

(114) ロックフィル材料の粒径が地震時表層すべりに与える影響に関する実験

建設省土木研究所 ○豊田 光雄 志賀 三智 正員 松本 徳久

1. はじめに

ロックフィルダムの地震時の安定性を検討する上で表層すべりの問題は重要な位置を占める。表層すべりではフィル材料の最大粒径、粒度および密度が影響すると考えられる。本報告は、これらのうちでフィル材料の最大粒径と表層すべりとの関係について実験的に検討したものである。

これまでの最大粒径と堤体加速度との研究^{1),2),3)}によれば、破壊基準が必ずしも明確にされていないものもあるが、最大粒径の大きい方が堤体破壊加速度は大きいという傾向が報告されている。一方、表層すべりを材料の摩擦抵抗で説明した場合、最大粒径の小さい方が内部摩擦角が大きくなるという既往の三軸試験結果^{4),5),6)}を用いると粒径の小さい方が堤体破壊加速度は大きくなる計算となり上記の結論と異なる。

そこで、本実験では、フィルダム堤体全体を模型化するのではなく表層の一部の要素モデルで行い、相対変位をパラメータにして最大粒径と表層滑動加速度を求めた。また、ダム法面表層付近の摩擦抵抗を調べるために材料の安息角および三軸試験による内部摩擦角を求め表層滑動加速度との関連について検討を加えた。

2. 実験材料および実験装置

実験には表-1に示す砕石およびロック材を用いた。これらの材料の最大粒径は100, 38.1, 19.1, 4.76, 2.00 mmで図-1に示すような単一粒径である。

要素モデルを作製する土槽(巾2.0 m, 高さ1.2 m, 長さ3.0~4.2 m, 土槽前面の傾き135°)を図-2に示す。土槽は、表-2の性能をもつ振動台上にセットする。

表-1 実験材料

呼び名	砕石	ロック材
岩質	硬質砂岩	粗粒玄武岩
絶対比重	2.65	2.68
吸水量	0.4%	1.8%
最大粒径mm	38.1, 19.1, 4.76, 2.00	100

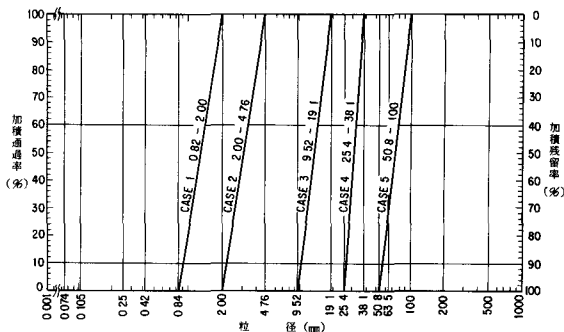


図-1 粒度曲線

表-2 振動台の仕様

振動台	鋼床版構造	
	大きさ	40m×40m
最大積載重	重さ: 13.5トン	
最大変位	水平	±100mm
	鉛直	±50mm
最大加速度	水平	1g
	鉛直	1g
加振機	水平	295トンアクチュエーター 2台
	鉛直	273トンアクチュエーター 3台
加振方向	水平1軸および鉛直, 2軸加振可能	
加振波形	正弦波および任意の地震波	

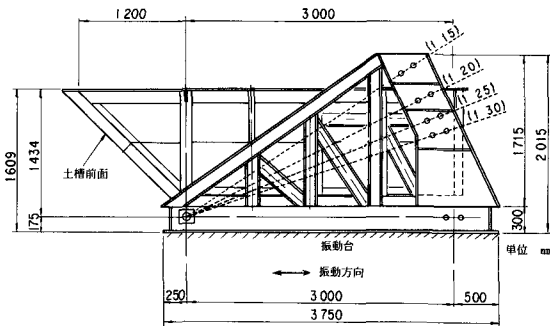


図-2 土槽寸法

3. 材料の静的安息角および低拘束圧下における内部摩擦角

材料の静的安息角は材料を自由落下してできあがった円錐状斜面の傾きから求めた。図-3に示すように静的安息角は最大粒径が大きくなるに従い大きい値を示す。このときの密度も最大粒径が大きくなるにつれて増える。

なお、この試験では材料を自由落下させるため密度をどの粒径でも同じにすることは不可能である。

法面表層付近の内部摩擦角を求めるために直径 30 cm, 高さ 60 cm の供試体による三軸試験を側圧 0.3 kgf/cm²で行った。試験条件は不飽和材料の圧密排水状態である。粘着力成分を無視して内部摩擦角を求めて最大粒径との関係を図-3 に示す。三軸試験による内部摩擦角は、静的安息角ほどの変化はないが、最大粒径が大きくなるに従い大きくなっている。このときの密度は、最大粒径に関係なく約 1.54 t/m³である。

