

谷形状を考慮したロックフィルダムの動的挙動

(株)新日本技術コンサルタント 正員 ○国井仁彦

同上

正員 蒲山 克

1. まえがき

ロックフィルダムの地震時の挙動に対して、ダムが築造されている谷の形状がどのような影響を及ぼすかを検討した例は少ない。ここでは谷形状として谷幅と谷勾配を考え、それらをバネ定数で表現し、ダムを集中質点系にモデル化するという方法を用いて、ダム上下流方向(X方向)と堤軸方向(Y方向)の卓越振動数およびモードについて検討した。検討にあたって減衰はないものとした。

2. 解析法

2.1 解析のためのモデル化

解析はダムを集中質点系にモデル化し、谷形状の影響をバネ定数で表現することにより実施した。モデル化の概念図を図1に、X方向およびY方向の断面図を図2に示す。谷形状の影響は図1に於て K_L, K_R で表わされている。X方向の振動に関しては K_L, K_R はすべてセン断バネであり、それらを xk_L, xk_R とする。Y方向の振動に関しては、 K はセン断バネであるが、 K_L, K_R は伸縮バネとなり、それらを yk_L, yk_L, yk_R とする。谷形状が左右対称の場合、バネ定数は次のようになる。

$$xk_L = yk_L = l_i L_i G_i / \Delta h$$

$$xk_R = xk_R = 2 \Delta h l_i G_i / L_i$$

$$yk_L = yk_R = 4 \Delta h l_i (1 + \nu_i) G_i / L_i$$

ここに、 l_i : X方向断面の高さ h_i でのダム幅

L_i : Y方向断面の高さ h_i でのダム幅

G_i : 高さ h_i でのセン断弾性係数

Δh : ダム高/分割数

ν_i : 高さ h_i でのポアソン比

これらのバネ定数を用いるとオシ番目の質点 m_i の運動方程式は次のようになる。

$$X\text{方向: } m_i \ddot{x}_i = -xk_L(x_i - x_{i-1}) + xk_{i+1}(x_{i+1} - x_i) - (xk_L + xk_R)x_i$$

$$Y\text{方向: } m_i \ddot{y}_i = -yk_L(y_i - y_{i-1}) + yk_{i+1}(y_{i+1} - y_i) - (yk_L + yk_R)y_i$$

2.2 解析に用いた物性値

本解析で用いた物性値を図3に示す。図3より堤体の速度分布(V_s)の上限としては $V_s = 180 \text{ cm/s}^{0.35}$ (High Vel. 分布)、下限としては $V_s = 200 \text{ cm/s}^{0.25}$ (Low Vel. 分布)を考えた。ただし Σ は天端からの深さである。以下の解析では特にことわらない限り堤体の速度分布としてはLow Vel. 分布を用いる。又、単位体積重量は 2 ton/m^3 、ポアソン比は $\nu = 0.45 - 0.006 \Sigma^{0.60}$ を用いる。

3. 解析結果

3.1 堤頂長とダム高の比がダムの振動に及ぼす影響(U字谷)

U字谷でのダム高(H)と堤頂長(L)の比とダムの卓越振動数の関係を図4に、モードを図5に示す。これよりX方向の卓越振動数は1次、2次とも L/H が4以上であればほぼ一定であるが、Y方向は1次、2次と

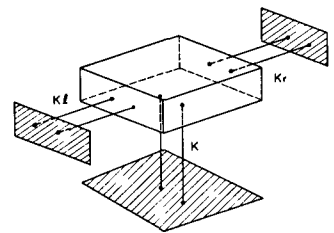
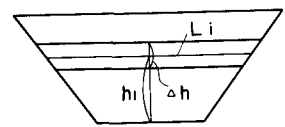


図1 概念図



(a) 上下流方向



(b) 堤軸方向

図2 ダム断面図

も L/H が 6 以上にならないと一定にならない。X 方向 1 次のモードについては L/H が 4 以上、X 方向 2 次のモードについては L/H によらずほぼ一定である。Y 方向のモードは 1 次、2 次とも L/H が 2 以上であればほぼ一定である。

3.2 谷形状がダムの振動に及ぼす影響 (U 字谷と V 字谷)

