

関西電力総合技術研究所 正員 〇黒岩 真彦
谷場 照志

1. まえがき

原子力発電が主流となる傾向に従って、ピーク用揚水発電が見直され、貯水用ダムとしてロックフィルダムが盛んに築造されている。ロックフィルダムは、外乱が自然界によるものであり、材料、施工、構造物自体等に信頼性を左右する不明確さを持っているうえ、モデル化が難しく、解析も困難で、破壊の取扱い方、安全評価のしかたの難しい構造物といえる。しかし、他の構造物程、応力-歪関係で線形領域が支配的でなく、最大応力も小さいが、塑性領域の応答挙動を上手に活用すれば、消費エネルギーが大きく、ネバリもあって、ぜい性的破壊性状をもつ他の構造物よりかえって耐震的であるといえよう。そこでロックフィルダムの不安定な塑性領域の応答挙動までも対象とした人工骨材による模型振動実験と非線形振動解析を試みる。

2. 相似則と模型 ロックフィルダムは、ロックを積み上げ締固めたメーソソリであるが、ロック一個一個をミクロ的に相似させる事は不可能に近い。しかし、粒子の破碎を考慮に入れなければ、粒状体の物性は個々の粒子自体の材質によるよりも粒子の構成状態に支配されるといわれている。そこで粒状体の空間的集積効果を考えてマクロ的に連続体として相似則を導いた。相似性については、振動特性を左右する固有振動数(f_n)、剪断波速度(V_s)、縦波速度(V_p)、ポアソン比(ν)、剛性率(G)、減衰定数(R)、応答倍率(M)、内部摩擦角(ϕ)及び歪依存性等について相似の確認を行った。実験材料では、粘着力(C)の影響が大きくなる事内部摩擦角と単位体積重量が小さめにしやすい事のため、又非線形の度合の大きい大歪時でも現象がとらえ易いように、人工模型材料を造る事とした。この人工骨材は、標準砂、鉄粉、エポキシ系樹脂を練り混ぜ、固結させ、クラッシングして造り出した。

3. 実験結果 相似性の確認、3次元特性、3次元と2次元との比較、側壁の影響、非線形応答特性、勾配の影響、加振時間の影響、周波数の影響、基盤剛性の影響、センターコアの影響、堤体物性分布特性、破壊特性等について検討を行った。1) 同型実ダムの単位体積重量、剪断波速度、縦波速度、内部摩擦角、剛性率、弾性係数、ポアソン比、固有振動数、減衰定数などの実験値と模型振動実験値から得られた前記物性値の実物換算値とも比較すると良好な近似を示した。2) 現地ロック材料による動的3軸圧縮試験結果から求めた G 、 R の歪依存性と模型振動実験から求めた歪依存性とは良好な近似を示した。これは歪の大きな場合、非線形性の強い場合も G と R の働きが相似する事を示唆している。3) 現地ロック材料による動的単軸剪断試験結果では、残留剪断歪が約2.8%で、動的剪断応力と上載圧の比が約0.78となる時歪を越えると歪が急増し、模型実験結果では剪断歪が約1%から2.9%の間で線形摩擦係数($\tan \phi_{mob}$)が

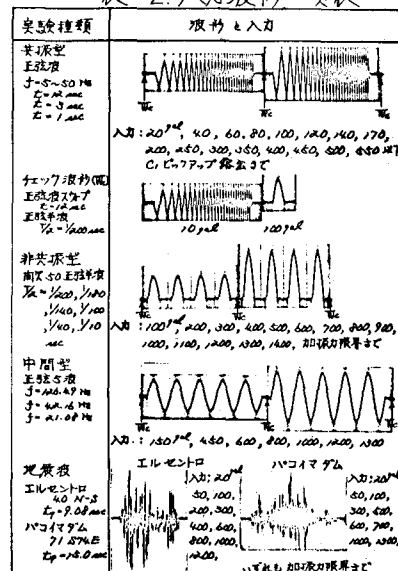
表-1. 相似則一覧表

5次元相似則: $f_n, V_s, V_p, G, R, M, \phi, C, \nu, \rho, \mu, \lambda, \dots$
 $\rho, \mu, \lambda = 0$

