}$ を求めると、非減衰固有振動数 P と固有振動形は、次式の固有値問題により求まる。

$$[\bar{K} - \bar{P} \bar{M}] \mathbf{x} = 0 \quad \text{--- ④}$$

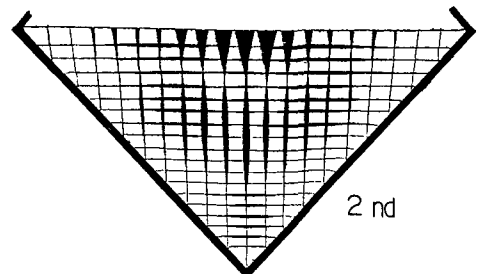
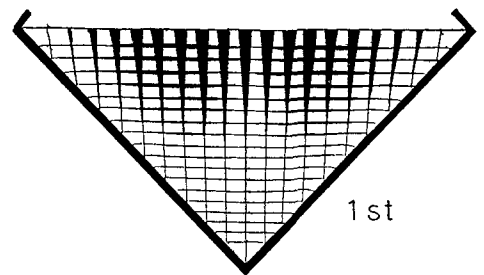


Fig. 9 OBSERVED MODE SHAPES OF SURFACE (PARALLEL TO DAM AXIS)

5. 実験結果と解析結果

Fig. 7 は模型実験で得られた共振振動形と同一模型に対し解析で得られる固有振動形の対応するものの一部を示したものである。実験した振動形は、ダムの地山に用いた透明なアクリル板の裏から撮影した写真より求めて

いる。実験結果と解析結果は固有モードで10次程度までよく対応しており、解析手法の妥当性が確認できた。

またFig. 8は、ダム軸直交方向及びダム軸方向水平加振時の実験共振曲線と計算により求めた共振曲線を示したものである。実験の曲線ではピークが多くなっているが、これは地盤に使った支持板が十分に剛でなかったためと考えられる。実験と計算の対応は特にダム軸方向の場合により。

Fig. 9は、ダム軸方向加振時のダム表面の共振振動形をダムの真上から撮影し、トレースしたものであり、図中塗りつぶした部分が変位振幅を表わしている。ダム表面上部は、ダム軸方向加振時にもさかわらずダム軸直交方向にもダム軸を中心振動しているのがわかる。ダム軸直交方向加振時には、このような加振方向と直交する変位は、低次ではほとんどみられない。

6. まとめ

以上のことから次のことが指摘できる。1) フィルダムの全体としての振動は、低次ではダム軸直交方向とそれ以外のダム軸及び鉛直方向の2つに分離できる。2) ダム軸及び鉛直方向の振動では、ポアソン比の影響を受けた振動となり、ダム軸方向の振動と鉛直方向の振動が連成したものとなる。3) これらの3次元振動は、簡単な解析モデルで十分表現し得る。

なお、本研究の常時微動測定にあたり、ご協力を賜った電源開発(株)の皆さまに謝意を表する。

参考文献

- 1) 大町達夫・時松孝次：3次元フィルダムの振動解析のための実用的モデル，土木学会論文報告集 No. 328 PP31-40，1982
- 2) Abdel-Gaffar, AM and Koh-A.S.: Longitudinal Vibration of non-homogeneous earth dams, Int J of earthq. Engineering & Str. Dyn. Vol 9, NO. 4 pp 279-305, 1981
- 3) Gazetas, G: Vertical oscillation of earth and rockfill dam: Analysis and field observation, 土質工学会論文報告集 Vol 21, NO. 4 pp 56-68, 1981.
- 4) '78 宮城県沖地震調査報告，土木学会 東北支部 PP386-396，1978
- 5) 新潟地震震害報告，土木学会，PP 773-780，1964

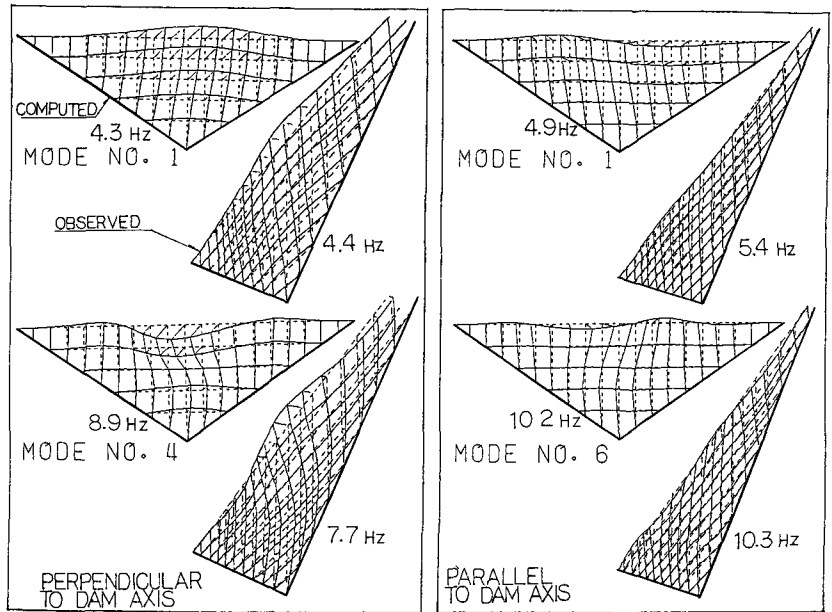


Fig. 7 OBSERVED AND COMPUTED MODE SHAPES

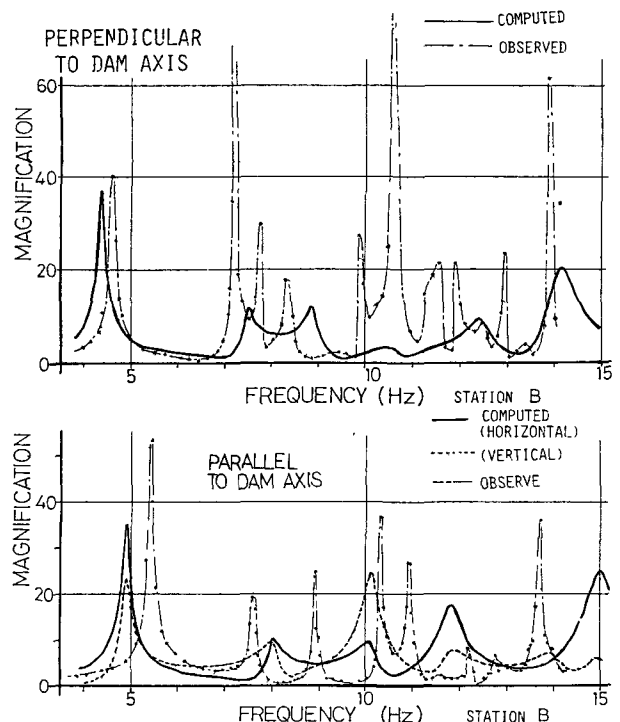


Fig. 8 RESONANCE CURVES