

(147) フィルダムの3次元地震応答に関する基本動特性

埼玉大学 工学部 正会員 渡辺 啓行
 埼玉大学大学院 学生員 川上 剛

1. はじめに

フィルダムの動的解析による耐震性の照査には、2次元解析が適用されるのが普通である。計算機の容量や経済性から2次元解析の方が細かいメッシュに分割できるため、十分な精度が得られると考えられているからであろう。しかし、現実のダムでは建設地点の地形は複雑であり、ダム底の谷の形状がダムの地震応答にどのように影響するかに関して十分解明されているとは言い切れない。そのために3次元の模型振動実験が行なわれるが、谷の形状を種々変えてパラメータ解析的に実験を行なうわけには行かないし、一つの実験における応答のモードを実験結果のみから把握することもかなり困難である。そこで本研究では、始めに3次元FEMプログラムを開発し、模型振動実験との比較によりその妥当性を確認すると共にフィルダムの3次元的な伝達関数の特性と上位の基本的振動モードを提示する。次いで、谷形状の応答への影響因子としてアバットメントの傾斜角度と谷底幅を取り、モード別固有振動数のこれらに対する変動特性を数値解析的に明らかにし、その無次元化線図として汎用的な固有振動数特性曲線を提示する。

2. 模型振動実験

模型の形状は、ダム天端中央で堤軸方向と上下流方向に対象で直交する鉛直断面図を図-1に、3次元形状を3次元FEM

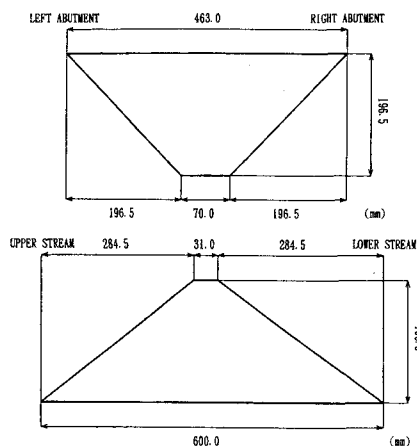


図-1 ダム中央縦・横断面図

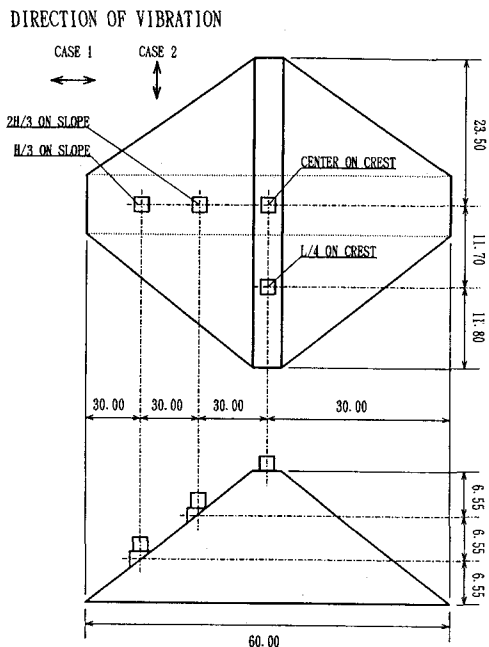


図-3 加速度計配置図

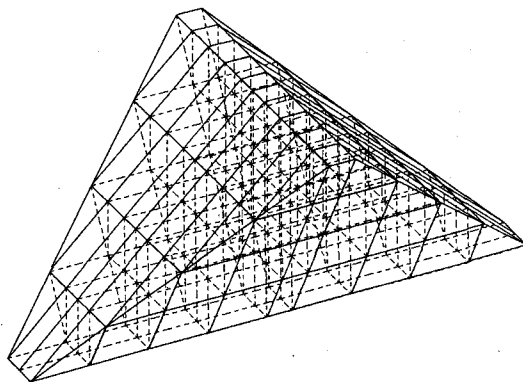


図-2 3次元FEM分割図

メッシュ分割図として図-2に示す。このような形状のダム底基盤を図-1に示す寸法でアクリル製の板で構築し、ダム本体はシリコンゴムで製作した。その物性については、模型打設時に同一材料により製作した長さ12(cm)、横断面積 12(cm²)の角柱の片持ち梁の曲げ自由振動時の固有振動数から弾性定数Eを、また、同じ角柱を横置きして下面をアクリル板に接着剤で密着固定した状態で長手方向に定常加振し共振曲線の固有振動数より1/4 波長則に従って求めたS波速度からせん断剛性率Gを、 $1/\sqrt{2}$ 法により減衰定数hを求めた。曲げ自由振動の固有振動数は倒立状態で1.53(Hz)、吊った状態で2.79(Hz)であり、著者の一人が提案した方法(文献1)により軸力の影響を除去した。このようにして求めた模型の物性値を表-1に示す。振動実験は、模型を振動台に固定し、上下流方向と堤軸方向のそれぞれ毎に振幅100(gal)振動数8-45(Hz)の範囲で正弦波による水平加振を与えることにより行なった。振動計測には全て加速度計を用いた。ダムには、図-3に示す位置に圧電子型加速度計を設置し同一方向の加振に対して加速度計を上下流方向、堤軸方向上下方向に盛り変えながら同じ加振を3回繰り返して計測した。基盤には加振方向と直交方向にBA型の加速度計を用いた。これら加速度計は振動台により一括して振動数特性を校正した。圧電子型加速度計は振動数8-50(Hz)の範囲で完全に一定であったが、BA型は45(Hz)付近から応答が低下し始めた。しかし、これ以上の振動数範囲は本実験の範囲外で無視できる。模型上の加速度計は、バルサ材で三角柱を作って模型斜面に張りつけその上に固定した。

実験結果の例として上下流方向加振時と堤軸方向加振時の共振曲線を図-4と図-5に示す。振動モードの地震応答への寄与として基本モードから数次モードまでが重要と考えられ、各加振方向において低次側で卓越する2次までの固有振動数を求めると、上下流方向加振では1次が14.4(Hz)2次が26.6(Hz)であり、堤軸方向加振では1次が18.1(Hz)で2次が24.5(Hz)である。実ダムの地震観測によれば堤軸方向加振で卓越する18.8(Hz)前後に上下方向の応答が卓越する固有振動数が存在する筈であるが、この実験では認められない。上下応答が多少大きく卓越する振動数は、いずれも上記固有振動数と一致しており、上下モードとは異なる。上述した20(Hz)においては上下応答がかすかに卓越しているが、これが上下方向のモードの可能性はある。

3. 数値解析
3次元FEM解析には、20節点の六面体(直方体)、15節点の五面体(三角柱)、10節点の四面体(三角錐)のアイソパラメトリック要素を用いている。模型の離散化は図-2に示す通りであり、六面体60個、五面体72個および四面体16個から成り、総節点数649、自由度は

