

劣化した土構造物の修復技術の開発

東京都市大学 学生会員 ○廣田 京介

東京都市大学大学院 学生会員 秋元 宏仁

東京都市大学 正会員 伊藤 和也, 正会員 末政 直晃

強化土エンジニアリング 正会員 佐々木 隆光

1. はじめに

我が国は国土の約 7 割が山地や丘陵地であるため、高度経済成長期に都市間を繋ぐ目的で切土・盛土やトンネルなどの土構造物が数多く建設された。その中で、のり面安定化対策として行われたモルタル吹付工は、工期が短く施工が簡易的に行えるため、昭和 40 年代から現在に至るまで斜面安定化対策として多用されてきた。近年ではゲリラ豪雨などの異常気象の多発のため、地山の土砂化や斜面に吹付けられたモルタル・コンクリートの老朽化の進行が早く、のり面崩壊などの事故が増加している。したがって、それらの劣化に対して早期の対策が求められている。現在では老朽化に伴い対策箇所が増加しており、効率的かつ効果的な対策法を考えていく必要がある。吹付けのり面の安全性や老朽化に関する問題は、写真-1 のような吹き付けられたモルタルの劣化や、写真-2 のような背面地盤の劣化からモルタルごと崩れる法面崩壊などがある。これらのモルタル吹付工の老朽化の 5 割以上が背面地盤の風化や土砂化によるものである。単にモルタル自体の劣化であれば、すぐに見つけ補修・補強が行えるが、背面地盤の場合では地盤の改良が必要となる。



写真-1 モルタルの劣化による剥離



写真-2 地山土砂化による法面崩壊

本研究では背面地盤の劣化に対する効率的かつ効果的な修復技術の開発を目的としている。本報告は、維持補修の概念について示した後、法面に対する注入工法について、小型模型実験と浸透流解析の結果と考察について述べる。

2. 公共事業におけるアセットマネジメント

本研究は、土木構造物における維持管理の観点からアセットマネジメントの考え方を参考に研究を行っていく。アセットマネジメントの概念とは、我が国における道路、港湾、空港などの公共施設はその多くが高度成長期に整備され、ある程度の整備水準に達している。これらの整備された公共施設を今後末永く有効活用するために、施設の維持管理システムの構築が注目をされている。道路、鉄道、下水道などの公共施設を資産(アセット)とみなし、企業経営的な視点でマネジメントを行う考え方である¹⁾。

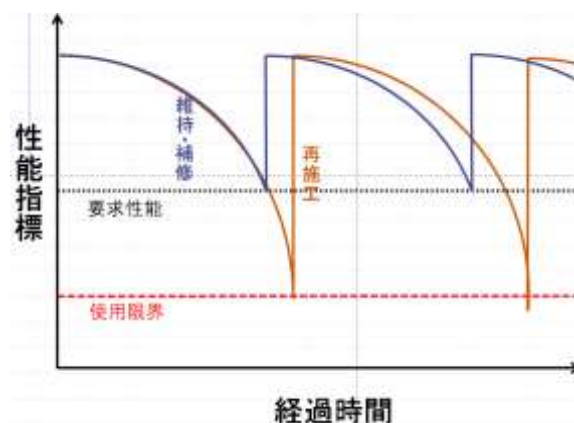


図-1 アセットマネジメント概念図

キーワード モルタル吹付工 背面土砂化 アセットマネジメント グラウト注入 浸透流解析

〒158-8557 東京都世田谷区 玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL : 03-5707-0104 (代) E-mail : g1218075@tcu.ac.jp

アセットマネジメントは、予防保全の観点から構造物の維持・補修の計画を立案することにより、検討における必要要件は以下の4つである。要件1では、構造物の機能・性能の現状の規定、要件2では、構造物の性能低下の将来予測、要件3として構造物の劣化状態の観察、要件4は適切なタイミングでの維持・補修のルール化などが挙げられる。これら要件を満たすことで構造物の寿命を延命し、年間を通して維持補修を均一化することができる。

アセットマネジメントの概念図を図-1に示す。図-1において縦軸は性能指標、横軸は経過時間である。オレンジ線は従来の考え方を表したもので、機能停止または事故が発生してから再構築する考え方である。一方、青線はアセットマネジメントの考え方で、構造物が要求性能を下回る前に、維持・補修を繰り返していく考え方である。この概念を法面劣化において適用し、法面崩壊等が起きる前に効率良く維持補修することを検討していく。

