

ロックフィルダムの地震時の安定について

東京大学生産技術研究所 田村重四郎
埼玉大学 岡本舜三
電源開発株式会社 ○大町達夫

1. はじめに

筆者等は、ロックフィルダムの動的破壊現象を解明するために各種の大型模型を用いた振動破壊実験を行ない、その結果について既に幾つか報告してきた。本報告は、均一な大型模型堤体内に埋設した種々の計器により検出した振動破壊性状の特徴と、堤体の安定を解析的に評価するための一つの手法とについて述べたものである。

2. 大型模型の振動破壊実験

2.1 模型および材料

今回の実験で使用した材料は、粒径 $2\sim 6\text{ cm}$ の乾燥した単一種の玉砂利(比重 2.56 、単位重量 1.6 t/m^3 、安息角 37.5°)である。模型は左右対称の楔形二次元模型で、法面勾配は $1:1.8$ 、 $1:2.5$ 、 $1:3.0$ の3種である。堤高は $1:1.8$ 、 $1:2.5$ の模型の場合 140 cm 、 $1:3.0$ の模型の場合 130 cm であり、堤長および天端幅は何れの模型の場合もそれぞれ 200 cm および 14 cm である。

2.2 実験および測定

模型の破壊過程を詳細に捉えるため、模型の内部および表面には種々の計器や標的を配置した。図1(a)の番号を付した○印の部位には、使用した砂利と同程度の大きさの加速度計を埋設し、破壊の発生やその進展の状況を把握した。また同図の3本の鉛直な細線部には、拍抗線ひずみ計を貼付した薄青銅を埋設し模型堤体内に生ずる相対変位を検出した。また9個のアルミ塊(径 2 cm 、高さ 2.5 cm)を斜面中腹よりやや上方の表層部に埋め込み、これらを電氣的接点として用い、それらの接点が離合する時刻より堤体材料が相対変位を生ずる時刻を捉えた。模型表面と図1(a)に示した●部および○部には、赤および黄に着色した堤体材料を配置し、堤体の変状を調べた。

模型への加振は、振動台の振動数を一定(2.0 Hz)に保ち、振幅を漸増するという方式で行なった。この 2.0 Hz という振動数は、模型の固有振動数よりもかなり低い振動数であり、実験中模型内の加速度分布はほぼ一様であった。

2.3 実験結果

模型は斜面表層が振動台の振動に合わせて雪崩状に崩落して破壊し、最終的には図1(b)の如き形状となった。堤体材料が大きく移動した場所と殆んど移動していない場所との境界を示したのが同図中の破線である。

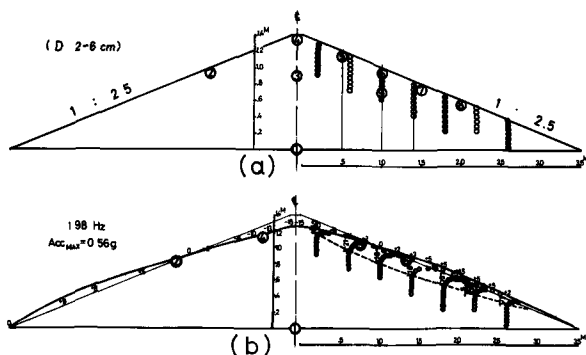


図1 振動破壊実験概要

図2は実験中得られた加速度記録の一部である。本図で①の正弦的波形は振動台の加速度波形であり、波形の山は振動台が図の右方へ変位している状態を示している。模型内の加速度波形に認められる原波形からのひずみの特徴は、正弦波形の頂部あるいは底部が平坦となり、その平坦部の末尾で急激に屈折して元の正弦波形にもどるところにある。振動モデルを用いたシミュレーションの結果、この特徴は摩擦抵抗のみを有する物体が正弦的な慣性力を受ける場合の加速度波形の特徴とよく類似していることが確かめられた。

図3(a)は埋設したアルミ塊間の接離・切断の記録の例である。これによれば斜面表層の砂利が滑動を開始する段階になると周期性の比較の明瞭な動きが全ての記録に現れる。図3(b)はアルミ塊間の離合の時期を調べるために、同時刻における振動台の加速度波形と対比したものである。この図は、接点間の離合は加速度波形の山側でのみ生じ、接点間が切断する時期は振動台の加速度が最大値に達する時期とほぼ一致し、加速度が小さくなると接点は再び接触することなどを示している。堤体材料が相対運動をする時期は、アルミ塊の接点切断している時期とほぼ等しいものと考えられるから、その時期は堤体の振動に基づく慣性力が材料間の摩擦抵抗を越えている時期とほぼ一致しているものと推察される。

また燐青銅板のひずみ記録からは振動中燐青銅板がS字形に屈曲することが明らかとなり、これにより堤体材料が局部的には或る大きさの塊としてまとまって運動することが判明した。

法面に雪崩状の崩落が観察される時点における振動台の加速度 α_f と法面勾配との関係を検討した結果、次式が成り立つことが確かめられた。

$$\theta + \tan^{-1} \left| \frac{\alpha_f}{g} \right| \cong \text{const.} \quad \text{式(1)}$$

