

ため池堤体の遠心力载荷試験と土の強度低下を導入した FEM 解析 (Centrifugal model tests for reservoir embankment and FEM analysis introducing soil strength reduction)

○王博涵*・君嶋美優**・入栄貴***・毛利栄征****
○Bohan Wang・Miyu Kimijima・Hiroki Iri・Yoshiyuki Mohri)

1. はじめに

本研究はため池堤体模型の遠心力载荷試験を実施し、貯水状態の堤体の地震時の崩壊メカニズムを明らかにするとともに、残留強度、繰返しによる強度低下特性を導入した全応力弾塑性有限要素解析手法を用いて再現解析を行い、解析手法の適応性を検討した。

2. 遠心力载荷試験の概要（農村工学研究所）

遠心力を 30G とし、堤高 9m の中規模ため池堤体を想定して、堤高 30cm の模型で震動実験を実施した。本実験で作成した模型地盤は、基礎地盤を最適含水比 $w_{opt}=15.4\%$ の佐原砂で D 値 95% となるように構築した。堤体は D 値 85% である。佐原砂の物理特性を Table 1 に示す。実験は Fig.1 に示すように、加速度計、レーザー変位計などの各種測定器と高速度 CCD カメラを用いて、堤体挙動をモニターした。本実験の貯水はメトローズ水溶液を使用し、30G 場での粘性が 1G 場の水と同じになるように濃度調整を行い、貯水状態を維持した。加震条件は Fig.2 に示すように、正弦波・3Hz の 20 波を 1 ステージとして、0.5m/s² ずつ計 8 段階の最大加速度 4m/s² の地震波である。

3. 有限要素解析の概要

遠心震動実験における堤体の地震時挙動を検証するために、2次元 FEM 解析を実施した。解析コードは Nonsolan で、降伏関数には Mohr-Coulomb 型モデルを、塑性ポテンシャルには Drucker-Prager 型モデルを採用した。Fig.3 に、使用した遠心実験モデルの有限要素メッシュを示す。節点数 1,549、要素数 1,519 である。解析に用いたパラメータは Table 2 に示す。本解析は土のピーク強度から残留強度へ低下する軟化挙動の影響と地震による土の強度低下の影響を明

Table 1 佐原砂の物理特性
Physical properties of Sawara sand

項目	単位	値
土粒子密度	g/cm ³	2.755
最大乾燥密度	g/cm ³	1.723
最適含水比	%	15.42
最大粒径	mm	2.00
細粒分含有率	%	13

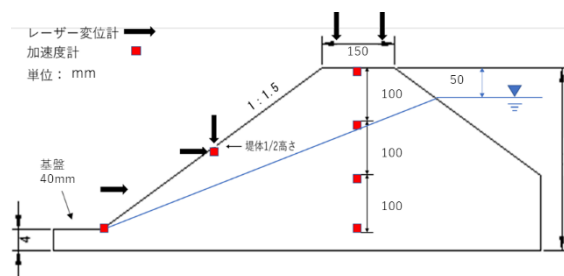


Fig.2 堤体模型
Embankment model

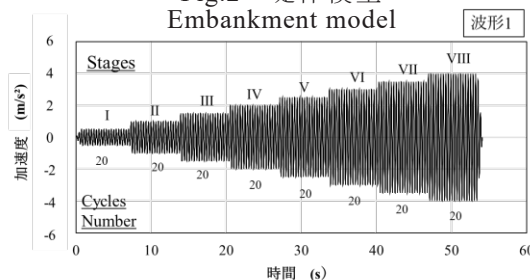


Fig.1 入力波形
Input waveform

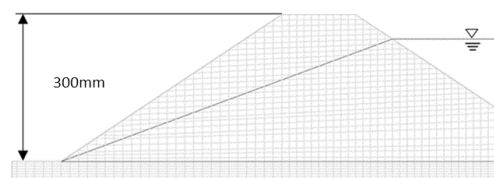


Fig.3 解析メッシュ
Analysis mesh

*東京農工大学連合農学研究科, United Graduate School Of Agriculture Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, **内外エンジニアリング株式会社, Naigai Engineering Co., Ltd., ***鉄道総合技術研究所, Railway Technical Research Institute, ****茨城大学農学部, College of Agriculture, Ibaraki University. キーワード: 遠心力载荷試験、FEM、強度低下、残留強度。

らかにするために、堤体飽和部の解析条件を変えて、3 ケースの解析を実施した。3 ケースの具体的な解析条件及び要素試験のシミュレーション結果を Fig.4 に示す。

