

4 ロックフィルタムの動的・非線形挙動について

関西電力(株)総合技術研究所 ○黒 岩 真 彦
谷 場 照 志

1. ま え が き

ロックフィルタムの堤体材料である土質材料の動的諸性質に関する数多くの研究がなされ、動的変形特性、強度特性が次第に明らかにされてきている。土質材料は一般にヒズミが 10^{-3} 以下の現象は定常的⁽¹⁾と見なされるが、 10^{-3} 以上になるとダイラタンシー効果や速度効果が現われるといわれ、非線形性が顕著に現われる。これがロックフィルタムに現われる複合非線形性の基であろう。

ここではロックフィルタムの動的・非線形性の検討を模型振動破壊実験と非線形振動解析で行なわんとするものである。

模型実験には通常実物の土質材料が使用されているが、相似比が大きい場合は特に次のようなリスクを生ずる傾向がある。すなわち、単位容積重量と内部摩擦角は小さく、粘着力と締固めのエネルギーは大きく出やすい傾向がある。この傾向を少なくするために、鉄粉、標準砂、エポキシ系樹脂を混ぜ固めクラッシングのうえ粒度調整して相似性に有利な人工骨材を造って使用した。

実験は大ヒズミ時の応答特性に焦点をおき、非線形応答特性、振動数特性、変形特性、強度特性などに現われる非線形性の検討について行なわれた。

実験結果を参考に非線形Maxwellモデルを一案として構成方程式を導き、非線形振動解析を有限変形問題として取扱った⁽²⁾⁽³⁾。これによる模型ダムの数値計算結果と、実験結果とを対比し検討を行なった。

2. 実験方法

1) 相似の考え方

ロックフィルタムはロックを積み上げ、締固めただけのメーソンリー構造物であり、ロック1個1個をミクロ的に相似させることは極めて困難である。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⁽⁴⁾。そこで、粒状体の空間的集積効果を考え、マクロ的に連続体とみなして相似則を導いた⁽⁵⁾。

相似則は、通常、支配的物理学則の確認による方式、パラメーター方式、微分方程式による方式の3つの方式があるが、ここでは、1番目の方式によることとした。それは、方法が簡単で、振動現象に關するπナンバーを確実に求めることができるうえに、關係する物理現象の理解に有力な示唆が得られるといわれていることによる⁽⁵⁾。こうして導かれた相似則は弾性領域でのものであるが、塑性領域、破壊領域においてもこの相似則で導かれた相似比を用い、実物材料による材料試験値および同型のロックフィルタムの実測値と模型実験値とが近似すれば、模型実験における物理現象は実態とそれほどかけ離れたものではないと考えた。

2) 測定機器と実験のケース

振動台は模型実験用であるので、比較的加振力が小さく、高い周波数領域まで忠実に波形を再現し得るものとして、電動型を選んで設置されたものである。測定機器は加速度ピックアップとし、小さなダム模型に埋設するための特に小型の低感振動計(VM4112)を選んだ。

入力波形を図-1に示す。入力波形は応答倍率の大きい正弦波スウィープを共振型入力と称し、逆に応答倍率の小さい正弦半波を非共振型入力と称して、上、下限をおさえ、そして、中間型として正弦波を使用し、地震波として El-Centro NS (1940), Pacoima S74E (1971) などを使用した。入力加速度は階段状に上げ、その前後にチェック波形として 10 gal 正弦波スウィープと 100 gal 正弦半波を与えた。

3. 実験結果とその考察

実験は応答波形、共振曲線、振動形、液動特性、応答加速度分布特性、固有振動数特性、復元力特性、変形と強度のヒズミ依存性、および破壊特性などに現われる非線形性の検討について行なわれ、次にその結果と考察を示す。

