

豪雨時におけるアースダムの早期崩壊検知システムの開発

宮崎大学 工学教育研究部 土木環境工学プログラム

神山 惇

豪雨時におけるアースダムの早期崩壊検知システムの開発

宮崎大学 工学教育研究部 土木環境工学プログラム

神山 惇

1. 研究背景・目的

近年、日本では豪雨が頻発し、ため池の堤体が崩壊または決壊する事例が多く発生している。現在のため池の設計指針¹⁾では、堤体中央部（最大断面）に対する安定性が検討されている。しかしながら、実際に豪雨で被災したため池は、アバット付近（堤体端部から堤体全長の1/3までの範囲）で被災するケースもある²⁾。この原因として、図-1に示すように谷筋に造成されたため池の堤体に降雨が浸透すると、特にアバット付近では基礎地盤の傾斜に沿って堤体縦断方向の浸透流が顕著になるためと推察される。

本研究の最終目標は、ため池の早期崩壊を検知するために、堤体の弱部の検出と崩壊発生の有無を評価する手法を確立することである。そのために、本研究期間では、ため池基礎地盤の谷地形によって貯水と降雨の堤内への浸透挙動がどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。基礎地盤に傾斜が有る堤体と無い堤体を作製して、模型実験を行った。貯水位だけを上昇させたケース、降雨だけを与えたケース、貯水上昇と降雨を同時に発生させた実験を行い、堤内の水分挙動と堤体の崩壊発生位置の変化について考察した。また、3次元 FEM 浸透流解析を行い、実験で生じた崩壊メカニズムについて考察し、局所的な崩壊発生の有無を評価する手法について検討した。

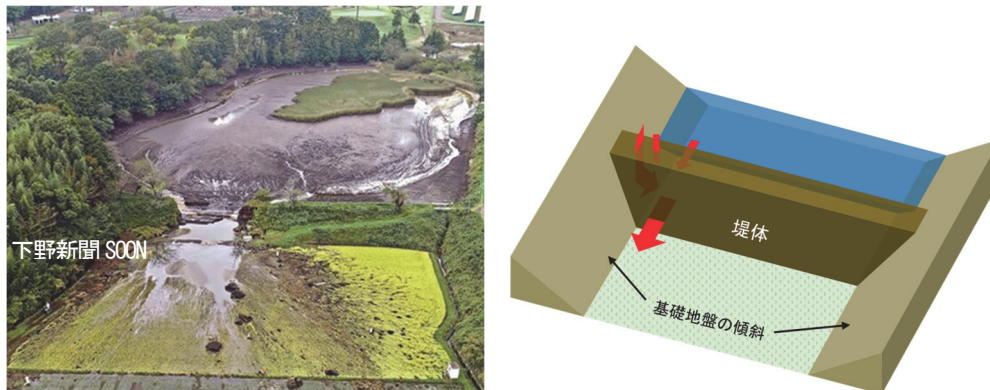


図-1 谷地形に造成されたため池堤体

2. 模型実験方法

堤体土には、まさ土を使用した。最大粒径4.75mm、細粒分含有率20.3%の砂質土である。模型実験は6ケース実施した。図-2に傾斜あり（ケース1、3、5）、なし（ケース2、4、6）の模型堤体の概要図を示す。堤体のスケールは高さ4mの中規模な実ため池の1/10を想定した。上流下流の法面勾配は36°とした。最適含水比のまさ土を1層40mmの10層に分けて締固め度 $D_r=85\%$ になるようにバイブレーダーで締め固めて堤体を作製した。図-2 (a) のケース1、3、5の堤体は、左岸側に30°の傾斜を設けて谷地形を再現した。傾斜と平地の合流点の位置を合流断面（A断面）、左岸から350mmの位置の傾斜上に位置する断面をアバット断面（B断面）、右岸から300mmの位置を右岸側断面（C断面）とした。また、2次元浸透流による堤体の浸透挙動と比較するために、傾斜がないケースは（図-2 b）、堤体中央部のA'断面を観測対象とした。