谷形状の相異がダムの振動に及ぼす影響を調べるため、卓越振動数とモードを求め、それぞれ表 1 および図 6 に示した。U 字谷に比べ V 字谷ではダムの卓越振動数は X 方向 1 次では約 10% 減少し、Y 方向 2 次では約 10% 増加するが、X 方向 2 次、Y 方向 1 次はほとんど谷形状に影響されずほぼ一定である。モードについては X、Y 方向とも谷形状にはほとんど影響されない。

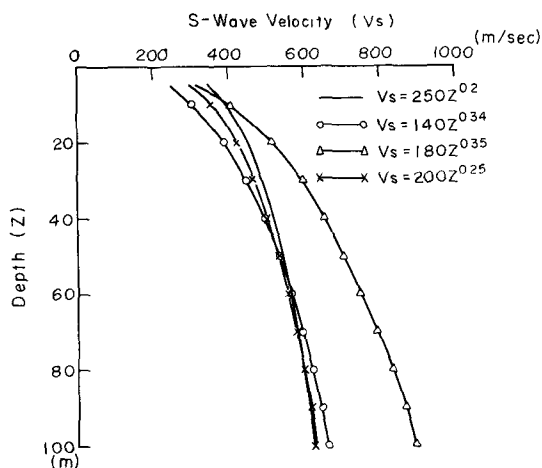


図 3 物性値

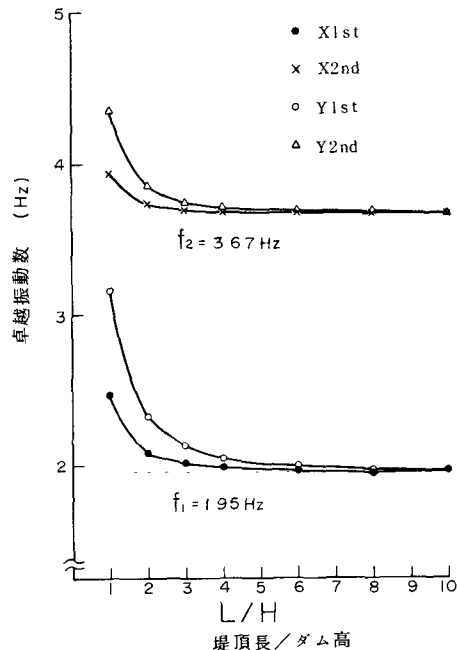


図 4 堤頂長／ダム高と卓越振動数の関係

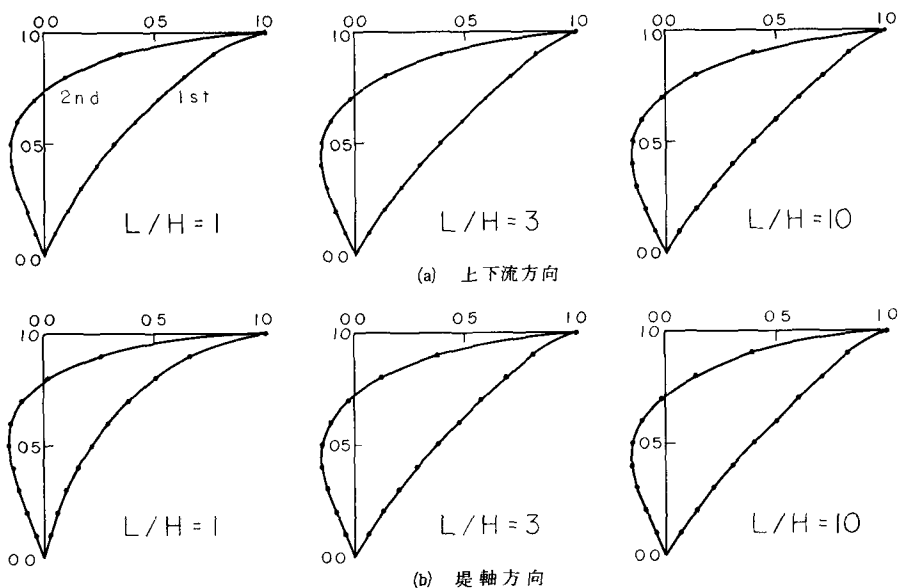


図 5 堤頂長／ダム高とモードの関係

表1 谷形状およびダム頂部物性値の変化と卓越振動数の関係

谷形状および ダム頂部物性値	卓越振動数 (Hz)			
	X1st	X2nd	Y1st	Y2nd
30°	2.02	3.72	2.13	3.75
40°	1.99	3.64	2.10	3.67
45°	1.85	3.70	2.10	3.64
50°	1.84	3.65	2.07	3.12
55°	1.77	3.62	2.19	4.11
60°	1.74	3.69	2.14	3.14