1). 応答波形

共振型、非共振型、中間型、および地震波入力による堤体内各測点の応答波形の一部を示す図-2, 3, 4 は、いずれの場合も堤体の各部に剪断波動が殆んど一様に導われていることを示している。ダム天端付近の誘発上下応答動は自由振動状を示し、その周期は水平動周期の約 $1/2$ を示した。剪断波動が天端に近づくにつれて位相ズレと周期ののびが生じているのがわかる。正弦半波入力 300 gal 時では異常を示していないが、1000 gal 時では上流側(反加振方向)の下部斜面測点 S₄ の応答加速度は、下流側(加振方向)の S₄ の約 $1/2$ と小さくなっている。これは反加振方向法先が破壊する要因と態様を示唆している。これらの波形の伝播から走時曲線が求められ、堤体の V_s , G の分布が算出され、 V_p も同様の手法で算出され、 ν も求められる。

2) 共振曲線系

二次元ダム模型による往復履歴を図-5、初期とイールド後の 10 gal 共振曲線を図-6 に示す。共振曲線の往復履歴は殆んどその差を示さず、入力が約 40 gal まではほぼ弾性的挙動を示し、約 100 gal まではほぼ定常的挙動を示している。その時英のヒズミは図-11 からそれぞれ 10^{-4} 以下、約 5×10^{-3} を示す。

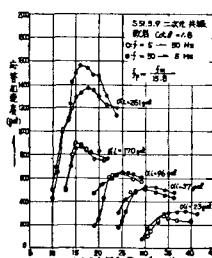


図-5. 共振曲線の往復履歴

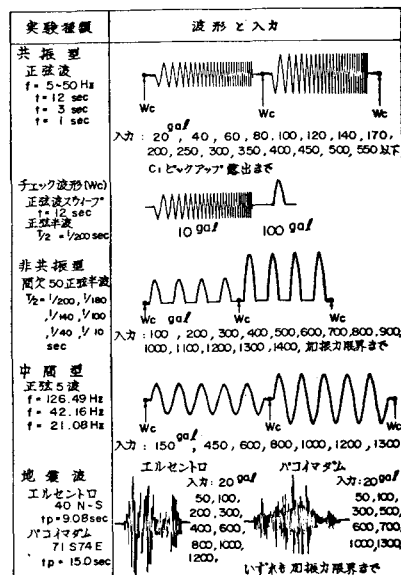


図-1. 入力波形一覧図

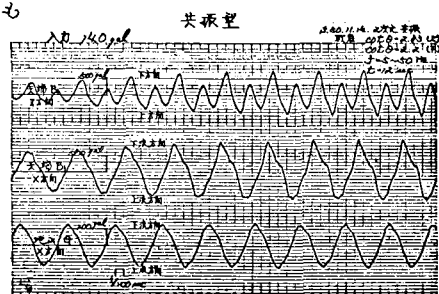


図-2. 振動実験測定記録波形

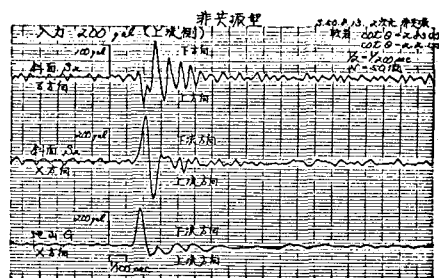


図-3. 振動実験測定記録波形

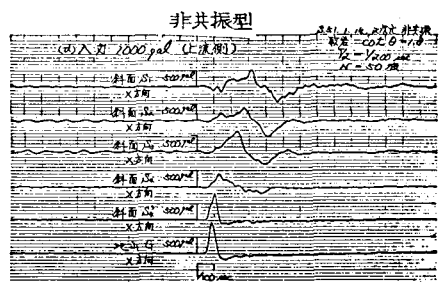


図-4. 振動実験測定記録波形

入力 250 gal を与えたイールド後の応答加速度、固有振動数とも処女時のそれらより低くなっており、非線形性が強く現われ、同様にヒズミは 1% 以上を示す。三次元ダム模型による共振スケルトンは、ダム高さが低いほど非線形性が強く現われ、また、堤軸上下方向応答の非線形性が強く現われることを示した。

3) 振動形

二次元、三次元ダム模型による振動形を図-7 に示す。加速度波形から変位波形を求めて作ったものである。いずれもコンベックス型を示し、二次元の方がその割合が少ないのは両サイドの拘束による。そして喜楢山、下小島、新冠などの実測値、後述の計算値をプロットすると、これらの間に入ってしまう。天端に近づくとき急に変形が大きくなるのは、堤体上下方向に剛性差があること、堤軸方向に拘束が少ないことなどによるものと考えられる。

