

屈折率マッチング法を用いた模型実験による浸透場の盛土崩壊時の内部挙動の可視化

屈折率マッチング法 盛土崩壊 模型実験

日本工営（元名城大学大学院） 正会員 ○夏目 将嗣
 名城大学 国際会員 小高 猛司
 名城大学 正会員 岡本 隆明
 日本工営／名城大学 国際会員 李 圭太

1. はじめに

近年の集中豪雨により、斜面崩壊や堤防決壊が頻発している。浸透場における地盤の崩壊は、物体力として作用する間隙流体の浸透力によって引き起こされるとともに、間隙圧上昇による有効応力の低下と間隙内への豊富な流体供給によって地盤材料は軟化し、最終的には固体としての性質を失って流動化する。その崩壊の前後において、間隙流体は非ダルシー流れとなる¹⁾など、浸透場における地盤崩壊のメカニズム解明には課題が多く、地盤と流体双方の挙動も正確に捉える必要がある。地盤崩壊挙動の観察を試みる模型実験の研究は古くから行われてきているが、大多数は土槽側面からの観察であり、壁面摩擦の影響を完全に回避することも、間隙流体挙動の観察も困難である。それらの課題を解決するために、夏目ら²⁾は、屈折率マッチング法を用いた模型実験により、壁面摩擦の影響を受けない地盤内部で発生する地盤の流動化の観察を行った。本報では、同じ手法を用いて、浸透場の盛土崩壊挙動の観察を行った結果を示す。

2. 実験概要

屈折率マッチング法とは、対象物同士の屈折率を整合させることで、本来直接見ることのできない地盤内部を可視光断面の下で観察可能とする手法である。本研究では、夏目ら²⁾と同様に、地盤材料に粒状石英ガラス（以降、石英と記す）、流体にヨウ化ナトリウム溶液（屈折率 1.458、比重 1.67、動粘度 $\nu=1.337\text{cSt}$ ）を使用した。図 1 に模型実験の諸元を示す。すべての領域で粒径 0.75~2.0mm の石英（ $e=0.95$ 、透水係数 $k=3.89\times 10^{-3}\text{m/s}$ ）を用いて模型を作製した。実験手順は、まず、すべての地盤材料を含水比 4%になるように調整した後、所定の間隙比になるよう丁寧に締め固めを行い、模型地盤を作製する。その後、給水槽の水位を一気に上昇させ、浸透に伴う盛土の崩壊挙動の観察を行った。浸透時における地盤内部の挙動を視覚的に明らかにするために、図 2 で示すように油性塗料で着色した石英粒子をトレーサーとして使い、盛土部内に縦横 20mm 間隔、手前の模型壁面から奥行き方向に 20mm の位置に配置した。トレーサーとして設置した着色粒子の視認性を上げるために模型背面に暗幕を設置しており、屈折率の整合した領域（浸透領域）では、背面の暗幕が透けて見えるため黒く映るようになっている。側面から撮影した動画に対し、フリーの画像解析ソフト ImageJ を用いて画像解析を行った。実験ケースは、表 1 で示すように法面勾配を変化させた 3 ケースである。実験結果については、紙面の都合上 Case1 の結果についてのみ記載する。

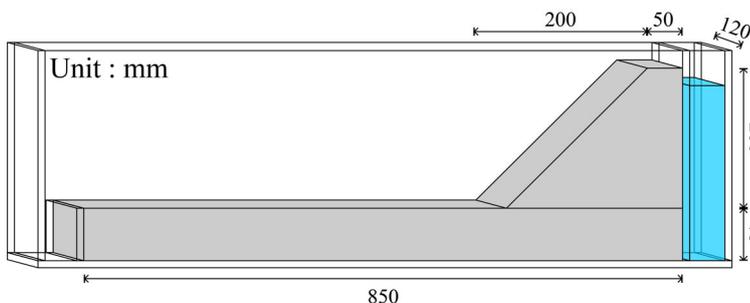


図 1 実験装置

表 1 実験ケース

	模型地盤の条件
Case1	1 割勾配
Case2	1.5 割勾配
Case3	2 割勾配

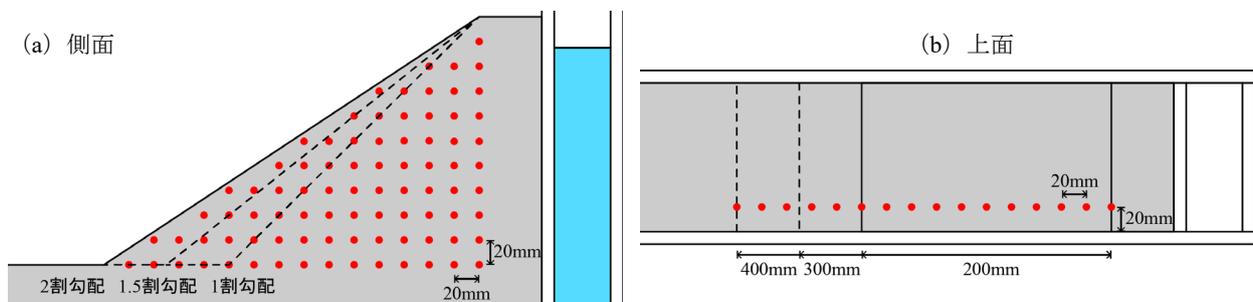
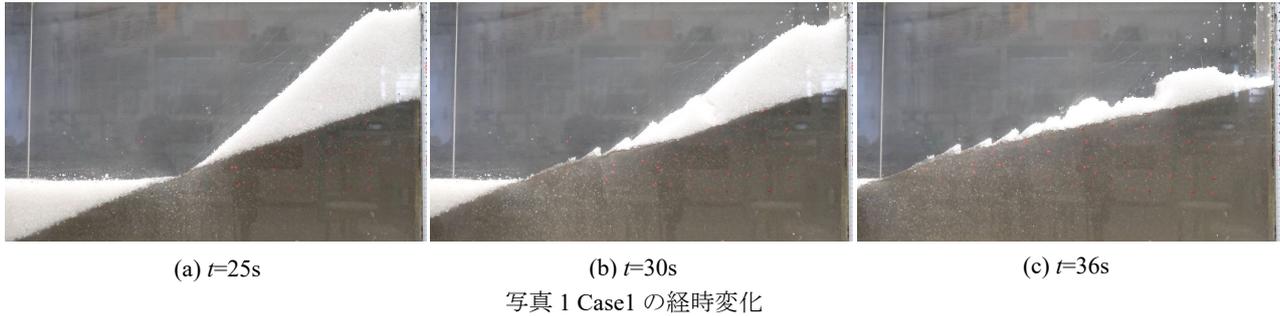


