

小型振動台模型実験を対象とした静的・動的弾塑性有限要素解析

Static and Dynamic Elasto-Plastic Finite Element Analysis for Small Shaking Table Model Test

森 洋 〇高田 侑二郎
Mori Hiroshi Takada Yujiro

1. はじめに

フィルダムの耐震性を検討するために用いられる小型模型実験は粒子径効果や圧力レベル効果を含んだスケール効果等の影響が懸念されるものの、取り扱い方が比較的簡便で、短時間で何度も地盤条件を変化させた模型実験が可能であるため、基礎的な振動特性を把握するための実験としては大変有効である。また、それらの振動特性を数値解析で再現できれば、実規模モデルでのフィルダムの耐震性評価が可能となる。そのため当研究室では、**Fig.1** に示した天端幅 5cm、堤高 9cm、奥行き 13.1cm の堤体模型を作成できる小型振動台模型実験装置を用いて、ゾーニング形式の異なる各種フィルダムの耐震性を検討してきた¹⁾。

本研究では、ゾーニング形式を均一型 (Case1)、コア材を伴った中心コア型 (Case2) と傾斜コア型 (Case3) とした場合 (**Fig.2** を参照) の小型振動台模型実験と静的・動的弾塑性有限要素解析で比較・検討する。

2. 静的弾塑性有限要素解析

実務設計レベルでのフィルダムの耐震性評価は、古くから震度法による円弧すべり計算手法での安全率評価が慣用的に用いられてきた。また、これまで実務設計で用いられてきた震度法による耐震性評価手法が実際の地震時における動的挙動とどの様な対応関係にあるのかを同じ地盤の構成モデルを用いた有限要素解析で定量的に評価した事例は少なく、今回の様な動的振動特性を検討する上でも、まずは静的な耐震特性を把握しておくことが重要である²⁾。**Fig.3** は、模型実験モデルでの有限要素メッシュ (節点数 361; 要素数 324) を示す。今回用いた土の構成モデルは、拘束圧の依存性やせん断帯の影響等を含めたひずみ軟化挙動を表現できる³⁾。**Fig.4** は、円弧すべり計算手法との適応性を検討するため、初期応力 (自重) 解析を行った後、水平震度に相当する増分荷重を水平方向に作用させていく水平震度 (kh) を増加させていった時の法肩部での鉛直方向の変位量と安全率 (Fs) を示す。ちなみに、フィル材の材料定数を ρ_t (湿潤単位体積重量) = 15kN/m³、 ϕ (内部摩擦角) = 42°、 c (粘着力) = 2kN/m²、 G_0 (初期せん断弾性係数) = 1000kN/m²、コア材の材料定数を ρ_c = 20kN/m³、 ϕ = 5°、 c = 128kN/m²、 G_0 = 1,000kN/m² とした。解析での限界水平震度 (khc) を変化量が大きくなった変曲点、また、円弧すべり計算手法では Fs が 1 を切る時点とすると、Case1 の khc は共に 3.2、Case2 の円弧すべり計算手法と解析での khc は 5.0 と 5.8、Case3 上流での khc は 6.5 と 7.0、Case3 下流での khc は 4.5 と 4.2 になり、両者の適応性は比較的良好と言える。また、例えば Case1 の khc に重力加速度 (980Gal) を乗じた場合の準静的な加速度は約 3,100Gal となり、かなり大きな地震動 (レベル 2 地震動) にも耐えられる実験条件であることがうかがえる。**Fig.5** は、khc 付近での円弧すべり面形状と解析による最大せん

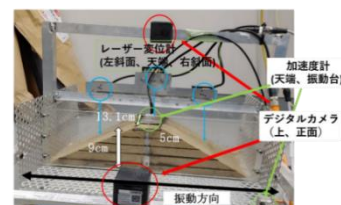


Fig.1 小型振動台模型実験装置

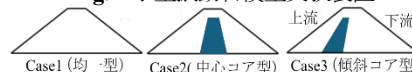


Fig.2 検討ケース

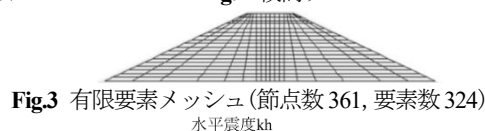


Fig.3 有限要素メッシュ (節点数 361, 要素数 324)

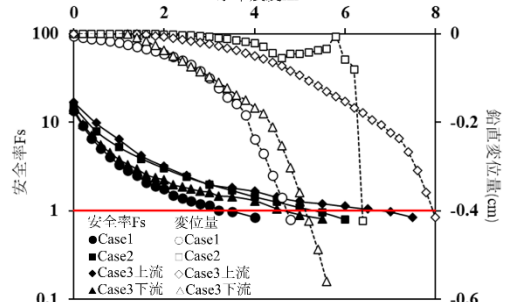


Fig.4 水平震度 kh と鉛直変位量・安全率 Fs

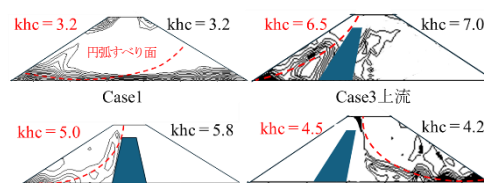


Fig.5 円弧すべり面形状と最大せん断ひずみ分布

断ひずみ分布を示すが、円弧すべり面領域にひずみが集中する傾向にある。

3. 動的弾塑性解析有限要素解析

Fig.6 は、各ケースでの小型振動台模型実験と解析における入力加速度波形（約 4.5Hz の正弦波で最大加速度が 1,400Gal）と天端部の応答加速度波形を示す。動的解析でのフィル材の材料定数は ϕ と c の軟化パラメータ (0.5) を採用し、残留内部摩擦角 (34°) 等を設定している。今回の実験による天端部の応答加速度は解析よりも大きくなる傾向にあり、今後、せん断弾性係数 (G_0) 等のパラメータの精査が必要である。また、Case1 の実験では 20 秒以降で天端部での崩壊が顕著になるため、加速度計の固定が維持できなくなり、加速度波形のドリフトが現れる傾向にあった。