後述の計算結果も堤体剛性差が少ないと凸(コンベックス)型を示し、差が大きいと凹(コンカブ)型を示した。

4) 波動特性

図-8, 9 は V_s が入力の増加にしたがって、また、ダム天端に近づくにしたがって小さくなる非線形性を示している。しかし、 V_p はダム天端に近づくにしたがって小さくなるが、入力が増加しても殆んど小さくはならない。

これは粒状体が水平には変形しやすいが、垂直方向には変形し難いことを示している。 V_s は入力加速度 α_i に対して双曲線状に低下し、 $V_s = C\alpha_i^{-m}$ で表わされ、上載荷重に対しては、上載荷重のベキ数の関数で $V_s = C\alpha_i^{-\beta}$ で表わされる。 G も、 $G = \rho \cdot V_s^2$ であるから同様に表わされる。そして、ポアソン比は V_s が早くなると小さくなる傾向を示す。

以上のことから表-1 に示されるように、ロックフィルダムの堤体物性のモデル化が求められ、

同型のロックフィルダムの実測値から得られたモデル化と良好な近似を示した。また、ダム表面の剛性は内部に比べて極めて低く、ポアソン比も大きくなる傾向を示した。

5) 応答加速度分布特性

図-10 ダム天端の応答加速度倍率は地山入力加速度に対して双曲線状を示し、 $M = C\alpha_i^{-m}$ で表わされる。また、地山入力加速度と天端応答加速度の関係は $\alpha_r = C\alpha_i^{\beta}$ で表わされる。堤体の最大応答加速度分布状態は入力波形によって

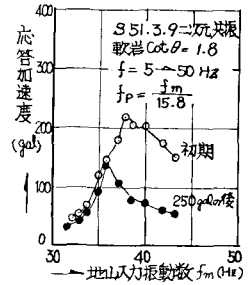


図-6. 初期とイールド後の 10 gal 震振曲線

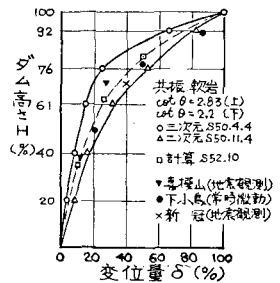


図-7. 振動形

S51. 1.14 二次元 非共振
軟岩 Cot θ = 1.8, T/2 = 1/200, N = 50 波
 $mV_s = C \cdot mV_p^{\beta}$ (cm/sec)
 $C = 0.414$
 $C = 250 \sim 650$

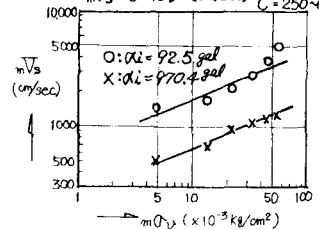


図-8. 剪断波速度と上載荷重の関係

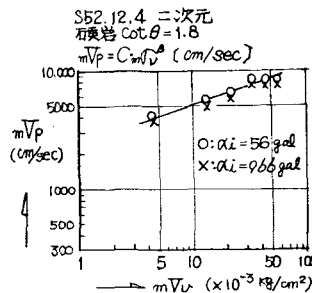
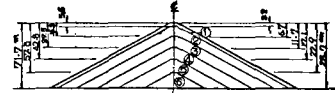


図-9. 縦波速度と上載荷重の関係

表-1. ロックフィルダム堤体物性のモデル化 (均質型)



位置	高さ (m)	入力加速度 (Gal)	応答加速度 (Gal)	応答変位 (cm)	入力変位 (cm)	応答倍率	備考
①	1.95	15.0	42.9	0.430	4.5	18.9	V _s : 1.14 Cot θ: 1.8 Z: 2.5 等速 Z ₀ : 150 波
②	2.0	20.0	42.9	0.361	8.0	21.6	V _p : 552.10.4 Cot θ: 1.8 Z: 2.5 等速 Z ₀ : 150 波
③	25.0	68.2	0.422	12.4	35.3	3.0	
④	30.0	84.1	0.427	17.9	51.1	3.0	
⑤	35.0	80.6	0.384	24.4	67.5	3.0	
⑥	40.0	79.5	0.331	31.6	84.7	3.0	