斜線部は、やや低い剛性を示す。

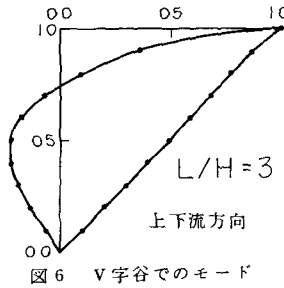


図6 V字谷でのモード

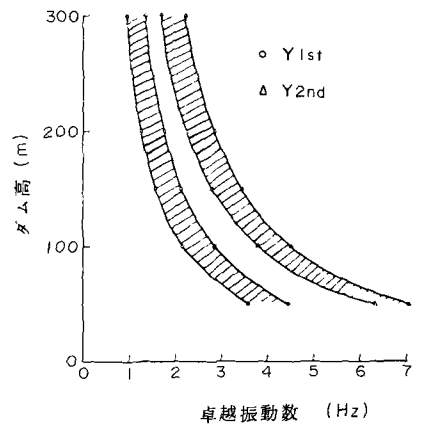
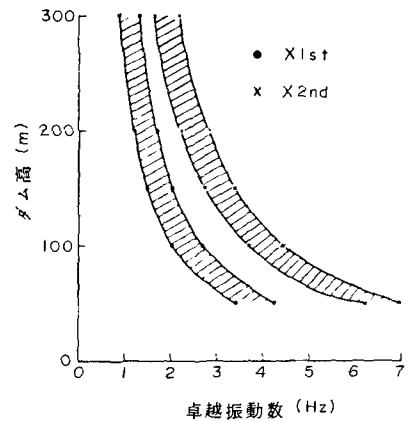


図7 ダム高と卓越振動数の関係

3.3 ダム高とダムの振動の関係(U字谷)

$L/H=3$ におけるダムの卓越振動数とダム高の関係を図7に示す。図7には High Vel. 分布と Low Vel. 分布に対する卓越振動数とダム高の関係が示してある。卓越振動数 f とダム高 H は表2に示すように、 $f = \alpha H^\beta$ で表わされる。ここで α, β は定数である。High Vel. 分布の $L/H=3$ のX方向のモードを図8に示す。図5(a)に示した Low Vel. 分布のそれと比べると速度分布の差異によってモードに差異を生じている。

3.4 頂部の物性とダムの振動の関係(U字谷とV字谷)

ダム頂部にやや剛性の低い部分がある場合(厚さ: $0.1H$)の卓越振動数を表1に、モードを図9に示す。X, Y方向とも1次の卓越振動数は頂部の低剛性の影響を受けないが、X, Y方向とも2次ではかなり影響を受ける。モードは図5と図9を比較することによって、X, Y方向とも次数によらず大きく影響されることがわかる。

3.5 堤体の勾配とダムの振動の関係(U字谷)

$L/H=3$ で堤体の勾配が1:2, 1:2.5 および1:3の場合に対するダム振動を検討したが、X, Y方向とも卓越振動数およびモードに差異はなかった。

表2 ダム高と卓越振動数の関係

Mode	Predominant Frequency (Hz)	
	High Vel. 分布	Low Vel. 分布
X1st	$5.46 H^{-0.654}$	$6.66 H^{-0.759}$
X2nd	$9.26 H^{-0.660}$	$11.45 H^{-0.744}$
Y1st	$5.63 H^{-0.649}$	$6.82 H^{-0.753}$
Y2nd	$8.86 H^{-0.648}$	$11.95 H^{-0.752}$

3.6 観測結果との比較

この方法を堤体の速度分布が既知のダムについて適用した結果を図10と表3に示す。観測結果と計算結果はよく一致しており、このような簡単な解析法でダムの振動が解析できることが明らかになった。