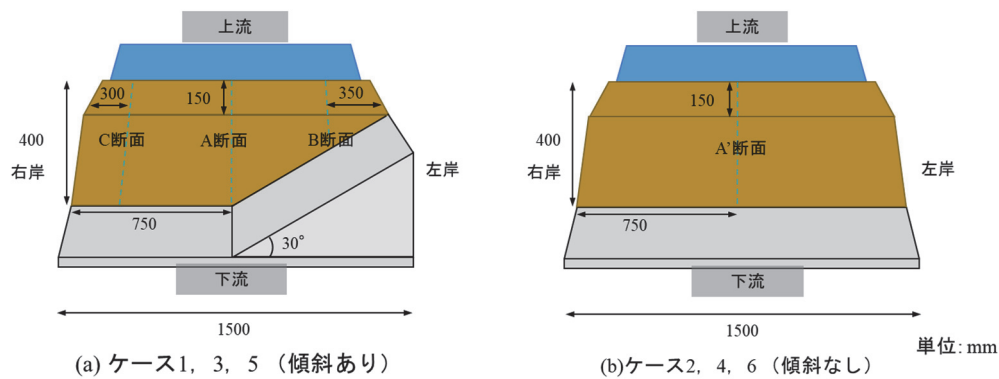


図-2 模型堤体の概要

図-3に各断面に設置した水分センサーと間隙水圧計の位置を示す。図中の番号はセンサーのNo.である。3章では、センサーNo.に各断面の符号を併記してセンサーを区別している。堤体に設置した水分センサーは、meter社のEC-5を使用した。水圧計は、東京測器研究所のKPE-PB50を使用した。これらの θ と過剰間隙水圧 Δu の挙動から堤内の水理挙動を計測した。

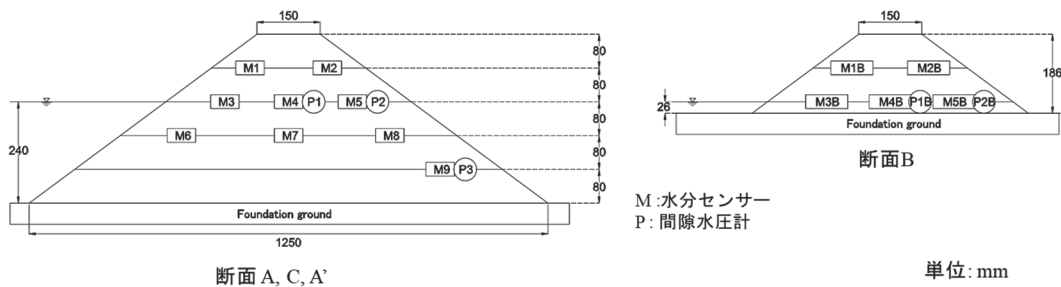


図-3 センサーの設置位置

2.3. 模型実験方法

各試験ケースの実験手順を以下に示す。

(a) ケース1、2貯水位上昇のみを与えた実験

この実験では、堤体の作製後、上流側に240mmまで水を湛水した。約10分で24cmの水位に到達した。その後、 θ と Δu が定常になるまで約1100min静置した。湛水のあと、1時間おきに貯水位を270、320、350、380mmと段階的に上昇させた。各段階でセンサーが定常状態になったことを確認し、水位を上昇させた。

(b) ケース3、4降雨のみを与えた実験

降雨実験では、模型堤体に湛水を行わずに、堤体を作製した後センサーに動きがないことを確認し降雨強度80mm/hで3時間降雨を作用させた。

(c) ケース5、6降雨と貯水位上昇を同時に作用させた実験

貯水位上昇実験と同様に、上流側に240mmまで湛水した後、約18時間静置した。その後、降雨強度80mm/hで2時間降雨を作用させた。降雨を継続させたまま、 Δu が定常状態になったことを確認し、30分おきに貯水位を270、320、350mmと段階的に上昇させた。

3. 実験結果

3.1 貯水位上昇実験における堤内の水分挙動（ケース1、2）

(1) 湛水時における水圧計の挙動

図-4に貯水位を240mm湛水するまでの水圧計の挙動を傾斜の有無で比較した。ケース1のA断面、ケース2のA'断面に設置した Δu の経時変化である、法尻のP3Aは、ケース1では100分経過してから Δu が上昇したが、ケース2のP3A'が上昇し始めたのはケース1の240分後であった。 Δu の定常値を比較すると、ケース1のほうがケース2の Δu よりも小さい。これは、合流断面では貯水の横断方向と縦断方向の浸透流が合流し、堤外へと向かう浸透流が強くなり、浸潤線が上昇しきる前に浸透水が抜け出ているためと考える。

図-5に、貯水位を240mmから380mmまで上昇させたA断面、A'断面の Δu の経時変化を示す。同じ番号の Δu の挙動を比較すると、貯水位が320mmまではケース2の Δu のほうがケース1の Δu よりも大きい。これは、ケース1の法尻付近における堤体横断方向の浸透流の流速が速まり、堤体中心部の浸透流も法尻に向かって早く排水されたためと考えられる。しかし、貯水位が320mmを超えるとケース1の Δu も上昇しており、最終的に両ケースの Δu の差は小さくなった。水位が上昇することで、崩壊部の排水よりも上流側とアバット側から回り込んでくる浸透水が上回ったためと考えられる。図-6は、ケース1の実験中の状況である。水位が320mmに到達すると、A断面とその直後にC断面法尻が崩壊した。

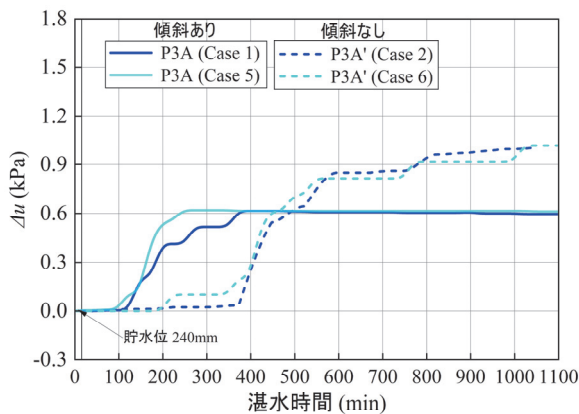


図-4 湛水時の Δu の経時変化

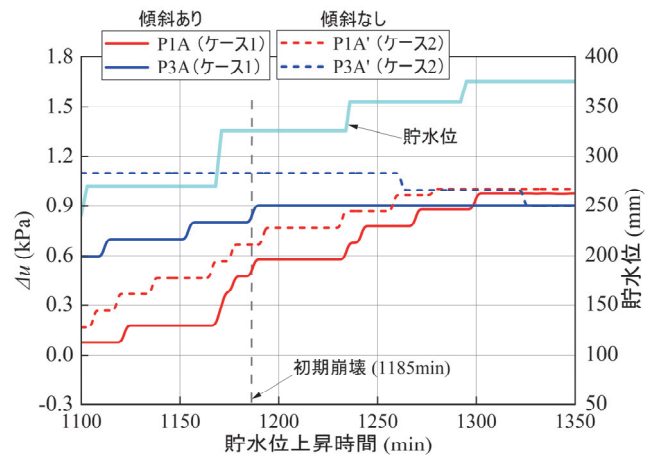


図-5 貯水上昇時の Δu の経時変化



(a) 1185 min (ケース 1, WL=320mm)

図-6 崩壊の状況（ケース 1、2）

3.2 ケース3、4（降雨実験）における水圧計の挙動

図-7に、ケース3、4のA断面、A'断面における降雨中の Δu の挙動を示す。堤体中心部に設置したケース4のP1A'はケース3のP1Aより Δu が大きい。しかし、下流側ではケース3の Δu が大きい。A断面では、堤体の縦断と横断方向の浸透流が合流するため、法尻付近の浸透流の流速が速まる。ケース3では法尻の飽和度が早く上昇した

ことで透水係数も大きくなり。P1A付近の浸透水が早く排水されたためと考える。

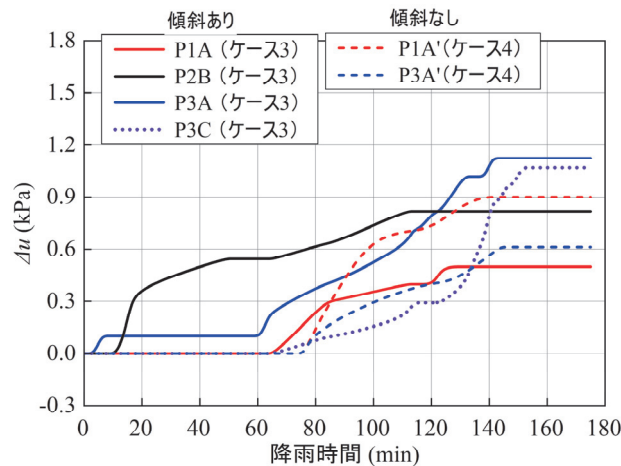


図-7 降雨時の Δu の挙動（ケース3、4）

3.3 ケース5、6（降雨+貯水位上昇実験）における水圧計の挙動

図-8は、ケース5、6において降雨を開始した1100minから貯水位上昇が終了する1320minまでの Δu の挙動である。より、法尻に設置したP2B、P3A、P3C、P3A'は、降雨開始と同時に Δu が上昇し、5分以内で定常状態に達している。堤体中央部に着目すると、P1AとP1A'は降雨から10分後に定常状態に至っているが、30分以上降から Δu が減少している。これは、ケース5では降雨開始から17分にA断面から右岸側にかけて法面が崩壊し、32分には左岸側が崩壊した。崩壊部から浸透水が抜けたため、 Δu が減少したと考えられる。

1220min以降は、降雨を作用させた状態で貯水位を上昇させた。ケース5では全ての水圧計に上昇がみられ、特にP1AとP2Bは貯水位とともに Δu も上昇している。崩壊部からの流出量より貯水と降雨の浸透量が大きいためと考えられる。

図-9はケース5の崩壊状況である。水位240mmの状態では降雨が始まるとA断面と右岸側にかけて法面が崩壊した。降雨が継続すると、法面の崩壊が天端に向かって拡大し、さらに傾斜上の法尻が崩壊した。

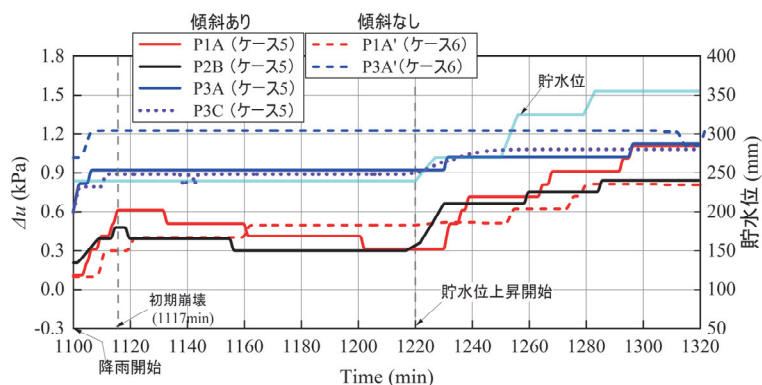


図-8 降雨と貯水位上昇中の Δu の挙動（ケース5、6）

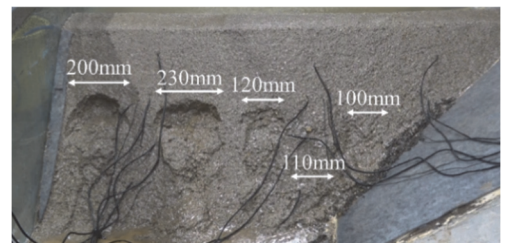


図-9 崩壊の進展状況（ケース5）

4. 3次元浸透流解析

4.1 解析方法

図-10に解析モデルを示す。模型実験と同様に、傾斜ありと傾斜なしの3次元モデルを作成した。モデル寸法は実験模型に基づいた。解析結果は、傾斜なしモデルのAs断面、傾斜ありモデルのAs'断面を出力した。解析ソフトには汎用FEMプログラムISCEF（センチュリテクノ社製）を用いた。本研究では、上記のモデルに築堤解析、浸透流解析及び湛水解析を行い、その結果を基に各要素の局所安全率を算出した。模型実験と同様に、貯水位を240mmまで湛水し、80mm/hの降雨をモデルに与えた。

4.3 解析結果

図-11に局所安全率 F_s の分布図を示す。傾斜ありモデルのAs断面において降雨開始から6分後、傾斜なしモデルのAs'断面では降雨開始10分後に F_s が1を下回る箇所がみられた。傾斜がある方が F_s が1を下回るのが早くなった。傾斜ありでは、局所安全率が1を下回る時刻の前後において、最小主応力が大きく減少しているためと推察される。

以上より、模型実験を想定し、貯水と降雨浸透を与えた3次元FEM解析を行った結果、傾斜があるモデルの方が F_s が1より小さくなる時間が早かった。しかしながら、実験では崩壊していない傾斜があるモデルでも F_s が1より小さくなった。より実験結果を再現できるように解析物性値や構成側を変えて今後も解析を進めていく。

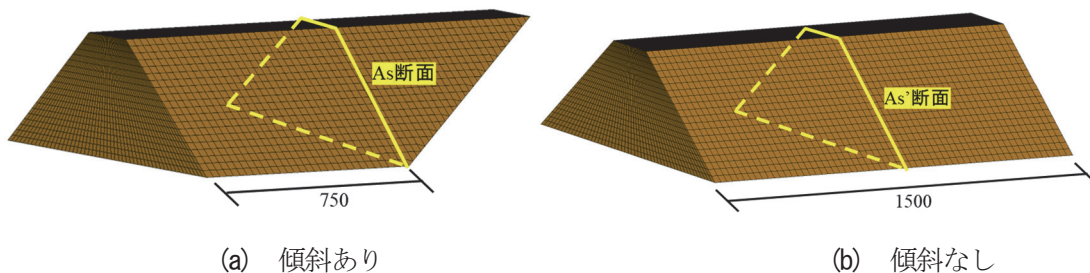


図-10 解析モデルの概要

5. まとめ

本研究では、模型実験と3次元浸透流解析を実施して、基礎地盤の傾斜の有無によって貯水と降雨がため池堤体への浸透挙動および堤体の崩壊に及ぼす影響を検討した。以下に結論を示す。