位置	高さ (m)	入力加速度 (Gal)	応答加速度 (Gal)	応答変位 (cm)	入力変位 (cm)	応答倍率	備考
①	1.95	237.2	678.2	0.430	1.725	3.225	S52. 1.14 Cot θ: 1.8 Z: 2.5 等速 Z ₀ : 150 波
②	2.0	316.2	678.2	0.361	2.000	3.450	
③	25.0	395.3	1076.2	0.422	3.100	8.825	
④	30.0	474.3	1329.6	0.427	4.475	12.725	
⑤	35.0	553.4	1224.3	0.384	6.100	16.875	
⑥	40.0	632.4	1256.9	0.331	7.950	21.175	

異なることを示した。共振型入力に対しては凹(コケブ)型を示し、入力の増加にしたがってダム天端の応答が急激に増加している。中間型(地震波を含む)は入力が増加すると矩形型を示し、地山入力加速度と天端応答加速度とがほぼ等しくなることを示している。非共振型では天端応答加速度が地山入力よりも小さく台形型を示している。ただし、ゆり返しの自由振動時には共振型と同じ凹(コケブ)型を示している。結局、入力波形の如何によって、力の受け方が異なり破壊態様も異なることを示唆している。

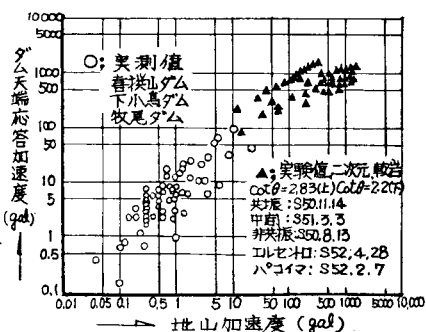


図-10. 地山加速度と天端応答加速度の関係

6) 固有振動数特性

加振中の共振振動数の低下は入力の増加にしたがって極めて大きく、イールド入力加振時には $1/4$ にも低下する傾向を示した。また、固有振動数の低下状態は入力波形によって異なり、共振型、中間型、非共振型の順に小さな入力加速度でその低下が生じ、イールド後は、逆に振動数が上昇する傾向を示した。堤体材料の剛性もこれらの傾向に比例して変化することを示唆している。

二次元と三次元ダム模型の上下流方向 X, 堤軸方向 Y, 上下方向 Z, の固有振動数の低下状態については、堤軸方向の拘束の大きい二次元模型の方が三次元模型の固有振動数より大きく、入力加速度が小さいうちに低下が生じており、上下流方向と上下方向の低下が激しい。これは堤軸方向の拘束の大きい場合は上下流と上下方向の堤体材料の剛性の低下が激しいことを示唆している。

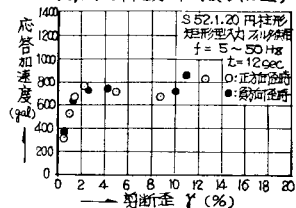
三次元ダム模型の高さの違いによる影響については、堤高が低いほど固有振動数は大きく、イールド後の固有振動数の上昇が生じている。しかし、堤高に拘わらず低下状況の差は殆んど見られない。

7) 復元力特性

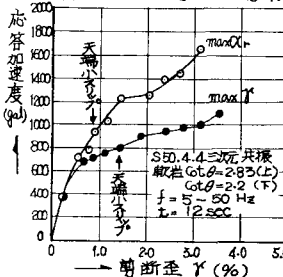
三次元ダム模型の最深部中心線上の各測点の直下の測点に対する応答加速度とヒズミのヒステリシス、は、堤体底部ほど、また、入力 が小さいほど弾性応答挙動を示し、ダム天端に近づくにしたがって、また入力が増加するにしたがって鉤錘型から降伏型、崩壊型に移行する傾向を示している。