ここで θ は角度で表わした法面勾配、 g は重力の加速度であり、const.はこの場合ほぼ 50° であった。

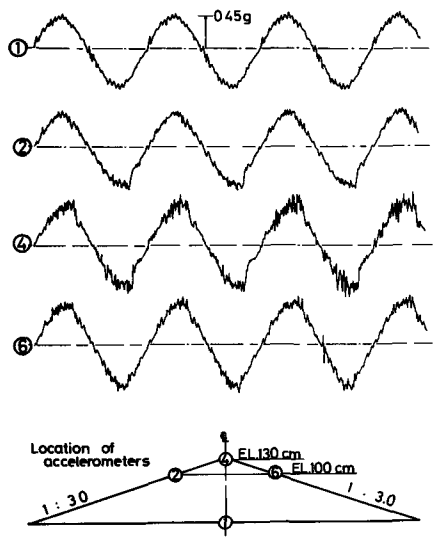


図2 加速度記録例

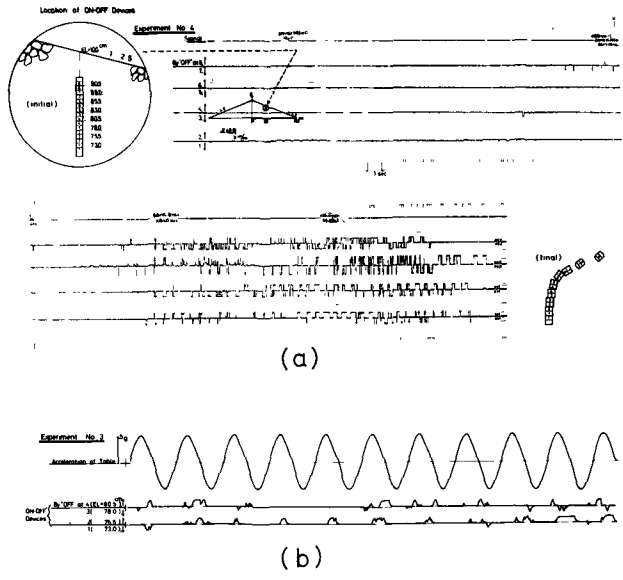


図3 アルミ塊間の接離記録例

3 堤体の崩壊現象の数値解析

3.1 堤内応力の算定

本解析では、堤体を連続な弾性体と仮定し崩壊直前までの堤体内の応力状態あるいは滑りに対する安定度などを検討した。応力の算定に当っては震度法に基づき静的に水平な慣性力を作用させる手法を用い、基礎との境界は堤底が基礎に固定されているものとした。堤体材料の抗張力が極めて弱小であることを勘案するため、引張に対する弾性率が圧縮に対する弾性率より小さい図4の如き非線形な弾性率を仮定し有限要素法により応力を算定した。

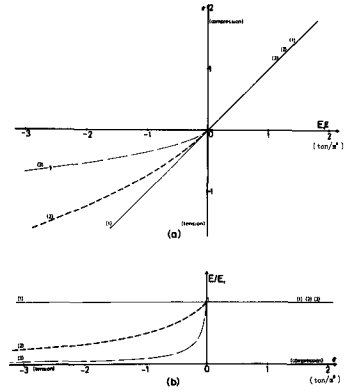


図4 仮定した応力～ひずみ関係

この様にして求めた応力分布を、弾性率が線形な場合のし、応力分布と比較すると、斜面表層部が発生する引張応力の値は小さくなり、引張応力の発生する範囲も狭まっていたが、圧縮側の斜面付近における応力状態には殆んど変化が認められなかった。

3.2 堤体法面の安定の評価と崩壊震度の試算

堤体内の主応力の大きさが σ_1, σ_2 である点で $\sin \phi_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$ とするとき、その点において最も滑り易い方向（滑り出しの方向と呼ぶ）は主応力方向に対して $(\frac{\pi}{4} \pm \frac{\phi_0}{2})$ なる方向である。図5は堤内の各点における滑り出しの方向を矢印で示したものである。図の右側斜面表層の破綻は滑り出しの方向が法面と平行となる点を結んだ線であり、この破綻より外側では滑り出しの方向が堤体の外側に向いているからこの部分は滑りによって緩む傾向にあると言える。

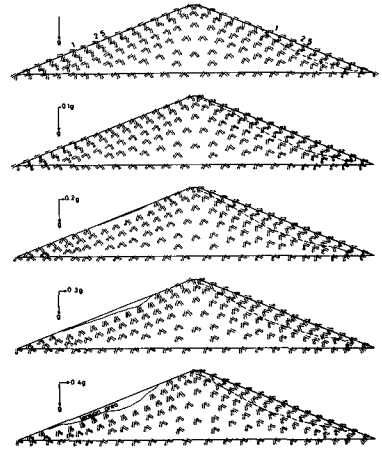


図5 滑り出しの方向

図6は堤内の各点における滑り出そうとする傾向の程度を調べるために $\sin \phi_0$ の値の分布状況を示したもので、各等値線の指示する $\sin \phi_0$ の値が大きいかほど滑りに対して不安定であることを意味している。これによれば加速度が破壊加速度に近付くと、斜面表層部では斜面の長い区間で等値線が法面にほぼ平行となり、表面に近い程その指示する $\sin \phi_0$ の値が大きくなり、しかもその値は水平加速度の増大に伴って増加している。