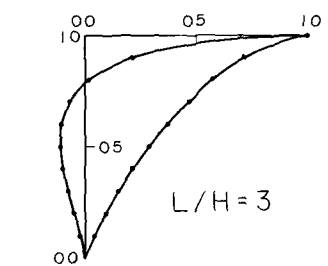


図8 High Vel. 分布での振動モード

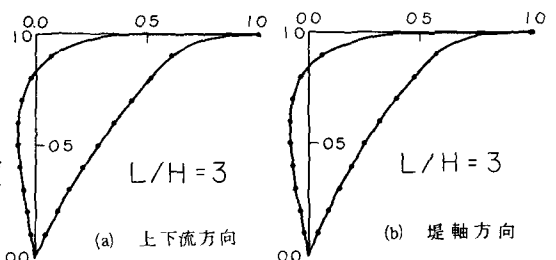


図9 頂部の剛性がやや弱い場合のモード

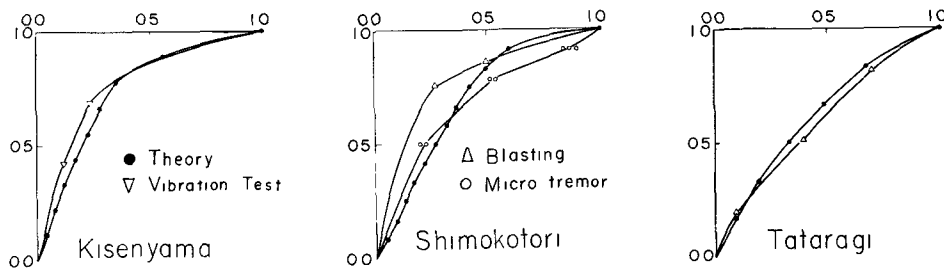


図 10 観測結果との比較 (X1st)

4. まとめ

4.1 X方向1次振動について

- (i) 卓越振動数、モードとも L/H が4以上であればほぼ一定である。
- (ii) 卓越振動数は谷形状および深さ方向の物性値の変化の割合(物性の変化率)に依存するが、頂部にやや剛性の低い部分があっても卓越振動数は不変である。
- (iii) モードは物性の変化率に依存し、谷形状にはほとんど依存しない。

4.2 X方向2次振動について

- (i) 卓越振動数は L/H が4以上であればほぼ一定である。
- (ii) 卓越振動数およびモードは物性の変化率に依存するが、谷形状には依存しない。
- (iii) モードは L/H によらない。

4.3 Y方向1次振動について

- (i) 卓越振動数は L/H が6以上であればほぼ一定である。
- (ii) 卓越振動数は物性の変化率に依存するが、谷形状には依存しない。又、頂部にやや剛性の低い部分があっても卓越振動数は不変である。
- (iii) モードは L/H が2以上であれば同一とみなせる。
- (iv) モードは物性の変化率に依存するが、谷形状にはほとんど依存しない。

4.4 Y方向2次振動について

- (i) 卓越振動数は L/H が6以上であればほぼ一定である。
- (ii) 卓越振動数およびモードは物性の変化率および谷形状に依存する。
- (iii) モードは L/H が2以上であればほぼ一定である。

4.5 観測結果との比較

計算結果は観測結果によく一致しており、この解析法が有用であることが明らかになった。

5. 謝辞

本稿の作成にあたり貴重な御助言を賜った電力中央研究所・高橋忠博士に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) K. Kunii, et al, STUDY ON DYNAMIC BEHAVIORS OF ROCKFILL DAMS, THE FOURTH JAPAN EARTHQUAKE ENGINEERING SYMPOSIUM 1975, P687 ~ P694
- (2) 沢田義博他, ロックフィルダム物性値分布特性および堤体の動的特性 — 弾性波動に基づく考察 — 電力技研報告 377008

表 3 各ダムの卓越振動数(実測値と計算値)

Dam Name	Mode	Predominant Frequency (Hz)			
		Microtremor	Blasting/Earthquake	Vibration Test	FEM Theory
Kisenyama	X1st	2.0	1.9~2.1	2.1	1.91
	X2nd	3.5		3.7	3.49
	Y1st	2.4	2.1~2.4	2.4	2.04
	Y2nd				3.14
Tataragi	X1st	2.6	2.5~2.6	2.5~2.6	2.63
	X2nd				4.73
	Y1st	2.8	2.7	2.8	2.78
	Y2nd				4.78
Shimokotori	X1st	2.2~2.4	2.3	2.2~2.4	1.87
	X2nd		3.5		3.14
	Y1st	2.4~2.6	2.6	2.4~2.6	2.11
	Y2nd				3.42