3. 注入材による劣化対策

法面の背面地盤の劣化対策として、地盤改良の観点とライフサイクルコストの2つの要素を考慮した、アセットマネジメントから注入工法に着目した。法面のモルタル吹付工の劣化に対して、再施工した場合とグラウト注入によって対策した工法の工事費と工期を定量的に比較したものを図-2に示す²⁾。この結果より薬液注入工法は再施工する場合に比べて、工事費用で約1,530円/m²、工期で約56日/1000m²の短縮となる。また、構造物の補修費用の均等化という近年の考え方を考慮すると、薬液注入工法のような注入材による補修は、法面の劣化対策として適していると言える。

この注入工法が地盤内部の見えない背面地盤で、どのように浸透していくか観察し、効率よく注入することができる注入位置について検討するために、小型模型を用いた注入材浸透の可視化実験を行った。

4. 小型模型実験

4.1 実験概要

本実験は、アクリル土槽を用いて斜面地盤を模擬し、背面地盤への注入材の浸透挙動を可視化するものである。実験の概略図を図-3に示す。未風化の岩盤を模擬したアクリルの斜面上に表面地盤を模擬したガラス玉を配置し、その上にモルタル吹付を模擬したアクリル板を設置した。注入する材料として、本実験ではゼラチンを使用した。ゼラチンは着色をしてあるため注入されていく様子が目視でわかりやすく、濃度・温度により粘度を調整できる利点を有している³⁾。注入材はモルタル吹付け面を模擬したアクリル板の

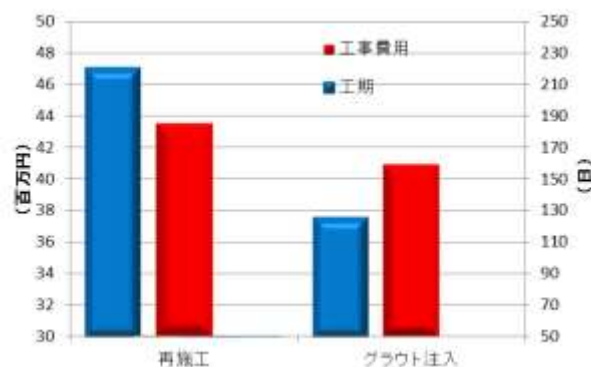


図-2 工事費用・工期の比較²⁾

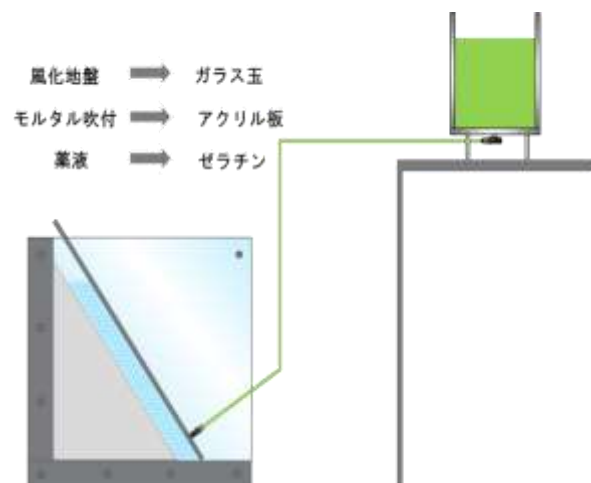


図-3 実験器具概略図

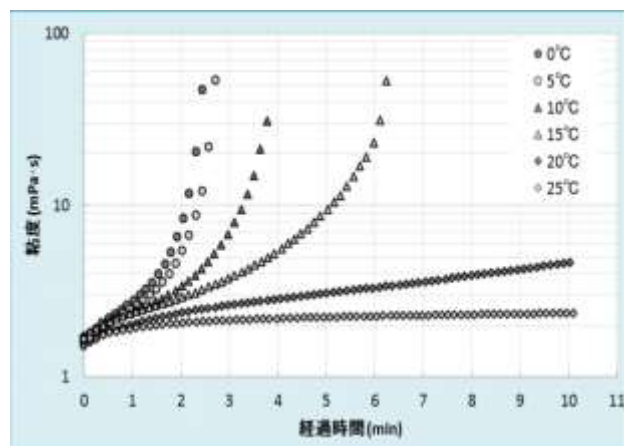


図-4 60°C・2.5%濃度のゼラチン粘度変化

上部または下部からゼラチン水溶液を定水位で注入することで再現した。岩盤に注入されている薬液注入材の初期粘度は約 $2.5\text{Pa} \cdot \text{s}$ であること⁴⁾から、本実験では、ゼラチンの注入時の初期粘度が $2.5\text{Pa} \cdot \text{s}$ となる濃度に調整して使用した(図-4)。

実験ケースを表-1に示す。ガラス玉を 30mm, 11mm, 5mm 以下の不均一の物の3種類とし、モルタル吹付法面の上部または下部の2か所から注入を行う合計6ケースの実験を行った。ここで、均一粒径で大きい粒径である 30mm の方が、充填率が小さくなり空隙が大きくなり風化度が高い背面地盤を再現することになる。一方、5mm 以下の不均一の場合は、最も密な地盤を再現している。