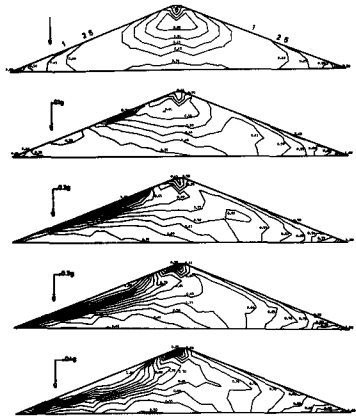


図6 $\sin \phi_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2}$ の等値線

解析的に得られた以上の事項と実験的に得られた滑り線の形状などをもとに、大胆ではあるが堤体の破壊震度を次の様にして試算してみた。図5に示した堤内の各点における滑り出しの方向を順次連ねて描ける曲線群は、潜在的な滑り線群と考えられるが、ここでは特に右側斜面の法面を通る潜在滑り線に注目し、その線上における $\sin \phi_0$ の平均

値で堤体法面の安定度を評価することにした。

図7は1:1.8, 1:2.5, 1:3.0の3種の法面勾配をもつ堤体に対して各水平震度 K_H 毎に $\sin \phi_0$ の平均値 $\overline{\sin \phi_0}$ を計算し、それから求まる $\overline{\phi_0}$ と K_H との関係を示したものである。安定解析の結果を示す本の実線はほぼ平行で、その傾きは概ね $\tan^{-1}(K_H)$ に等しい。 K_H を定めた場合、急勾配の堤体ほど $\overline{\phi_0}$ の値が大きいことは急勾配の法面ほど滑りに対して不安定であることを意味している。法面勾配を角度 θ で表現し、 $\overline{\phi_0}$ に対応する水平震度を $(K_H)_f$ と記して $\theta + \tan^{-1}(K_H)_f$ を計算すると、それは $\overline{\phi_0}$ とほぼ同程度の最大 4° 程度大きな値を示すにすぎなかった。従って本解析の範囲内では近似的に

$$\theta + \tan^{-1}(K_H)_f \doteq \overline{\phi_0} \quad \text{式(2)}$$

とおけるものとみられる。

摩擦が崩壊の主要因であるとし、大胆な仮定に基づく本解析方法によって実験的に得られた式(1)と同様な式(2)が得られ、巨視的な立場から堤体の破壊を考究した。

4. まとめ

均一型ロックフィルダム模型の崩壊現象は、大局的には摩擦の考えでほぼ説明できることが実験的にも解析的にも確かめられた。今後更に材料の動的性質をも含めて堤体の破壊現象を検討して行く積りである。

未算ながら本研究に際しては東京大学生産技術研究所 加藤勝行氏と東京電力株式会社とから御協力を戴いたことを記して謝意にかえたい。

参考文献、引用文献

- 1) 岡本舜三：「耐震工学」、オーム社、1971。
- 2) 田村重四郎、岡本舜三、加藤勝行：「ロックフィルダム模型の振動破壊実験」、土と基礎、vol.20、NO.7、1972。
- 3) 岡本舜三、田村重四郎、加藤勝行：「ロックフィルダムの模型振動破壊実験について」、第12回地震工学研究発表会、1972。

θ ϕ_0	1:1.8 (29.1°)		1:2.5 (21.8°)		1:3.0 (18.4°)	
	$\sin \overline{\phi_0}$	$\overline{\phi_0}$	$\sin \overline{\phi_0}$	$\overline{\phi_0}$	$\sin \overline{\phi_0}$	$\overline{\phi_0}$
0	0.500	30.0°	0.416	24.6°	0.378	22.2°
0.1	0.561	34.1°	0.490	29.5°	0.444	26.4°
0.2	0.626	38.8°	0.558	33.9°	0.521	31.4°
0.3	0.675	42.5°	0.625	38.7°	0.592	36.3°
0.4	0.745	48.2°	0.689	43.6°	0.661	41.4°

$$\sin \overline{\phi_0} = \frac{\theta + \theta_f}{(1.0, 0.9)}$$

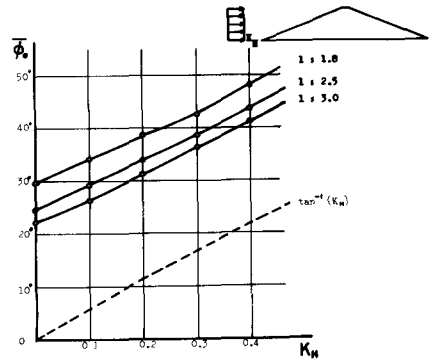


図7 安定度の試算結果