この結果は、前にも触れたように、最大粒径が小さいほど内部摩擦角が大きくなるという既往の試験結果と異なる。この理由として今回の実験では、①既往の粒径効果を求めた三軸試験に比べ今回の試験が低側圧であること、②均等係数がほぼ 1 の単一粒径で細粒分の影響がないこと、が考えられる。

4. 要素モデルの大きさの決定

要素モデル実験では、全体模型実験と異なり応力、ひずみの相似律を考慮しない代わりに、堤体の挙動を正確に再現できるモデルを作らなければならない。すなわち、図-4 に示すように要素モデルはダム法面の一部を取り出すため要素モデルの動きがいろいろと拘束されてはならない。このため要素モデルの厚さ、巾、モデル前面の傾きをあらかじめ調べておく必要がある。

実験は、粒径 508 ~ 100 mm のものを使用し、表-3 に示すように要素モデルの

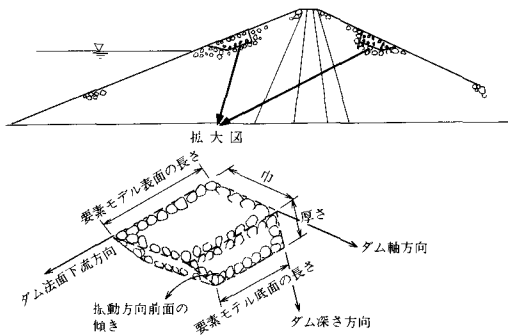


図-4 要素モデル

厚さ、巾、傾きを組合せ、5 Hz, 10 秒間の正弦波加振を行った。土槽底面には、実ダムにおいて粒子と粒子とが接触していることから要素モデルでも材料をセッコウではりつけた。

図-5 に要素モデルの表層滑動加速度と要素モデル厚さ、巾、前面の傾きとの関係を相対変位 5, 10, 15 mm をパラメーターにしてプロットしたものをそれぞれ示す。これより次のことが言える。

- ① 要素モデルの厚さ(ケース1)については、要素モデル厚さが厚くなるにつれて要素モデル表面の滑動加速度は相対変位 5, 10 mm において 60 cm から落ちつく傾向にあるが、要素モデル底面の滑動加速度はどの相対変位でも減少していく。つまり要素が厚くなると表面と底面との滑動加速度差が大きくなり要素モデルを一体のものとして考えられない。
- ② 要素モデルの巾(ケース2)の影響は、巾が広くなるにつれてモデル表面および底面の滑動加速度は小さくなり、巾が狭いときは側面の拘束の影響が大きいことを示している。

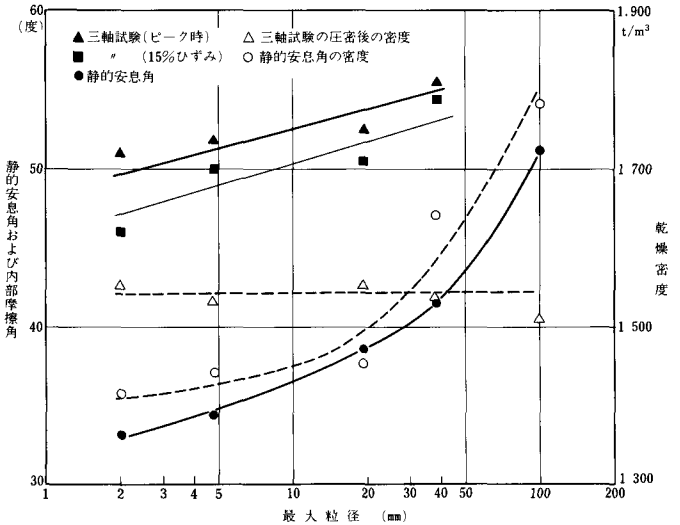


図-3 最大粒径と静的安息角および内部摩擦角

表-3 要素モデルの検討

ケース	要素モデルの厚さ (cm)	要素モデルの巾 (cm)	要素モデル前面の傾き (度)
1	1-1	100	135°
	1-2	80	
	1-3	60	
	1-4	40	
2	2-1	100	135°
	2-2	140	
3	3-1	200	90°
	3-2	200	110°

(土槽勾配 1:2.0)
水無し

③ 振動方向前面の傾き（ケース3）は，角度を変えても要素モデルの滑動加速度はほぼ同じであった。これは，モデル長さがモデル表面でも3.6m（厚さの6倍）と長く振動方向前面の傾きの拘束が打ち消されたのではないかと考えられる。

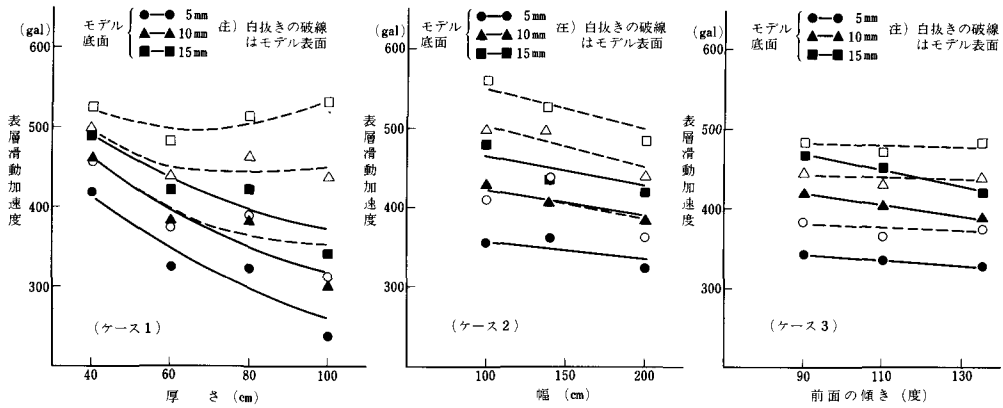


図-5 要素モデルの厚さ，巾，前面の傾きと表層滑動加速度との関係

以上の結果を踏まえ，要素モデル厚さは要素厚に左右されず一定の表層滑動加速度が生じ要素表面と底面との加速度差が少ない60cmを，巾は一定の表層滑動加速度にならないものの土槽巾と同じ200cmを，振動方向前面の傾きは土槽の傾きと同じ135度とした。

5. 最大粒径と表層滑動加速度

1.52~1.54 t/m³の密度に締め固めて作製した要素モデルは2割勾配にして振動台上にセットした。実験は，正弦波（5Hz，50波）を用い振動台の加速度振巾をだんだんと増加させていった。

要素モデルの表層滑動加速度および相対変位は，図-6に示す箇所にサーボ型加速度計（±5G，非直線性0.3%FS）および差動トランス型変位計（±25mm，非直線性1%FS）を設置して求めた。

実験ケースを表-3に示す。

実験より得られた要素モデルの表層滑動加速度および相対変位の時刻歴の一例を図-7に示す。任意の加振における表層滑動加速度と相対変位は，表層滑動加速度の場合そのときの加速度両振巾の半分とし，相対変位は加振後と加振前の相対変位差にこれまでに生じてきた相対変位を加えて求めた。

表-3 実験ケース

ケース	最大粒径	密度 (γ_d)	要素モデルの法面勾配	加振条件	備考
1	200mm	1523 t/m ³	1:20	正弦波 5 Hz 50 波 10 秒	砕石
2	476	1534			"
3	191	1551			"
4	381	1523			"
5	100	1525		ロック材	

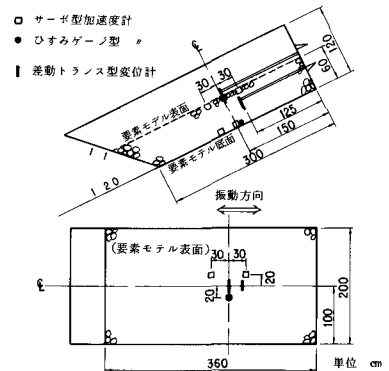


図-6 センサーの設置箇所

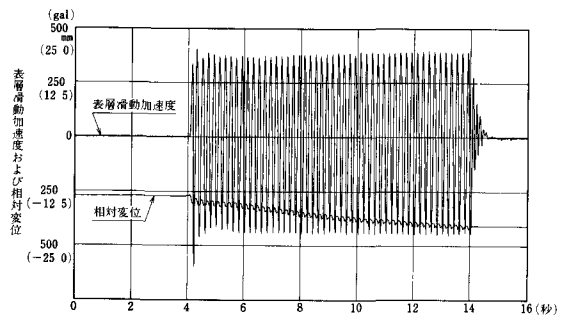


図-7 表層滑動加速度および相対変位の時刻歴

図-8は，横軸に要素モデルの相対変位を，縦軸に要素モデルの表層滑動加速度を示し，最大粒径をパラメータにしてプロットしたものである。当然のことながらどの粒径でも要素モデルの相対変位が増えるにつれて表層滑動加速度も大きくなっている。

図-9は、図-8において相対変位が1, 5, 10, 15 mmのときの最大粒径と表層滑動加速度との関係である。最大粒径が大きくなるにつれて要素モデルの表層滑動加速度も大きくなる。すなわち、堤体材料の最大粒径と表層滑動加速度との相関は強く、例えば堤体表層で10 mmの相対変位(≒破壊)を生じさせるには100 mmの粒径では470 galの表層滑動加速度が必要なのに2 mmの粒径ではその半分程度の280 galの表層滑動加速度でよい。いかえれば小さい粒径で作ったフィルダムほど小さい表層滑動加速度で表層すべりが起こることを示している。

