

第五話 劣化を考慮した斜面の安定性評価（つづき 2）

5.4 安定解析におけるせん断強度低減法

5.3 で述べた斜面防災研究委員会や山本らの解析では、地盤の変形等は FEM 解析で、斜面安全率は極限平衡法解析で求める組み合わせ手法であった。それをつなげる手法の一つがせん断強度低減法で、5.5 で述べる現場観測の解析でも用いられている。せん断強度低減法については、鶴飼 (1990)⁵⁴⁾ や若井・蔡 (2003)⁵⁷⁾ などが詳細に解説しているので不要かもしれないが、ごく簡単に説明しておく。

極限平衡法で一般に安全率（全体安全率） F_s は

$$F_s = \frac{\sum \text{すべり面上の最大せん断抵抗力（あるいは抵抗モーメント）}}{\sum \text{すべり土塊に作用する滑動力（あるいは滑動モーメント）}}$$

として定義される。土がモール・クーロンの破壊基準に従うとすると、すべり面上で発揮されるせん断強度 τ_f は、土の強度定数（ c 、 ϕ ）を用いて

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

と表せる。 σ はすべり面上の垂直応力である。せん断強度低減法では、仮想的なせん断強度 τ_F として次式

$$\tau_F = c/F + \sigma \tan \phi / F$$

を考え、 F を小さな値から段階的に増加させて計算を行い、ある段階で反復計算が発散し斜面が崩壊に至ったと判断されたときの F の値を全体安全率と定義する。崩壊時と判断された斜面のせん断ひずみの分布図を描くとすべり面位置が可視化される。

斜面が崩壊に至ったと判断する方法はいくつかあるが、計算が収束しない（no-convergence）時点を採用する例が多い（たとえば Griffiths, D.V., Lane, P.A. (1999)⁵⁵⁾）。

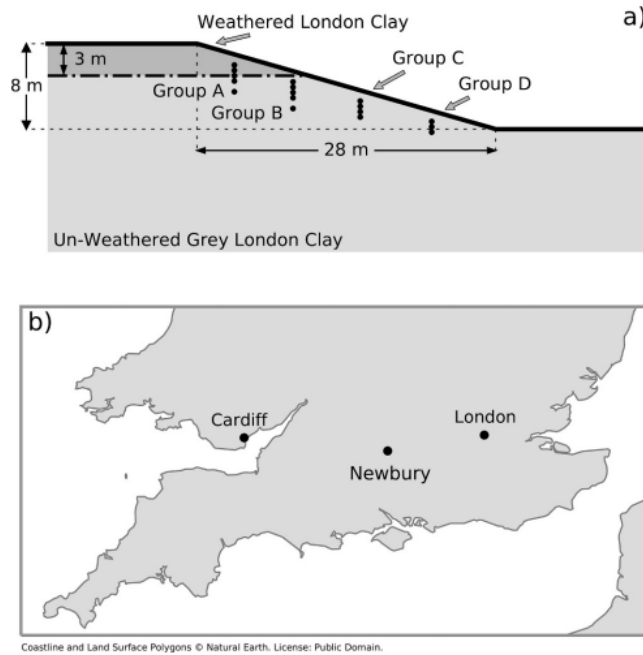
弾塑性 FEM 計算では、土要素が塑性化すると力のつり合い式、土の構成式と破壊基準式を満たすように反復計算が行われる。実務では、反復計算の収束時間を考慮して反復回数の上限を与えることが行われている。

5.5 現場観測結果と将来予測（Postill ら(2021)⁵⁸⁾）

計測が行われた現場は、英国南部の Newbury に位置するロンドン粘土が存在する地域にある高速道路（A34）沿いである。切土斜面は 1997 年に掘削された。計測項目は、土の含水比、間隙水圧、サクション、地表面での水収支などの大気との相互作用（降雨、蒸発散、流出）で、2002 年から一年間継続的に計測されておりその観測データは Smethurst ら(2006)⁵⁹⁾ によって発表されている。このデータは複数の研究者が参照している（Rouainia ら(2020)⁶⁰⁾、Postill ら(2021)⁵⁸⁾）。

図一58 に Newbury の位置と対象斜面を示す。図中には 4 つの観測点位置も示してある。対象斜面は、高さ 8m、長さ 28m の斜面で上部 3m が風化したロンドン粘土、下部が未風化のロンドン粘土で構成され、斜面表面は植生で覆われている。同地点では、以後継続的に現場計測が実施され 2003 年から 2019 年までのデータが蓄積されている。Postill ら(2021)⁵⁸⁾ の論文では、この計測

データを対象に数値モデルとの対比を行うとともに、切土施工後90年にわたる将来予測を行っている。



図一58 現場観測地点と対象斜面. 出典：Postill ら(2021)⁵⁸⁾

解析手法は、5.3.4 で述べたように斜面表面境界での水収支バランスを考慮した飽和—不飽和連成弾塑性問題を FLAC-Two-phase Flow Option を用いた差分解析とほぼ考えてよい。せん断強度は図一23 に示したひずみ軟化モデルに従っている。図一59 が対象斜面 a) と解析モデル c) の対比で、併せて地表面での水収支の関係 b) を模式的に表示してある。

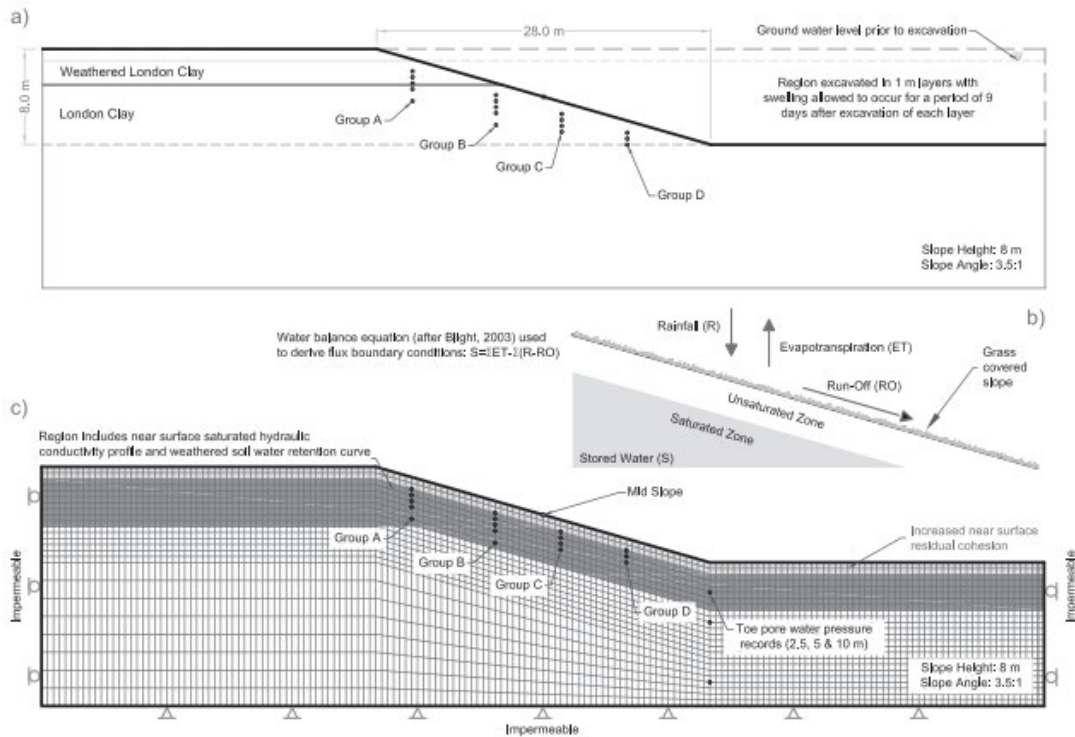


図-59 対象斜面と解析モデル。 出典：Postill ら(2021)⁵⁸⁾

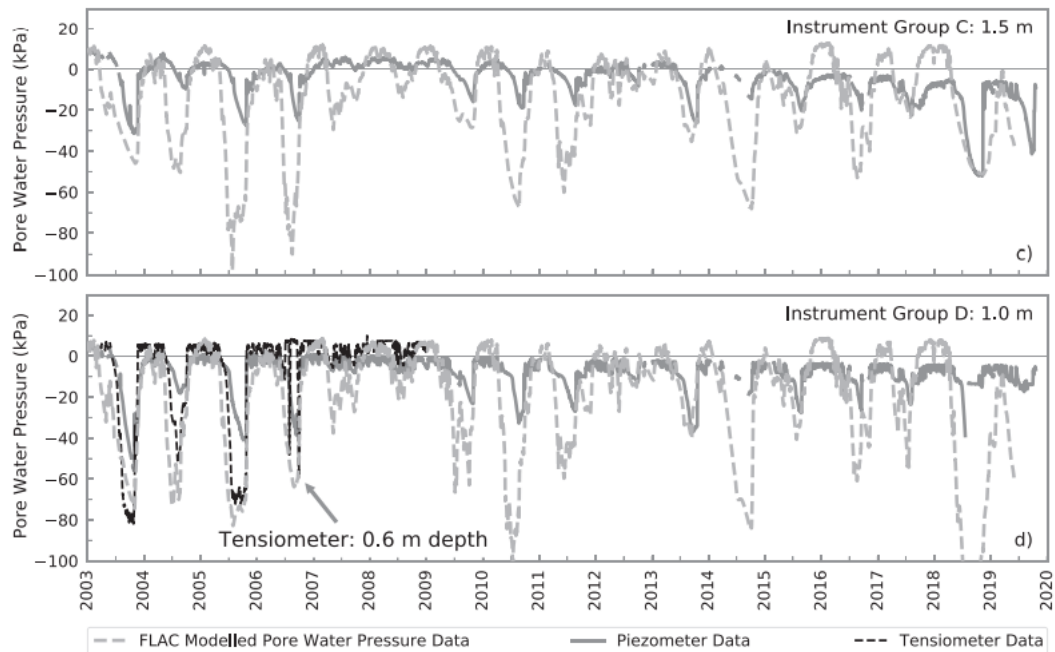


図-60 実測データと解析モデルとの対比。 出典：Postill ら(2021)⁵⁸⁾

図-60 は計測全期間に関する間隙水圧(グループC、グループD)の実測データと解析モデルとの対比の一部である。両者の整合性はおおむね満足するものである。図-61 は将来の気候変動はないものとして切土掘削から90年後までの間隙水圧の将来予測である。

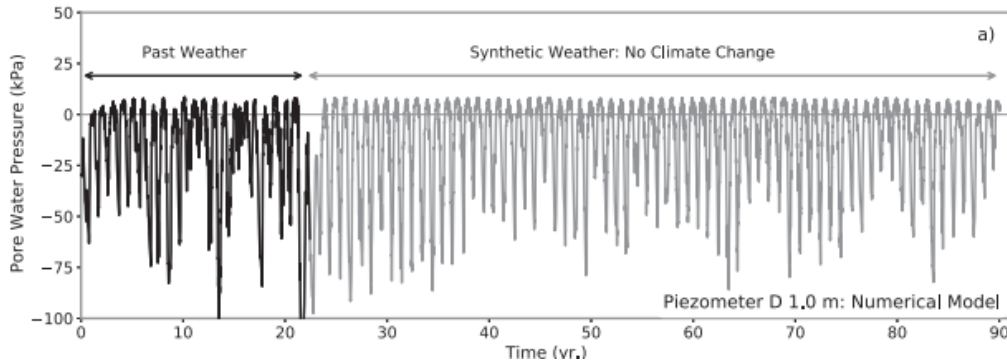


図-61 切土掘削90年後までの間隙水圧挙動の予測 出典：Postill ら(2021)⁵⁸⁾

斜面の劣化を定量的表示するためにせん断強度低減法を導入して各時点での安全率が計算された。ひずみ軟化の効果を見るための、ひずみ軟化がない弾完全塑性モデルでの解析も実施している。今後90年間の安全率の劣化予測を示したのが図-62の上図(e)である。実線がひずみ軟化がない斜面、破線がひずみ軟化がある斜面の安全率を示す。ひずみ軟化の影響は今後20年位で顕在化し、ひずみ軟化をする斜面は90年後には安全率が1.0に低減する結果が得られた。ひずみ軟化なしの計算結果は、間隙水圧の消散のみによる劣化を示していると解釈される。図-62の下図(f)は、斜面劣化全体に及ぼす間隙水圧消散の劣化効果とひずみ軟化による劣化効果の経年変化である。年数の経過によりひずみ軟化による劣化の割合が漸増し経過年数80年以降急増することを示している。

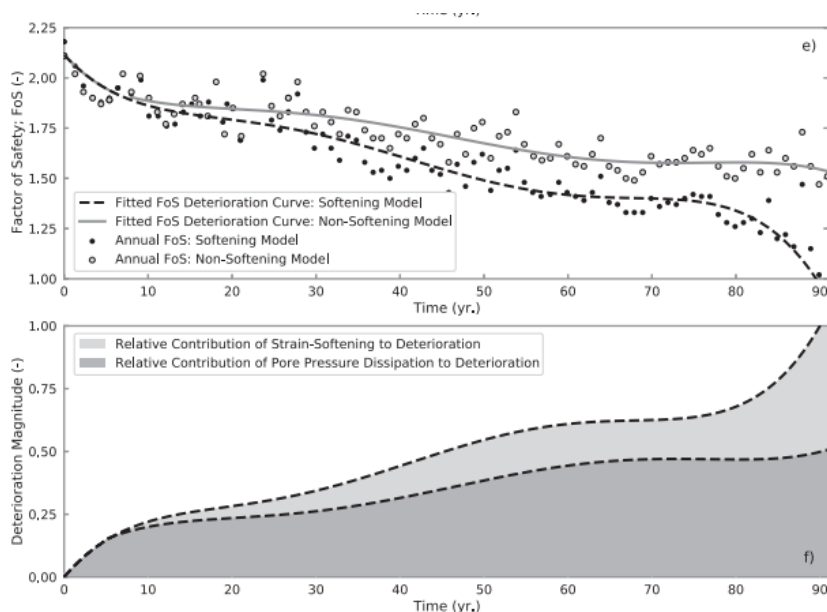
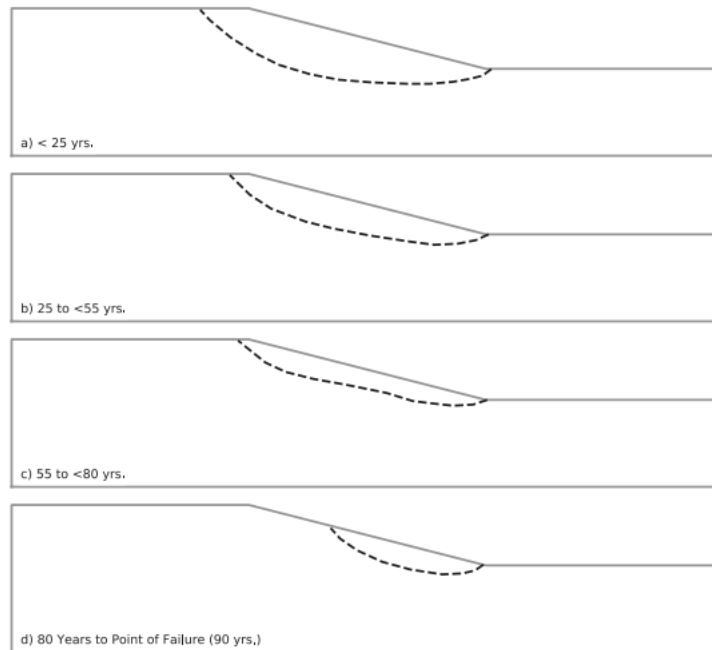


図-62 斜面劣化に及ぼすひずみ軟化の効果。 出典：Postill ら(2021)⁵⁸⁾

図一63 は、経過年数による最小安全率を与えるすべり面の位置と形状を示したものである。経過年数が増加するに従いすべり面位置は浅く小さくなり、法尻近傍に近寄ってくることを示している。



図一63 経過年数による最小安全率を与えるすべり面位置の変化。
出典：Postill ら(2021)⁵⁸⁾

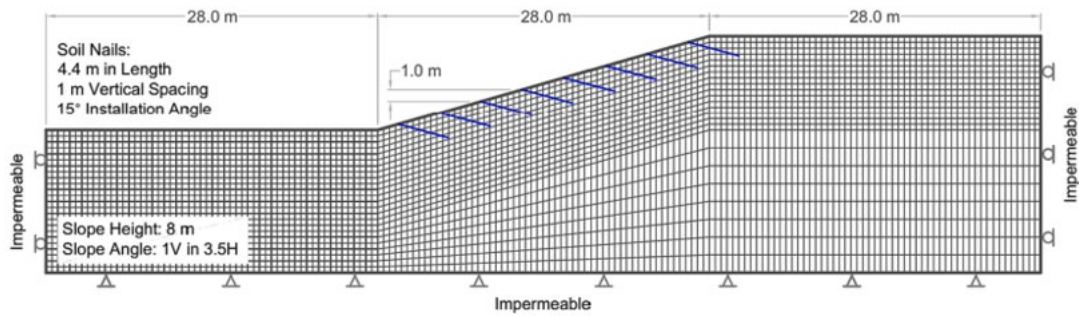
5.6 斜面補強施工による安全率の経年変化 (Armstrong ら (2024)⁶¹⁾)

Armstrong ら (2024)⁶¹⁾は、Newbury の切土斜面を想定し Postill ら(2021)⁵⁸⁾の解析手法を用いて、斜面の経年劣化と soil nailing の効果を検討している。図一64 は解析断面と soil nailing の施工位置を示し、図一65 は斜面の破壊時までの劣化曲線である。縦軸劣化係数 d_f の定義は論文に見いだせなかったが、推測するに次式から求められる数値であろう。

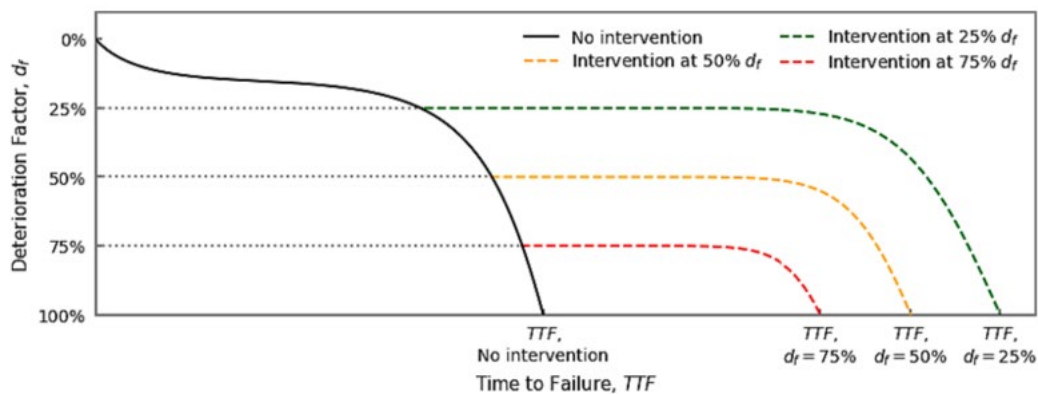
$$d_f = 100 \times (F_{s0} - F_{st}) / (F_{s0} - 1.0)$$

ここで、 F_{s0} は切土直後の安全率、 F_{st} は経過年数 t 後の安全率である。

図では d_f が 25%、50%、75%時に soil nailing の補強を施工した場合の劣化曲線が描かれていて、早期に補強工を施す方が、斜面の延命効果が大きいことがわかる。図一65 と斜面防災研究委員会の解析事例である図一48 と比べてみると興味深い。



図一64 解析断面と soil nailing の施工位置. 出典：Armstrong ら (2024)⁶¹⁾



図一65 補強工の施工時期による斜面の延命効果. 出典：Armstrong ら (2024)⁶¹⁾

Armstrong ら (2024)⁶¹⁾の研究の最大の特徴は、補強施工時期の差によるコスト比較を実施した最適な補強時期が検討されている点であり、斜面のアセットマネジメントの話題として取り上げる研究の一つである。

次回は、面構造と岩盤クリープの話題を取り上げる。

参考文献

- 57) 若井明彦、蔡飛 (2003) : 2. FEM による地すべり解析の基礎理論、講座:地すべり解析における有限要素法の利用(第4回)、Journal of the Japan Landslide Society, Vol.40, No.3.
- 58) Postill, H., