

不飽和地盤の浸透－動的変形連成問題に対する

FLIP TERA プログラムの適用性検討

上田 恭平*

1. 研究の目的

全国には約 20 万の農業用ため池があり、それらの大半は経験的な勘によって築造されたといわれている¹⁾。そのため十分な耐震性を有しておらず、過去の地震で被害が数多く報告されている^{例えば、}2)。現状、これら膨大な数のため池の耐震改修が急務となっている。そこで本研究では、浸透流がある状態の盛土に対策工を施した場合、ならびに対策工を施さなかった場合の地震時挙動について遠心模型実験を実施し、FLIP TERA プログラムによる 2 次元有効応力解析の適用性を検討した。

2. 研究の方法

(1) 遠心模型実験

遠心模型実験には京都大学防災研究所の遠心力荷装置(回転半径 2.5 m)を用いた。実験は遠心場の相似則を用いて縮尺 1/50 とし、不透水剛基盤上のため池堤体盛土を想定した。実験模型の概略図を図 1 に示す。水位の違い・対策工の有無を考慮し、全 4 ケースを行った(表 1)。堤体材料としては、珪砂 8 号とカオリン粘土を重量比 9:1 で混ぜた砂を用いた(細粒分含有率 $F_c = 26\%$ 、最適含水比 $w_{opt} = 20\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.55 \text{ g/cm}^3$ 、透水係数 $k_w = 5.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)。間隙流体には保水性を優先し、粘性流体ではなく脱気水を用いた。

遠心加速度 50G 到達後、遠隔操作により遠心場で堤体上流側へ水を供給した。浸透が定常状態(下流側法先の水圧計 P1 が一定の値、または排水タンクの水圧計 P8 が線形勾配を示す)に到達した後に加振を行った。加振波は 1 Hz のテーパ付正弦波 10 波とし、振幅は 300 gal に設定した。

(2) 有効応力解析

数値解析には、排水解析機能を組み込んだ多重せん断機構を土の構成則とする 2 次元有限要素有効応力解析プログラム FLIP ROSE を基礎に、不飽和土の支配方程式および水分特性曲線、不飽和透水・透気係数のモデル化を考慮した三相系プログラム (FLIP TERA) を用いて解析を行った。定式化の詳細は、参考文献を参照されたい^{例えば、}3)。境界条件については、浸透流解析時は盛土内に流入と流出の境界を設け、動的解析時は盛土表面を過剰間隙水圧ゼロ境界に設定した。

3. 得られた成果

(1) 実験・再現解析結果

図 2, 3 にそれぞれ実験と解析における最大せん断ひずみ分布と天端沈下量を示す。なお、解析結果における変形率は 5 倍である。実験結果において、Case 1 では加振により上流側へずべる変形モードが見られ、下流側にもややひずみが発達している箇所がある。一方、解析結果では一見すると真逆の傾向になっているように見える。この原因として、①実験結果では法先部の変位を計測して

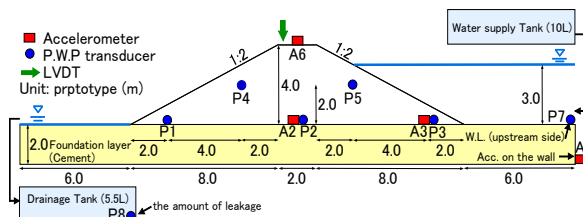


図 1 遠心模型実験の概要図

表 1 実験ケース

	W.L.	Dc	Arias Intensity	対策工
Case 1	3m	86%	6.94 (m/s)	
Case 2	2m	86%	6.25 (m/s)	
Case 3	3m	86%	6.96 (m/s)	下流にドレイン (珪砂4号)
Case 4	3m	86%	7.32 (m/s)	上流に押え盛土 (混合砂, Dc=95%)

*京都大学防災研究所・准教授

いないこと、②奥行き方向に確認されたすべりを表現できていないことが考えられる。沈下量の大きな原因については、これら上流・下流両方向へのすべりが影響したと思われる。Case 2ではひずみの発達が抑えられていることが実験・解析よりわかる。ただし、沈下量については、解析では実験ほどは抑制できていない。Case 3では下流側にひずみがほとんど見られず、また沈下量を抑制できている。これはドレーンの敷設効果により、堤体内の浸潤線が下がったためであると思われる。Case 4では下流側に顕著なひずみ発達部が確認できる。これは上流側に敷設した押え盛土が、地震時に慣性力として作用したためだと考えられる。しかし上流側のひずみは下流側と比べて抑えられており、押え盛土が一定の役割を果たしたことが示唆される。一方、天端沈下量を比較すると、解析結果が実験結果の約半分となっている。これは解析において、実験結果で計測された堤体下部層における液状化を考慮していないためだと考えられる。

(2) 感度解析を踏まえた考察

Case 2では、解析における浸潤線位置（特に法先部）が高くなっていった。実験では水位が低いほど、相対的に堤体下部と基礎地盤との間を流れやすくなる可能性が考えられるため、下流側法先部 6要素分の透水係数を2オーダー上げた解析を実施した (Case 2-1)。Case 4では実験時に堤体下部層の締固めが十分でなかった可能性を考慮し、下部層2層分 (0.5m相当) の液状化強度を弱めた解析を実施した (Case 4-1)。これら感度解析の結果を図4に示す。

Case 2-1ではひずみレベル・沈下量ともに抑えられており、実験結果をより良く再現している。これは、法先部の浸潤線位置が高い場合には、貯水位が低くても変形がある程度大きくなることを意味する。Case 4-1ではひずみ分布はよく再現できているが、実験における沈下量を再現するには至っていない。これについては、沈下量測定用ターゲットが堤体とともに下流側へ変位したことで、沈下量を過大に計測した可能性が考えられる。

参考文献

- 1) ため池の概要, 農林水産省, http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/ (参照 2022.5.27).
- 2) 堀俊和, 上野和広, 松島健一: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策, 農村工学研究所技報, Vol. 213, pp. 175-199, 2012.
- 3) Lai, S.: Partially saturated soil: formulation through generalized fluid vector and validation with leaking test, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V, 2018.

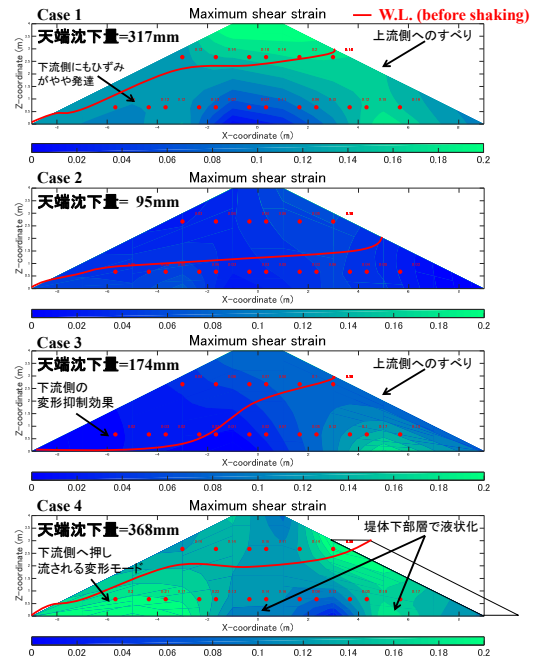


図2 最大せん断ひずみ分布 (実験)

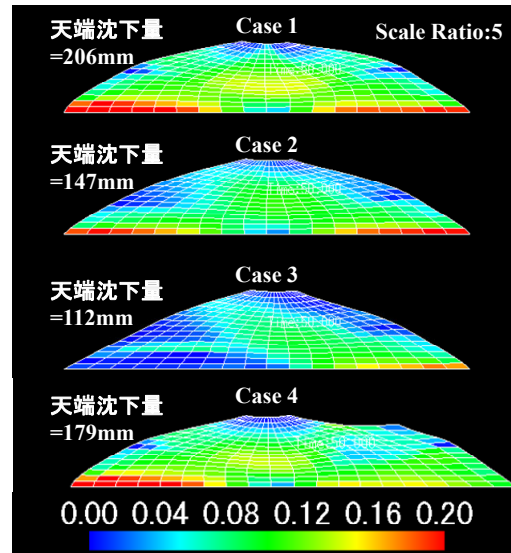


図3 最大せん断ひずみ分布 (再現解析)

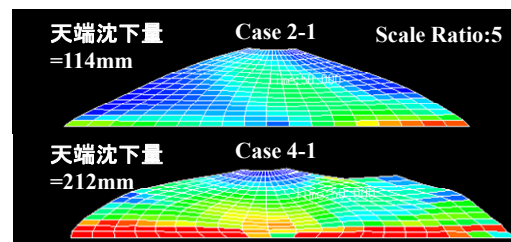


図4 最大せん断ひずみ分布 (感度解析)