量	記号	次元	相似則	相似比
長さ	L	L	ρ_m / ρ_p	$1/2.5 = 1/2.5$
質量	m	M	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)^3$	$1/12.5 = 1/12.5$
時間	T	T	$(L_m / L_p) \cdot (\rho_m / \rho_p)^{1/2}$	$1/1.58 = 1/1.58$
密度	ρ	M/L^3	ρ_m / ρ_p	$1/2.5 = 1/2.5$
単位体積重量	γ	M/L^3	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)^3$	$1/12.5 = 1/12.5$
加速度	a	L/T^2	L_m / L_p	$1/2.5 = 1/2.5$
速度	V	L/T	$(L_m / L_p) \cdot (T_m / T_p)$	$1/1.58 = 1/1.58$
弾性力	F	$M \cdot L/T^2$	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p) \cdot (T_m / T_p)^2$	$1/12.5 = 1/12.5$
減衰定数	R	M/L	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)$	$1/2.5 = 1/2.5$
弾性係数	E, G	M/L	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)$	$1/2.5 = 1/2.5$
ポアソン比	ν	$-$	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)$	$1/2.5 = 1/2.5$
内部摩擦角	ϕ	$-$	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)$	$1/2.5 = 1/2.5$
粘着力	C	M/L^2	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)^2$	$1/6.25 = 1/6.25$
歪	ϵ	$-$	1	1
歪率	$\dot{\epsilon}$	$1/T$	1	1
力	F	$M \cdot L/T^2$	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p) \cdot (T_m / T_p)^2$	$1/12.5 = 1/12.5$
力密度	f	M/L^2	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)^2$	$1/6.25 = 1/6.25$
力率	$\dot{f}$	$M/L^2 \cdot T$	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)^2 \cdot (T_m / T_p)$	$1/15.6 = 1/15.6$
力率密度	$\dot{f}_v$	$M/L^3 \cdot T$	$(\rho_m / \rho_p) \cdot (L_m / L_p)^3 \cdot (T_m / T_p)$	$1/156 = 1/156$

基本単位量 $\rho_m / \rho_p = 1/2.5 = 0.4$
 $\alpha_m / \alpha_p = \rho_m / \rho_p = 0.4 = 980 / 2450 = 1$
 $\rho_m / \rho_p = \frac{\gamma_m}{\gamma_p} = 1.95 / 1.95 = 1$

表-2. 入力波形一覧表



0.73から0.87に増加し、至急増している。また、模型材料による動的単純剪断試験では $\tan\phi_{mob}$ のピークは0.8で、剪断歪は約2.2%を示し、歪が約1.8%を越えると急増している。その結果は当初想定した相似則が満足されている事を示唆している。 4) 2次元模型の場合は上下流方向加振に対しては堤軸上下、上下流方向の順に応答倍率が大きくなるが、3次元では堤軸、上下の順に入れかわる。 5) 応答が大きくなり出すと減衰定数が増え(20%以上)、また固有振動数が低域へ移行する特性を示すので過大な応答が与えられる傾向がみられる。 6) 両岸の拘束の少ない次元模型の場合は、ダム高の75%以上で急に変形が大きくなる振動形を示す。 7) 軟弱ダム基盤の場合は、ダムへの影響はあまり大きく出なかった。簡単な試算によれば、ダムと基盤の剛性比によってはダムの天端への影響の少ない場合がある。 8) 入力波形により破壊の始まる箇所と壊れ方が異なり、応答倍率の大きい程、ダムの最大断面の天端及びその付近が壊れ易いが応答倍率の小さい場合はダム斜面下部の破壊も生じ易い。 9) 何れの入力波形に対しても通常、天端、斜面上部、斜面下部の順に壊れ易く、表層すべり、沈下を生ずる。この結果は、天端、斜面表層部、法尻の順に粒径を大きくしたり、羽取りをしたりして保護する必要がある事を示唆している。