表-1 模型の物性

G(Kgf/cm ²)	ν	h(%)	ρ (g/cm ³)
0.333	0.345	3.94	0.982

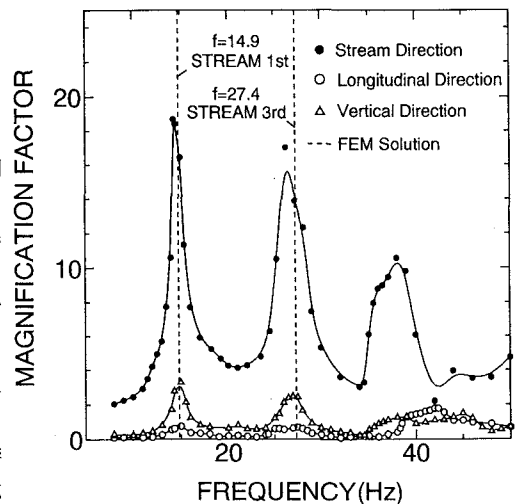


図-4 上下流方向加振時天端中央の共振曲線

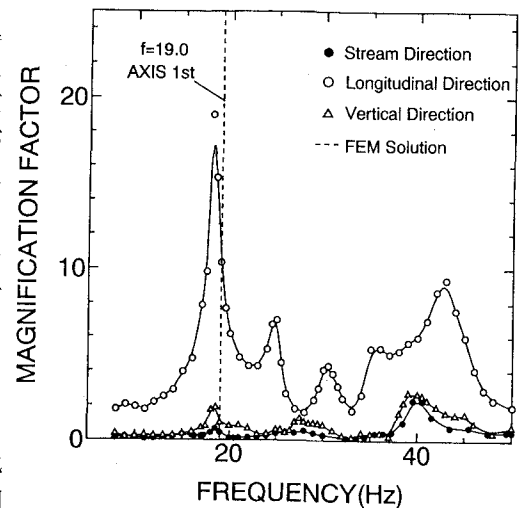


図-5 堤軸方向加振時天端中央の共振曲線

1332である。表-1に示す物性値を与えた数値モデルの10次までの固有振動数を表-2に実験結果と重ねて示す。表から明らかな通り、全体の1次固有振動数が上下流方向加振実験時の1次と、全体の2次固有振動数が堤軸方向加振実験時の2次と、全体の6次固有振動数が堤軸方向加振実験時の2次と、また、全体の9次固有振動数が上下流方向加振実験時の2次と、それぞれ、ほぼ完全に一致している。図-6に解析で得られた全体系の1次、2次、3次、5次および9次のモード図を示すが、3次モードは、19.8(Hz)で上下1次固有振動数であり、上述した共振曲線で上下応答がかすかに卓越する振動数とほぼ一致する。実験で上下モードが卓越しなかった理由は模型が対称形であったためと考えられる。また、全体系の4次と5次も実験では観測されなかった。上下流方向加振実験時の1次では全測点で応答波形が同位相となっており、解析モードとの比較から上下流1次と見做せる。上下流方向加振実験時の2次では、天端中央と天端1/4で応答波形の位相が逆転し斜面2/3の応答が小さいことから解析モードの上下流3次と見做せる。堤軸方

表-2 固有振動数

次数	数値解析値	実験値
1次	14.9上下流1次	14.4
2次	18.98 堤軸1次	18.1
3次	19.79 上下1次	
4次	20.30	
5次	22.5上下流2次	
6次	24.4	24.5
7次	26.59	
8次	26.88	
9次	27.4上下流3次	26.6
10次	28.18	

向加振実験時の1次では、堤軸方向全測点で応答波形が同位相であり天端1/4での上下応答が中央より大きく堤軸1次と見做せる。堤軸方向加振実験時2次は堤軸2次と思われる。次に、実験における1次(上下流1次)と2次(堤軸1次)の共振振動数における定常応答を計算し、実験で得られた波形に重ねて示すと図-7と図-8を得る。応答振幅にそれぞれ若干の差異が認められるが、かなり良い一致が得られていると言える。以上から本論文で開発した3