- 1) 貯水位を240mmまで湛水した場合、傾斜上に位置する堤体内部の浸透水が法尻から堤外へと早く浸出することで、貯水位が240mmの時点では傾斜がある方が傾斜がない堤体よりも堤内浸潤線の水位が低かった。
- 2) 貯水位を上昇させた堤体の崩壊実験では、湛水時と同様に傾斜に沿った浸透水の回り込みが生じた。その結果、堤体法尻が崩壊した。水位を上昇させると崩壊部が拡大した。降雨だけを作用させたケースにおいては、傾斜部にある堤体の表層から浸透した降雨が合流断面に向かうことが確認できた。
- 3) 降雨と貯水位上昇の両方を与えたケースでは、貯水位を一定にした状態でも堤体への降雨浸透により堤内の浸潤線が上昇し、堤体法面が崩壊し、アバット側に拡大した。その後、降雨を継続させながら貯水位を上昇させると、浸潤線がさらに上昇し天端に向かって崩壊が拡大した。したがって、堤体の安定性を評価するには、降雨浸透と水位上昇同時に考慮する必要がある。

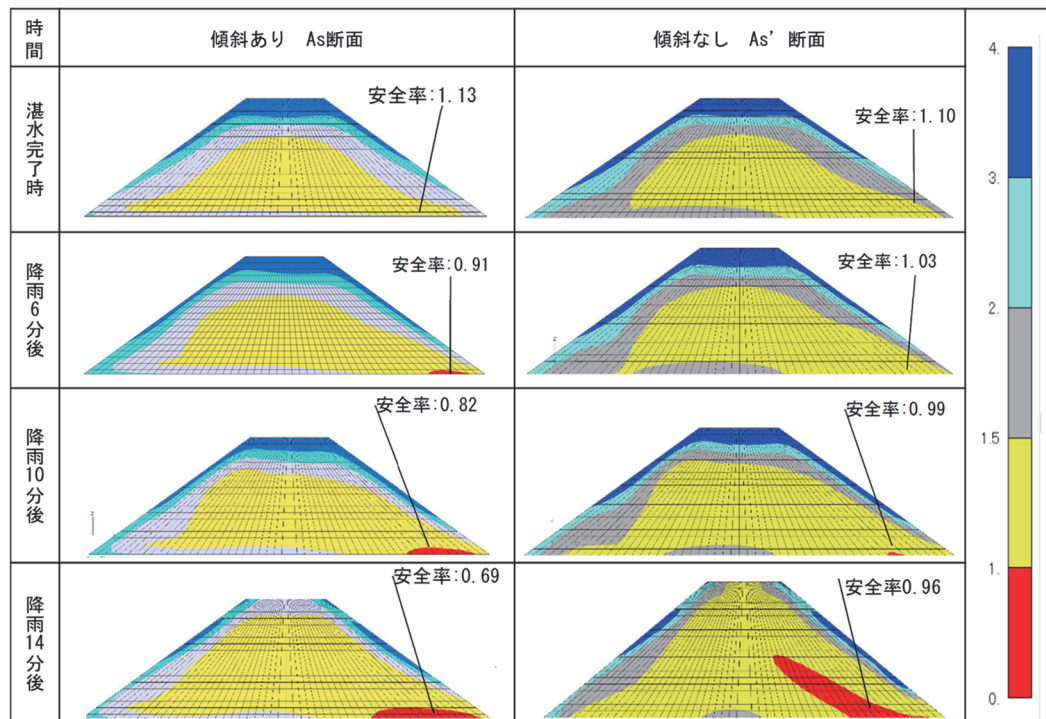


図-11 局所安全率の分布図

- 4) 解析では、傾斜があるモデルの方が、傾斜がないモデルよりも早く局所安全率が1未満になった。初期の崩壊箇所を推定するには、局所的な安定性を検討するのが有効と考える。堤体の安定性を検討する際は、基礎地盤の地形形状を考慮して対象断面を決定することが重要といえる。

今後は、堤長や傾斜角度等をパラメトリックに変えた試験や解析を行い、3次元浸透流の発生傾向や堤体の早期崩壊断面の特定を詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 藤本哲生、栗林健太郎、棚谷南海彦、黒田修一：2019年台風第19号等による豪雨で決壊したため池堤体の特徴と決壊要因の推定．土木学会論文集 B1（水工学），Vol.76，No.1，370-384，2020.
- 2) 農林水産省農村振興局：土地改良事業計画設計指針「ため池整備」,2015.