4. 結果と考察

天端上流肩部の沈下量を 1 G 場に換算し、実験と解析の比較結果を Fig.5 に示す。残留強度及び強度低下をとともに考慮しない CASE1 は、25s 前後で沈下しはじめ、実験結果よりも大きく遅れ、最終沈下量は-0.228m であり、実験の最終沈下量と大きな差が見られる。残留強度への低下を考慮した CASE2 は、沈下始点が若干早くなり、概ね 23s 前後で沈下しはじめ、最終沈下-0.432m である。CASE1 よりは天端沈下量の予測精度が大幅に向上した。さらに地震中の強度低下を考慮する CASE3 は早い段階で沈下が始まり、20s 時点で沈下が発生し、-0.480m の沈下挙動を予測できている。以上のように、飽和土の残留強度にいたる軟化特性及び地震による強度低下が堤体の地震時挙動に大きな影響を与えていることが分かる。解析結果では最大せん断ひずみが帯状に連続することが確認でき、地震時の破壊現象を適切に予測できていることを示唆している。Fig.6 には実験と CASE3 の天端加速度応答の結果を示す。加速度ステージⅦまでは、解析結果は実験結果をよく表している。実験の最終ステージでは応答が低下しているが、解析では破壊領域が下流側斜面部に集中していることから天端応答の減衰を予測できていない。

5. まとめ

本研究は、全応力状態での土のピーク強度から残留強度までの軟化現象及び地震による土の強度低下現象を解析に導入することにより、堤体の沈下量及び加速度応答をある程度予測できることを示した。土構造物の地震時の挙動を定量的に予測する可能性を示した。

参考文献

- 1) 王博涵, 田頭秀和, 泉明良, 毛利栄征, 田中忠次 (2018) : ため池堤体の石積みブロック補強に関する遠心振動実験と解析的検討, ジオシンセティックス論文集, No.33, pp.167-174.
- 2) 田中忠次 (1992) : 有限要素法による変形・安定解析(主に砂質土を対象にして), わかりやすい土質力学原論(第1回改訂版), 社団法人地盤工学会, pp.109-154.

Table 2 解析パラメータ
Analysis parameters

材料	E (MPa)	v	ρ (kg/m ³)	φ _p (deg)	φ _r (deg)	c (kPa)
基盤飽和	29.40	0.30	2,020	24.15	24.15	245
堤体飽和	29.40	0.30	1,920	21.72	15.00	12
堤体不飽和	29.40	0.30	1,680	35.00	35.00	8

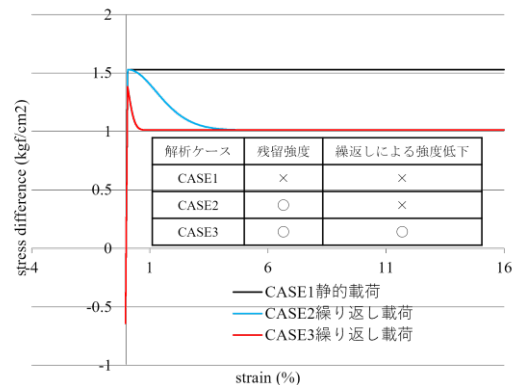


Fig.4 要素試験シミュレーション
Element test simulation

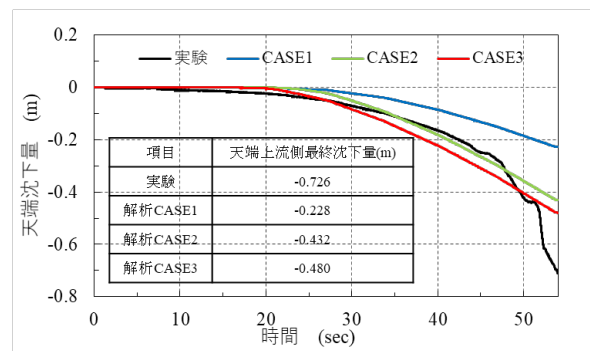


Fig.5 堤体上流側沈下量結果比較
Comparison of embankment settlement

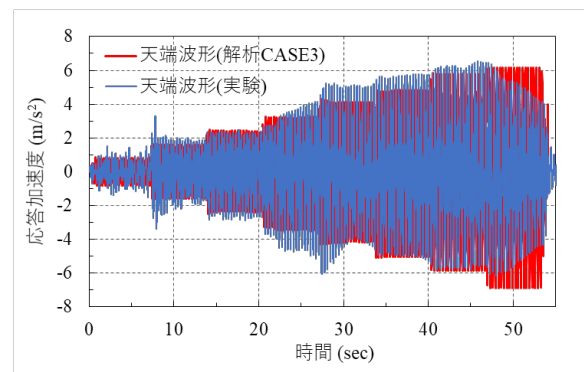


Fig.6 堤体天端応答加速度比較
Comparison of response acceleration at the top of the embankment