Fig.7 は、各ケースでの実験（破線）と解析（実線）による天端部での鉛直変位挙動を示す。実験も解析もコア材による沈下の抑制効果が見受けられ、Case2、Case3、Case1 の順で鉛直変位量は小さくなるが、実験値の方が解析値よりも約 3 倍程度大きくなる傾向にあった。これらの要因としては、**Fig.6** で示した解析での応答加速度が実験値よりも小さかったこと等から、今後、更なる検討が必要である。**Fig.8** は、各ケースでの実験結果とせん断ひずみ分布を示す。Case1 の実験では堤体の下部領域まで無数のせん断帯が発生しており、解析においても堤体の下腹部領域にまでひずみの集中が見られる。Case2 の実験では Case1 よりも下部領域でのせん断帯の発生が抑えられている傾向にあり、コア部に沿ったせん断帯が発生しているが、解析においても堤体の上部領域でのコア部周面にひずみが集中する傾向にある。Case3 の実験では Case2 と同様にコア部周面でのせん断帯の集中が見受けられるが、上流側でのフィル材のせん断帯の発生が抑えられる傾向にあり、解析結果も同様な傾向を示す。

4. まとめ

今回実施した 3 ケースでの小型振動台模型実験に対する円弧すべり計算と静的弾塑性有限要素解析から得られる地盤条件での限界水平震度等は一致する傾向にあり、レベル 2 地震動に相当するかなり大きな地震動にも耐えられる実験条件であることが分かった。また、それらの地盤条件に対する振動特性をひずみ軟化モデルを用いた動的弾塑性有限要素解析で再現できる可能性を示した。

(参考文献) 1)森洋・高部侑太(2024):ゾーニング形式が異なる「ため池堤体」の小型振動台模型実験、農業農村工学会論文集、No319(92-2)。 2)森洋・田中忠次(2002):地震時の安定斜面問題を対象とした準静的弾塑性有限要素解析と円弧すべり計算、農業土木学会論文集、No.222、pp.713-720。 3)森洋・田中忠次(2008):ひずみ軟化弾塑性モデルによる時の FEM 斜面安定解析、農業農村工学会論文集、No254、pp.121-125。

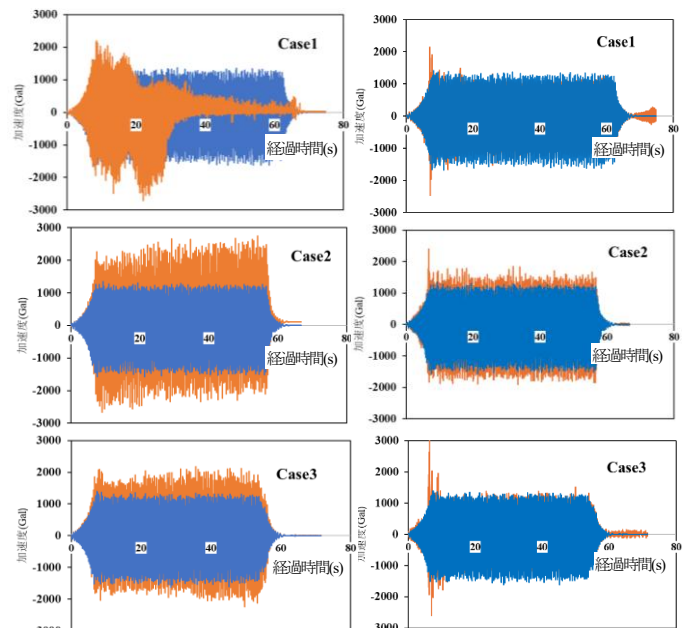


Fig.6 応答加速度波形（左図：実験、右図：解析）

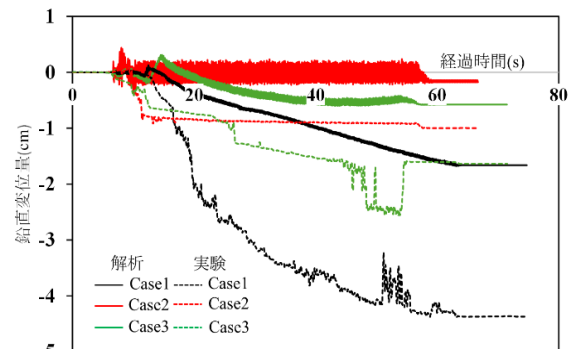


Fig.7 天端部の鉛直変位量

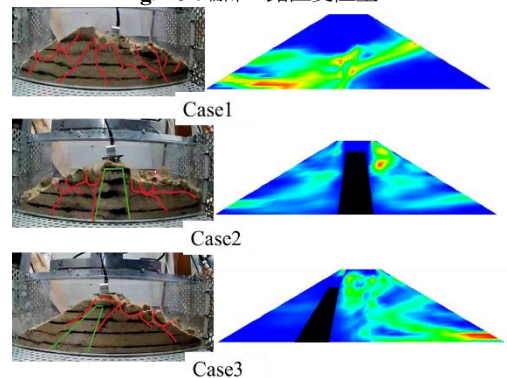


Fig.8 実験結果とせん断ひずみ分布