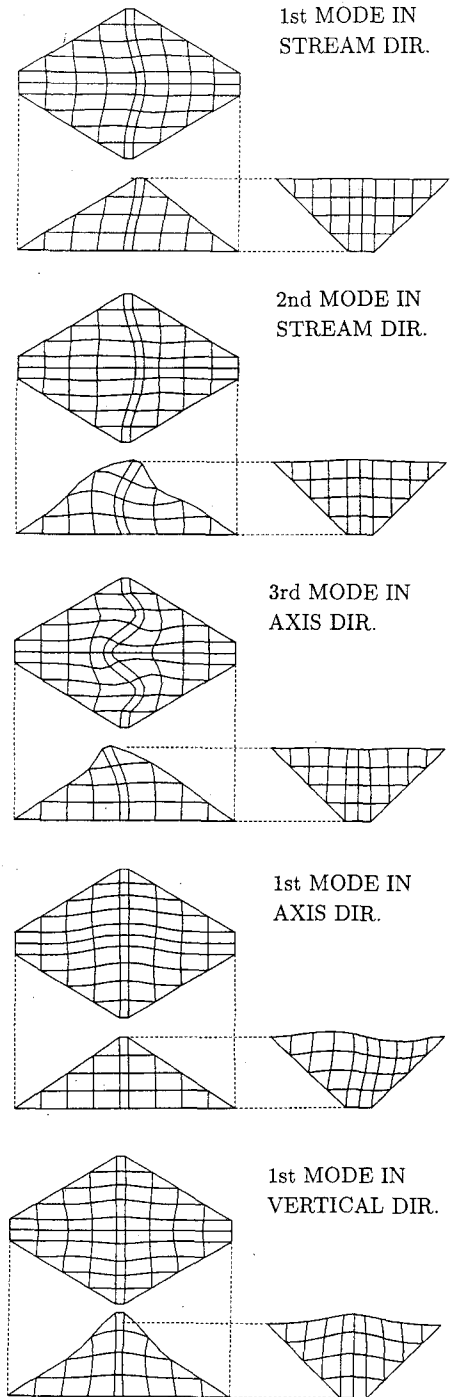


図-6 主要3次元振動モード

次元プログラムの妥当性が確認できたと言える。また、3次元の主要振動モードを明示することができた。

4. 主要モード別固有振動数の谷地形による変動特性

上記3次元プログラムを用いてダム底の谷地形に応じてダムの固有振動数が変化することを調べた。検討の規準に用いた実ダムは、高さH、上下流勾配がそれぞれ1:2.67と1:2.09すなわち法尻から法型直下のダム底までの距離が上下流でそれぞれ $L_U=2.67H$ と $L_L=2.09H$ であり、谷底幅は $W_B=H/4.375$ ($\equiv W_{B0}$)、左右岸アバットメント勾配 H/C_R と H/C_L は共に2.1875である。ダム斜面勾配に加え、谷形状の応答への影響因子としてアバットメントの傾斜角度と谷底幅を考え、上流側ダム斜面勾配 L_U/L_{U0} ($L_{U0} \equiv 2.67H$)、左右岸共通勾配では $C_R=C_L(=C)$ として C/H 、片岸のみ変化するケースでは C_R/C_L および谷底幅比 W_B/W_{B0} をそれぞれ独立に変化させ上下流、上下、堤軸各1次および上下流2次の固有振動数 f を求めた。