図-11 a), b), c) にヒステリシスのスケルトンに相当する最大応答加速度とヒズミの関係を示す。a) は円柱形状試体による動的単純剪断試験に、b) は三次元ダム模型による共振実験に、c) は二次元ダム模型によるエルセントロ地震波動によるものである。材料実験ではヒズミが約 3.7%、応答加速度が約 740 gal で頭打ちとなりヒズミも急増する傾向を示している。ダム模型の共振実験ではヒズミが約 1.2%、天端の応答加速度約 830 gal で頭打ち状となりヒズミも急増している。この曲線を参考にして後述の構成方程式をヒズミの三次式としている。

(a) 動的単純剪断試験 (共振型)



(b) 三次元ダム模型 (共振型 B₁)



(c) 地震波動 (E₁ 上流方向)

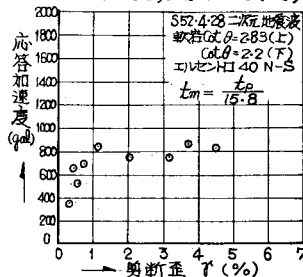


図-11 a), b), c) 応答加速度とヒズミの関係

8) 変形のヒズミ依存性

剛性率 G と減衰定数 η のヒズミ依存性についてであるが、円柱供試体による動的単純剪断試験はダム天端部分を模擬したものでダム表面の挙動を示し、他の場合より G は小さな値を示し、 η は大きな値を示している。三次元ダム模型による共振実験(正弦波周期的スウィープ)によるものは、共振実験のヒステリシスから算出したものである。そして二次元ダム模型による非共振実験(正弦半波)によるものは剪断速度から $\dot{\gamma} = \frac{du}{dz} = \frac{du/dt}{dz/dt} = \frac{v}{V_s}$ として求めたものである。いずれの場合も G と η のヒズミ依存性は良好な近似を示している。これらのことはダムの表面の G が内部よりも小さく、 η は大きいこと、入力波形の如何に拘わらず G と η のヒズミ依存性に殆んど差のないことを示唆している。

現地堤体材料による動的三軸圧縮試験結果の G のヒズミ依存性とは良好な近似を示した。これは堤体材料に使用した人工骨材が塑性領域においてもかなりの相似性を保っていることを示唆している。

9) 破壊特性

a) 破壊態様 破壊態様は入力波形によって異なり、共振型入力ではダム天端表面から滑落し、非共振型入力では法先がせり出し、中間型入力では斜面の表面から滑動する傾向を示している。地震入力では斜面上部の表面から滑動する傾向を示し、中間型入力時の初期に似ている。いずれの場合もゆり返し時に生ずる自由振動により、天端表面の滑落が最初に生じている。このように表面の個々のロックのロッキング、滑落により破壊が生ずることから、ロックの連続性はロック間の摩擦力により支配されるものと類推される。後述の振動解析結果でも、 $C=0$, $\tan\phi = \phi/\sigma$ を破壊条件とした時の破壊順序とこのダム模型の破壊順序とが良好な近似を示した。これらのことは、ロックの連続性を支配するものは $\tan\phi$ であることを示唆している。三次元ダム模型による堤軸方向の沈下状況と二次元ダム模型による入力波形別の天端沈下量は、ダム天端の沈下量が堤高に比例しており、共振型入力ほど大きくなることを示している。

b) 強度のヒズミ依存性 図-12 a), b), c) に $\tan\phi_{mob}$ のヒズミ依存性を示す。a) は動的単純剪断試験によるもの、b) は三次元ダム模型の共振実験によるもの、c) は二次元ダム模型の地震波動による共振実験結果から求めたものである。材料試験のa) はヒズミが約3.7% $\tan\phi_{mob}$ 約0.75で頭打ちを示すが、10%をオーバーすると再び上昇している。b) は共振型入力(正弦波周期的スウィープ)時であるが、ヒズミが約1%前後と約2~3%で、 $\tan\phi_{mob}$ が鈍化する傾向を示す。全体的には1以上に序々に増加する傾向を示している。c) は地震波動を与えた場合であるが、ヒズミ約1.2%、 $\tan\phi_{mob}$ 約0.85で頭打ちとなり、約3.5%を過ぎると再び $\tan\phi_{mob}$ は上昇し、約6%以上のヒズミで $\tan\phi_{mob}$ は約1を示す。

現地堤体材料による動的単純剪断試験結果においても残留剪断ヒズミが約2.8%で動的剪断応力と上載圧の比が約0.78となる時点を越えるとヒズミが急増する傾向を示し、ダム模型用人工骨材による切

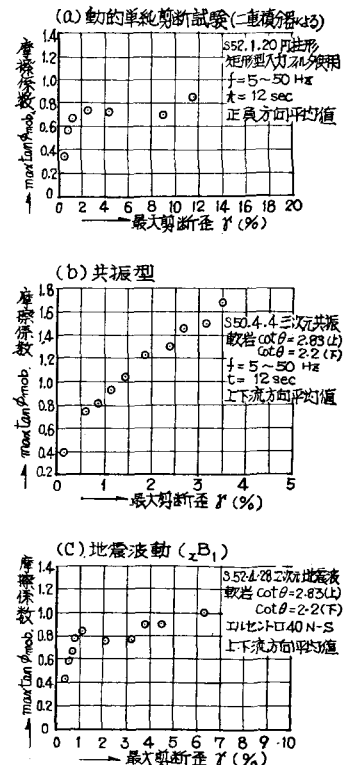


図-12 a) b) c) 内部摩擦係数とひずみの関係

とほぼ近似している。この人工骨は破壊領域においても、かなりの相似性を保っていることを示唆している。

4. 非線形振動解析

以上の模型振動実験は、ロックフィルダムの非線形挙動が有限変形問題であることを示唆しているとの考えに基づいて、Lagrangeの運動の方程式を変分形式で表わし、これに物体要素を適用して振動の方程式を導いた。また、構成方程式はヒズミの二次式として、これら2式を連立させてF.E.M.により数値計算を行なった。この際の力学モデルは、非線形バネをパラにもったMaxwellモデルを使用し、数値解法はRunge-Kutta-Gill法によった。

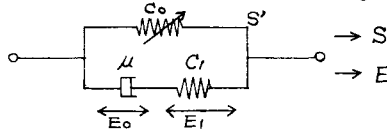
1) 基本方程式とその変分形式

ひずみテンソル
$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial a_j} + \frac{\partial u_j}{\partial a_i} + \frac{\partial u_k}{\partial a_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial a_j} \right) \quad (1)$$

Lagrangeの運動方程式
$$\frac{\partial}{\partial a_k} \left(S_{kl} \left(\delta_{il} + \frac{\partial u_i}{\partial a_l} \right) \right) + \rho_0 \left(F_{oi} - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (2)$$

上式の変分形式は
$$\int_{V_0} \rho_0 F_{oi} \delta u_i dV + \int_{S_0} \bar{T}_{oi}^* \delta u_i dS = \int_{V_0} S_{kl} \delta e_{kl} dV + \int_{V_0} \rho_0 \ddot{u}_i \delta u_i dV \quad (3)$$

2) 構成方程式



一次元構成方程式
$$\dot{S} = (C_0 + C_1 - 3C_0\alpha E^2) \dot{E} + \frac{C_0 C_1}{\mu} (1 - \alpha E^2) E - \frac{C_1}{\mu} S$$

一般化
$$\begin{aligned} \dot{S}_{ij} = & (C_0 + C_1 - 3C_0\alpha E_{lm} E_{ml}) \dot{E}_{ij} + \frac{C_0 C_1}{\mu} (1 - \alpha E_{lm} E_{ml}) E_{ij} \\ & + \frac{\nu}{1-2\nu} \cdot \frac{C_0 C_1}{\mu} (1 - \alpha E_{lm} E_{ml}) E_{mm} \delta_{ij} - \frac{C_1}{\mu} S_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

3) 振動方程式 (F.E.M)
$$M(C) \{\ddot{u}\}^e + \frac{1}{4\Delta} [A] \{U\} \{S\}^e + \frac{1}{2} [B] \{S\}^e - \frac{\Delta}{3} \{F_T\}^e = 0 \quad (5)$$