図 2 粒子配置図

3. 実験結果

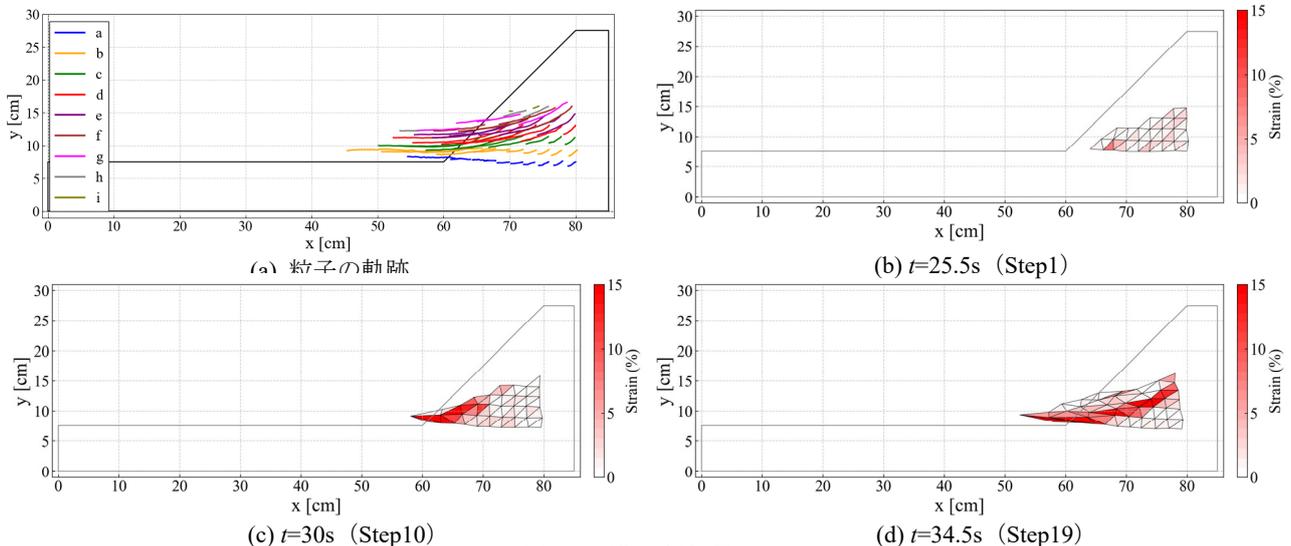
写真 1 に Case1 の実験結果を示す。給水槽の水位を上昇させ始め $t=25s$ で法尻部にまで浸透が進行する。その後、法尻部において小規模すべりが発生し、さらに浸透を続けると盛土部が大きく変形し、最終的に天端が沈下し給水槽の水位が天端を上回ったことで越流し、崩壊へと至った。



4. ImageJ による画像解析

屈折率マッチング法を用いることで盛土部に浸透した領域では、地盤内部が可視化されるため、奥行き 20mm に配置した着色粒子が確認できる。これらの浸透領域において出現した粒子を、ImageJ を用いて 0.5 秒間隔 (全 31Step) で追跡し、各時刻における粒子の位置座標を取得した。追跡時間は、浸潤線が法尻に到達してから盛土部が崩壊に至るまでとし、粒子の位置座標から盛土が崩壊に至るまでの軌跡を算出した。また、近接する粒子から三角形要素を作成し各 Step におけるせん断ひずみを算出した。

図 3 に画像解析から得られた粒子の軌跡と各時刻におけるせん断ひずみのコンターを示す。画像解析から得られた粒子の軌跡より、どの粒子においても円弧状に変位していることがわかる。せん断ひずみコンターの結果より、浸潤線が法尻に到達した直後の $t=25.5s$ (Step1) では、どの三角形要素においてもほとんどひずみが生じていないことがわかる。浸透が進行し小規模すべりが発生した $t=30s$ (Step10) では、法先の要素においてひずみ 15%を超える領域が集中している。その後、盛土部が大きく変形した $t=34.5s$ (Step19) では、法先だけでなく盛土の中腹部まで 15%を超える領域が発生しており、また、円弧上に変形が生じていることがわかる。このように屈折率マッチング法を用いた模型実験では、崩壊時における土粒子の変位や軌跡を明確することや盛土部が浸透により流動化した領域内でも地盤内部の挙動を追跡可能であることを示している。



5. おわりに

本報では、屈折率マッチング法を用いた模型実験により、盛土崩壊時における内部挙動の観察を試み、流動化領域を含む地盤内部の大変形を粗い精度ながらも定量的に計測可能であることを示した。今後、同手法を用いた模型実験により、浸透場における盛土の崩壊挙動をより高精細に計測することによって、浸透場の地盤崩壊メカニズムの検証を行う。さらに、先進的な数値解析技術による現象解明ならびに崩壊予測手法の進展に寄与することを目指す。

【謝辞】本研究の一部は、科学研究費・基盤研究(A)(一般)(課題番号 22H00507, 研究代表者：東北大学・寺田賢二郎教授)の助成を受けて実施した。記して謝意を表します。

参考文献：1) 夏目将嗣, 小高猛司, 岡本隆明, 李圭太：屈折率マッチング法を用いた模型実験によるパイピング現象の解明, 地下水学会誌, Vol.67, No.2, 2025.