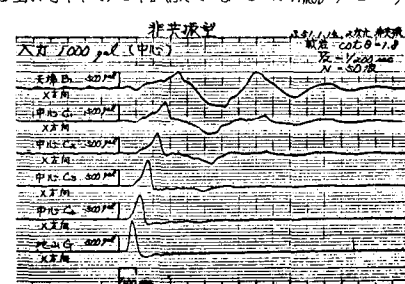


図-1 測定記録波形

10) 稼働内部摩擦角(ϕ_{mob})は、単純剪断試験によれば歪は2.2%でピーク値39°を示すが、3次元模型実験では歪2.9%でピーク値41°を示し、ヤベネバリのある特性を示している。

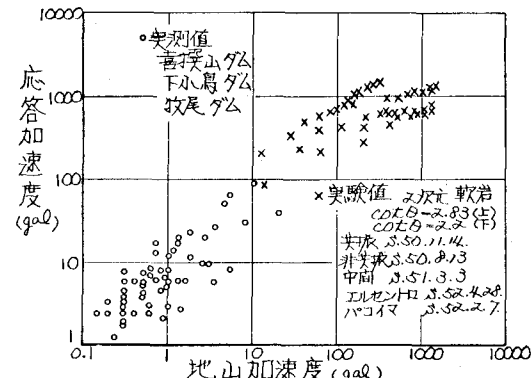
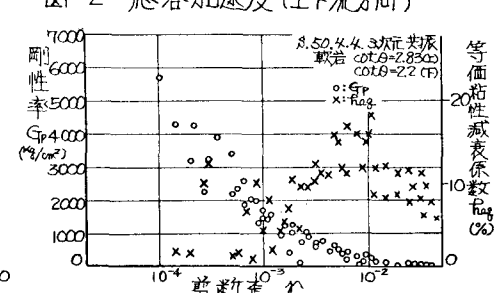
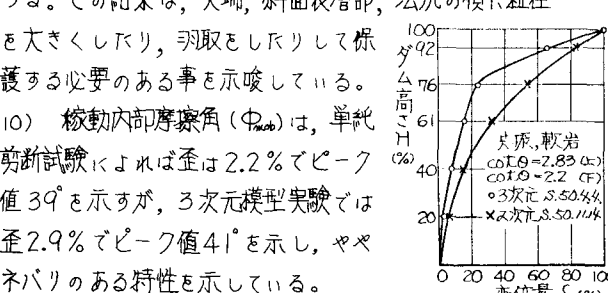


図-2 応答加速度(上下流方向)



4. 非線形振動解析

Maxwellモデルによる動的応答解析は次の様に行った。仮想仕事の原理により運動の基礎方程式は

$$\int_{\Omega} \rho_0 \dot{F}_{ij} \delta U_{i,j} dV + \int_{\Gamma} \dot{f}_{ij} \delta U_{i,j} dS = \int_{\Omega} S_{ijkl} \delta E_{ijkl} dV + \int_{\Omega} \rho_0 \ddot{U}_{i,j} \delta U_{i,j} dV$$

非線形材料の一例として非線形Maxwellモデル(右図)

が考えられる。その構成方程式は

$$\dot{S} = (C_0 + C_1 - 3C_2 \alpha E^2) \dot{E} + \frac{C_2}{\mu} (1 - \alpha E^2) E - \frac{C_1}{\mu} S$$

各要素に於ける釣合の方程式は $\{T\}^e = \frac{1}{2} \{B\}^e \{\delta\}^e + \{A\} \{U\} \{\delta\}^e + M \{C\} \{\dot{\delta}\}^e - \frac{1}{2} \{F_0\}^e$

この運動方程式を一階の連立方程式に変換し、要素毎に成立する構成方程式と連立させ、与えられた境界条件と初期条件のもとに数値計算を行った。その結果、模型実験結果と類似の振動形、ヒステリシスなど応答特性を得る事が出来た。そして、破壊条件と判断するデータとして、水平断面に働く垂直応力の比($T_{xy} + T_{yz} / (\sigma_{xy} + \sigma_{yz})$)を計算し、共振時に於ける分布を求め、この比が大きい程振動方向に滑動し易いとして、要素の破壊危険度を共振型、非共振型に分けて求めた。極めて単純化された破壊基準ではあるが、模型振動実験結果による破壊態様と非常に良く似た結果を示した。