このことを材料の摩擦抵抗から検討する。表層すべりを粒子の摩擦抵抗で表現すれば表層滑動加速度(α)は次式で示すことができる。

$$\alpha = \tan(\phi - \theta) \cdot g$$

ϕ ; 静的安息角または内部摩擦角

θ ; 法面の勾配 g ; 重力の加速度

これに3項で求めた ϕ をそれぞれ代入して計算し図-9にプロットした。安息角で計算した表層滑動加速度は粒径が大きくなるにつれて急激に増加する。一方内部摩擦角で求めた表層滑動加速度も粒径が大きくなるにつれて要素モデル実験と同様な増え方を示している。すなわち、材料の内部摩擦角が大粒径ほど大きいため表層滑動加速度は増えることを明瞭に示している。

6. まとめ

要素モデル実験によって表層すべりにおける最大粒径の効果を実験的に考察した結果次のことがわかった。

- 1) 表層滑動加速度は最大粒径との相関が強く、同じ相対変位を生じさせるのに最大粒径の大きい方が大きな表層滑動加速度を必要とする。
- 2) 滑動の原因が材料の摩擦抵抗によるものと考えれば、材料の安息角、内部摩擦角が大きく関与している。すなわち、今回の単一粒径による静的安息角試験および低拘束圧下の三軸試験によれば、最大粒径が大きいほど静的安息角および内部摩擦角は大きな値を示した。
- 3) 三軸試験から計算した表層滑動加速度と最大粒径との関係は、今回の要素モデル実験の表層滑動加速度と最大粒径との関係と同様の傾向を示した。

なお、実ダムは、単一粒径のみで堤体が設計されているわけではないので、今後は粒度等の相関についても検討していきたい。

参考文献

- 1) 田村重四郎：ロックフィルダム模型振動実験，大ダム第73号 1975.9
- 2) 建部英博・大根義男：大型模型によるロックフィルダムの振動挙動について 第15回土質工学研究発表会
- 3) 建部英博・大根義男：低拘束圧時におけるロック材のせん断強度について S54年 土木学会中部支部報告
- 4) N.D.Marachi, C.K.Chan, H.B.Seed, J.M.Duncan: Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials, Report No. TE-69-5, U.C.Berkeley, 1969.
- 5) 松本徳久・渡辺和夫・村上清基：ロック材料の最大粒径と三軸圧縮強度，土木技術資料，Vol.25, No.12, 1983.
- 6) 大本家正・上村寿一・長瀬 修・新屋数隆・貞弘丈佳：粗粒材料の三軸試験における最大粒径の影響について，第38回建設省技術研究会，河川部門自由課題，1984.

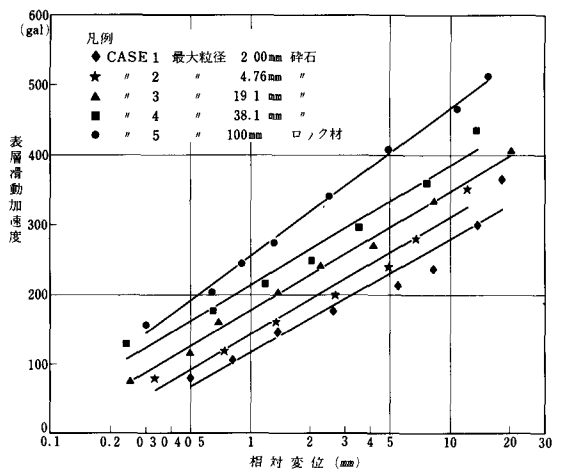


図-8 要素モデルの相対変位と表層滑動加速度との関係

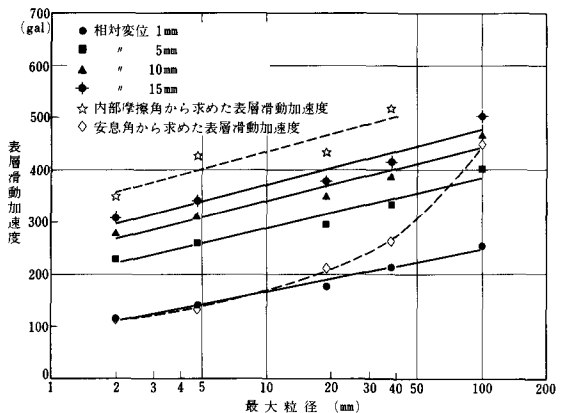


図-9 最大粒径と表層滑動加速度との関係