4.2 実験結果と考察

今回は、注入位置によるゼラチンの浸透の違いと、粒径による浸透の違いを観察した。すなわち同じ風化度合(同粒径)における注入材の注入位置(上部・下部)の比較、並びに異なる風化度合(他粒径)の同じ注入位置における映像の比較を行った。下部から注入した3ケースでは目立った違いは見られなかった。

一方、上部から注入した3ケースでは、全ケース共に注入後少し時間が経過してから下部に注入材が到達して溜まっていく様子となった。上部から注入した異なる粒径での注入後10秒後の様子を写真-3(case4)、写真-4(case6)に示す。注入の様子を比較すると空隙が大きいケースほど注入材が早く下部に到達することが確認できた。これは、粒径の大きいケース程空隙が大きいため、注入材が通る道が多くなり、すぐに下部から注入材が溜まっていた。一方、密となる case6 では、ミズミチが少ないため時間差を有する結果となった。この結果より、空隙が大きい劣化した風化地盤は、注入材が流下してしまうと考えられる。今後は複数箇所からの同時注入の実験を行っていく。

5 有限要素法を用いた飽和・不飽和土壌の浸透流解析

本研究では、汎用偏微分方程式ソルバ FlexPDE を使用して不飽和地盤の浸透解析を実施した。FlexPDE は問題に対応する偏微分方程式を処理することによって様々な領域にまたがる数学的基礎を取り扱うことができるソフトである。飽和～不飽和状態の土中を運動する水に対する連続式は、質量保存則より導かれた Richards の方程式を用いると、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\psi) \right) = (c(\psi) + \alpha S_s) \quad (1)$$

ここで、 $\alpha = 0$ (不飽和領域)、 1 (飽和領域)

$c(\psi) = d\theta/d\psi$ は土壌水分限界係数であり、以下の(2)式で示される。

表-1 実験ケース一覧

case	斜面角度	注入位置	ガラス玉直径 (mm)	注入材
case1	60°	下部	30mm	ゼラチン
case2			11mm	
case3			5mm(不均一)	
case4		上部	30mm	
case5			11mm	
case6			5mm(不均一)	

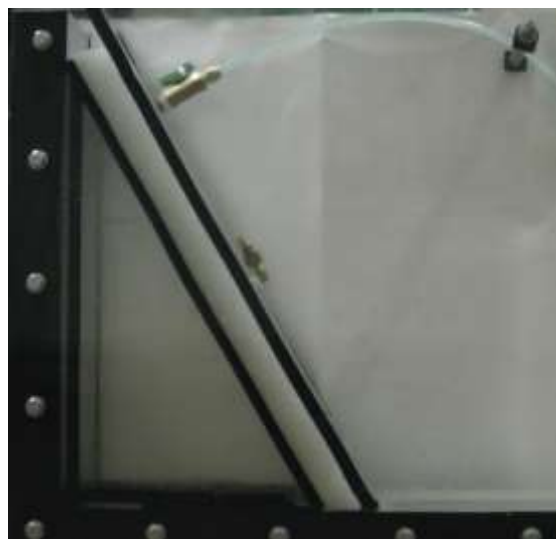


写真-3 ガラス玉 5mm 上部 10 秒経過

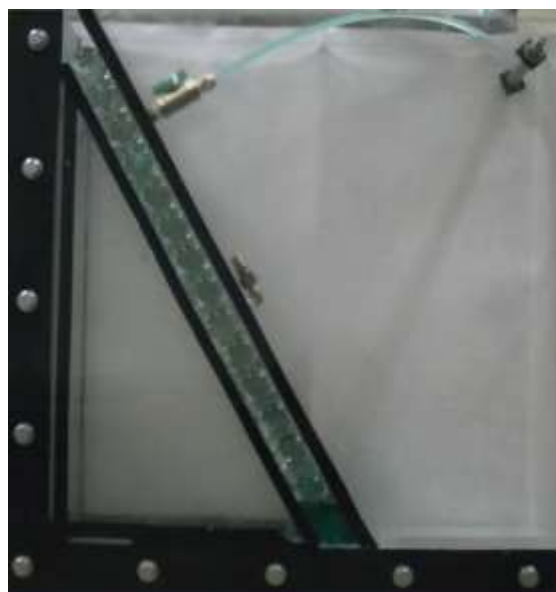


写真-4 ガラス玉 30mm 注入後上部 10 秒経過

$$c(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{-\alpha m(\theta_s - \theta_r)}{1-m} \Theta^{1/m} (1 - \Theta^{1/m})^m \quad (2)$$

ここで $\Theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$

なお、不飽和浸透特性を表現するため、汎用性の高い Van Genuchten による不飽和浸透モデルを用いた⁵⁾。

地盤の種類は、砂質土に設定し、解析は図-5 のように表示され、左上がマトリックスポテンシャル、右上が体積含水率・左下が水容量、右下が水流束密度の計4種類となる。

5. 1 解析結果と考察

今回は地盤を砂質地盤、注入位置を法面上部、注入時の液体の流速は実験時の値と等しくするため 4.2m/s^2 として解析を行った。注入が終わるまでの時間は約 20 秒で、実験を行った 5mm 以下の不均一のガラス玉への注入時間より 30 秒ほど早く注入が終わる結果となった。また、図-6 は水流束密度のグラフであるが、水の流れをベクトルで表している。この水の流れが 10 秒ほど経過したところで一時停滞した。理由としては、注入している注入材の流れと下部から溜まっている注入材がぶつかり流れが乱れたためであると推測される。流れが乱れることで、注入材の浸透に差が出来てしまう可能性がある。したがって、解析時の注入速度を 0.1m/s^2 と極端に遅くすることで、流れが乱れることなくスムーズに上昇していった。また、同条件でシルト砂に設定し解析を行うと、流れが乱れることはなかった。この結果より、地盤状態によって注入材が効率よく浸透するのに最適な注入速度が存在すると思われる。

6. おわりに

背面地盤の劣化による薬液浸透の挙動は未解明であるため、薬液がどのように浸透していくか可視化できる小型模型実験を行った。実験は、注入位置を法面上部・下部の2か所でガラス玉の粒径を変えた全6ケースを行った。その結果から、緩い地盤ほど薬液が下部へと流れていってしまうため、ゲルタイムの早い薬液が適していると考えた。また、リチャーズ式を用いた飽和・不飽和土壌の浸透流解析を行い、土中の水の流れを数値的に解明した。その結果より、風化地盤全体に薬液が浸透するために最適な注入速度が存在すると考えた。

参考文献

- 1) 例えば、大津宏泰：建設分野におけるリスク工学の適用性とその展望，土木学会論文集，No.728，pp.1-16，2003.
- 2) 玉國和広：老朽化吹付モルタル法面の補修・補強対策の検証，平成19年度国土交通省国土技術研究会
<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h19giken/program/kadai/pdf/innovation/inno3-07.pdf>
- 3) 京都電子工業株式会社：技術資料 ゼラチンの硬化過程における粘度変化，2013
- 4) 杉山博一，米山一幸：溶液型グラウト材の浸透挙動に関する室内実験および解析検討，清水建設研究報告，Vo.90，pp. 75-83，2013
- 5) Van Genuchten: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society America, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.

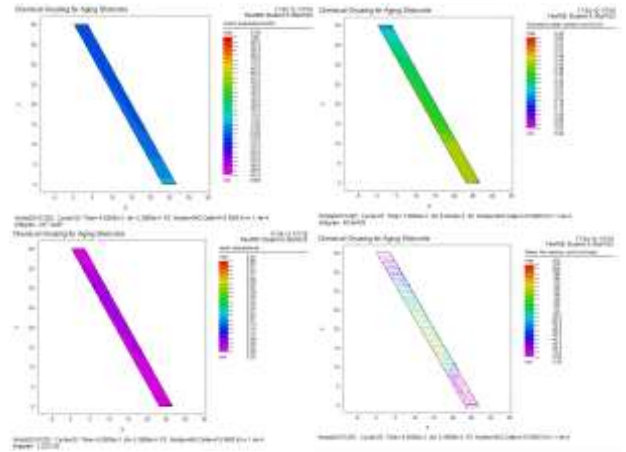


図-5 FlexPDE による浸透流解析

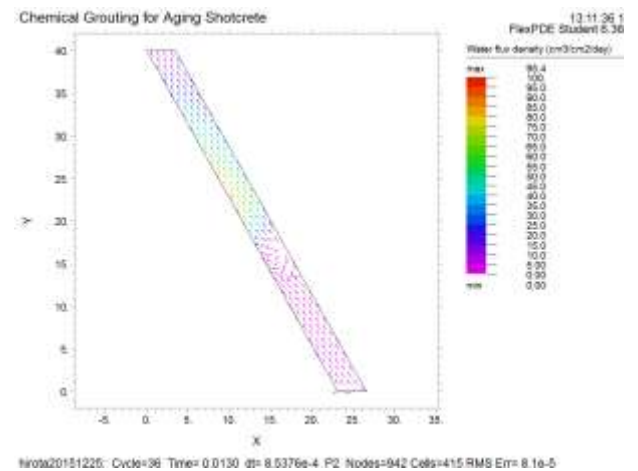


図-6 水流束密度