これを堤体の平均S波速度 V_S で無次元化し、 $f/(V_S/H)$ と C/H および W_B/W_{B0} との関係としてプロットした結果を図-9と図-10に示す。図よりアバットメントの勾配が緩くなったり谷底幅が大きくなるにつれて、無次元化固有振動数が単調に低下すること、堤軸1次の固有振動数の低下速度が他より顕著であることなどが認められる。図-9

にはHとCとを2種類ずつ変えた一定の V_S を持つ実ダムについての計算値も示してあるが、曲線との一致も良い。したがって、任意のフィルダムの固有振動数をこの線図から推定することができる。

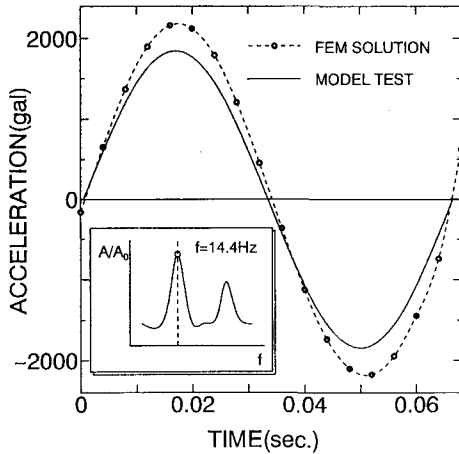


図-7 応答波形の比較 (上下流1次)

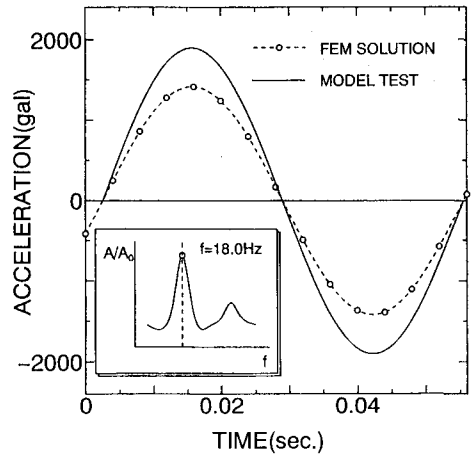


図-8 応答波形の比較 (堤軸1次)

引用文献

1) 渡辺啓行,
 栃木 均:
 すべり剝離を伴う基礎・地盤の動的相互作用に関する模型実験と数値シミュレーション, 土木学会論文集, 第368号/I-5, pp.319~327, 1986年

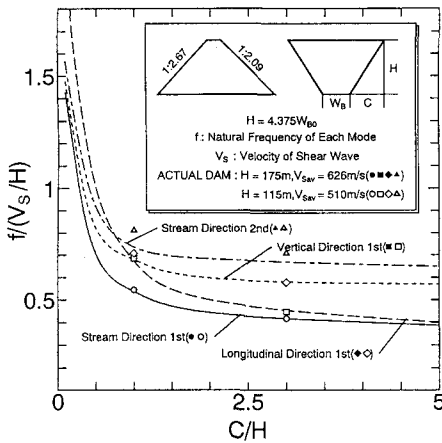


図-9 固有振動数とアバットメント勾配の関係

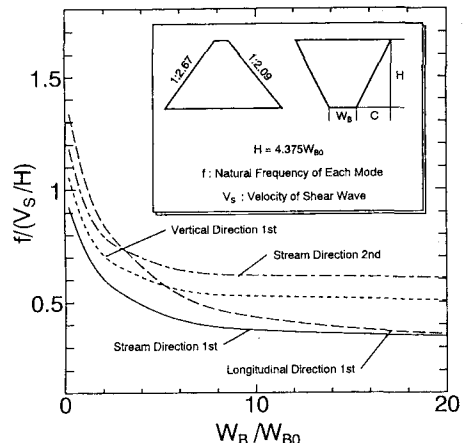


図-10 固有振動数と谷底幅の関係