4) 数値計算結果と考察

(4)と(5)式を連立させて、二次元のF.E.M.によって計算を行ない、次のような共振曲線、振動形、応答波形、復元力特性、Gとhのヒズミ依存性、破壊特性と安全率などに関する検討結果を得た。

a). 共振曲線はSoft Spring状を示し、応答波形はダム天端に近づくほど非線形性が強くなることを示した。

b). 振動形 図-7 は、堤体の剛性が上下方向に均一であれば凸(かば)型を示し、上下の剛性差が大きくなると凹(かへ)型を示すようになる。また、ダム基盤が軟弱になると基盤の変形が大きくなり、二次モードを示し、ダム天端の応答はそれほど大きくならず減衰能は増すようである。

c). ヒステリシスは、堤体内部ほど、また入力小さいほど弾性的挙動を示し、天端に近づくにしたがって、また入力が増加するにしたがって紡錘型から降伏型に移行する傾向を示した。

d). Gとhのヒズミ依存性 図-13 は、ヒズミレベルが大きくなると剛性率は低下し、減衰能は増加する傾向を示した。

e). 図-14, 15 は、破壊条件と破壊順序を示し、堤体に粘着力がない場合の共振型入力ではダム天端から壊れ易く、非共振型入力では法先から壊れ易いことを示した。また、堤体に粘着力を有する

場合には均一型アースフィルダム 同様に斜面の1)面破壊の可能性を示した。そして、いずれの場合も共振型入力の方が、非共振型入力によるよりも壊れ易いことを示した。

f) 上記の事項はいずれも模型振動破壊実験結果とかなりの近似を示した。

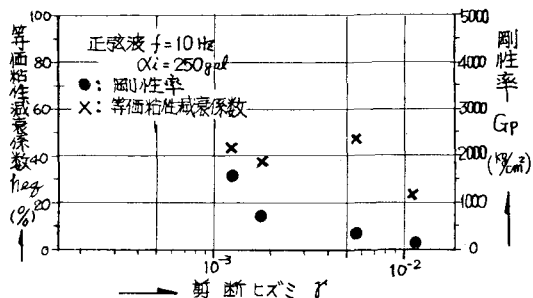
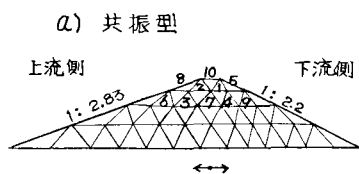
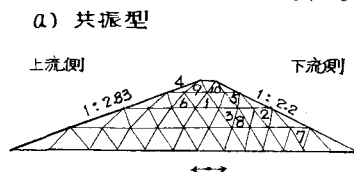


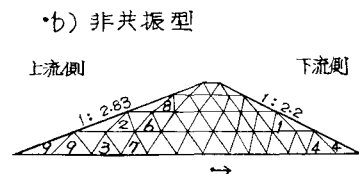
図-13. Gとhのヒズミ依存性



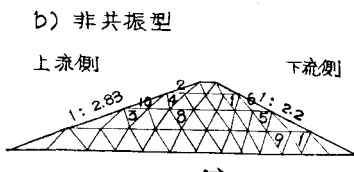
順序	条数	$\tan \phi$	安全率
1	4	6.0	0.13
2	2	2.4	0.33
3	9	1.3	0.62
4	13	1.2	0.67
5	5	1.2	0.67
6	7	0.82	0.90
7	11	0.86	0.93
8	1	0.76	1.05
9	15	0.75	1.07
10	3	0.69	1.16



順序	条数	$\tan \phi$	安全率
1	11	2.83	0.283
2	31	2.13	0.38
3	27	2.04	0.39
4	1	1.94	0.41
5	14	1.79	0.45
6	9	1.60	0.50
7	54	1.56	0.51
8	13	1.33	0.60
9	2	1.23	0.65
10	4	1.04	0.77



順序	条数	$\tan \phi$	安全率
1	32	0.467	1.71
2	18	0.429	1.86
3	27	0.415	1.93
4	55	0.408	1.98
5	56	0.405	1.98
6	20	0.401	1.99
7	32	0.392	2.02
8	7	0.397	2.01
9	34	0.397	2.01
10	35	0.397	2.01



順序	条数	$\tan \phi$	安全率
1	54	1.85	0.43
2	1	1.76	0.44
3	19	1.62	0.49
4	31	1.58	0.51
5	8	1.37	0.58
6	16	0.83	0.97
7	14	0.78	1.03
8	23	0.78	1.03
9	52	0.75	1.07
10	6	0.71	1.13

$$\tan \phi = \tau / \sigma, \text{ 安全率} = \frac{0.8}{\tan \phi}$$

図-14. $C=0$ の場合の破壊順序

$$\sqrt{\frac{1}{4}(6\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2\tau^2} + \frac{1}{2}(6\sigma_x + \sigma_y) \sin \phi \geq C \cos \phi, \text{ 安全率} = \frac{0.8}{\tan \phi}$$

図-15. $C>0$ の場合の破壊順序

5. 結 論

堤体材料は 10^{-4} 以下のヒズミではほぼ弾性的挙動を示し、 10^{-3} オータではほぼ定常的挙動を示し、 10^{-2} 以上になると非線形性が強く現われた。そして、入力波動を大きくするとダム固有振動数は低域に移動し、共振し難くなって応答倍率は 1 以下に低下し、減衰能は大きく 20 % 以上にむなり、ダム天端から序々に滑落する破壊態様を示した。計算結果においても実験結果とかなり類似した応答挙動を示し、破壊態様も $C=0$, $\tau/\sigma = \tan \phi$ を破壊条件とした破壊態様とかなりの近似を示した。これらのことは使用した振動方程式と構成方程式とは、実験結果を説明し得る可能性をもち、実験と計算結果はかなり実態に近いことを示唆している。

ロックフィルダムの非線形性は、その安定性に極めて有利に働き、ロックフィルダムはネバリの耐震的な構造物であることを示した。

振動解析にあたり、日本大学 理工学部交通工学科 色部 誠 教授の御指導を得、小野設計事務所山下 浩氏のご協力によったことを附記し深謝の意を表します。

参考文献：(1) 石原 研而：「土質動力学の基礎」、鹿島出版会、(2) J.S.ファン大橋 義夫：「固体力学/理論」、信風館、(3) D.C. Leigh, 村上 記：「非線形連続体の力学」、共立出版、(4) 村山 朔郎：「物性論的にみた砂の力学的挙動」、S50.2.4 退官記念講演、(5) 江岸 一郎：「模型実験の理論と応用」、技報堂。

Studies on Dynamic Non-Linear Behavior
of Rock-Fill Dam

Masahiko KUROIWA*
Terushi TANIBA**

This paper presents investigations of non-linear behavior during the process up to failure of rock-fill dam subjected to earthquake motion, by means of structural model studies and mathematical simulations. When the size of structural model is small, the use of field granular materials make it difficult to keep strict similarity. So the model is formed by artificial granular to avoid the violation of similarity laws. The artificial materials is produced by mixing sands, steel powders and epoxy-resin. And the mixtures are solidified, crushed and classified. The mechanical similarity between the model and the real dam is satisfied in regard to unit weight, grading curve, elastic wave velocities, coefficient of internal friction and dependence of these mechanical properties on strain beyond elastic limit up to failure as well as within elastic region.

According to the response of the dam model to the low acceleration input less than 20 gals, the model yields good correspondence to the actual prototype. As the acceleration input increases over 100 gals, the model shows non-linear behaviors. The behaviors are caused by strain hardening and then by softening effect together with large deformation. In the later condition, amplitude versus frequency responses show non-linear vibration characteristics of mass-softening spring system.

For the higher input over 250 gals failure of the model begins and various failure modes correspond to the input forms. In case of harmonic excitation, the failure starts at dam crest. On the contrary, for impulse wave excitation the failure occurs at the toe end of slope on the apposite side of exciting direction.

The mathematical simulation are carried out using the F.E.M. in which constitutive equation for non-linear viscoelastic model, composed of a Maxwell model in parallel with a non-linear spring. The non-linear spring is used in order to represent the properties of the granular materials. The value of spring constants are specified with confining pressures acting on them. The finite deformation is considered in the analysis.

The numerical results of mathematical simulation, such as vibration mode, hysteresis loops and some failure modes for harmonic and non harmonic excitation of 250 gals, are approximately coincident with the experimental results in the model dam.

*, ** Technical Research Center The Kansai Electric Power Co., Inc.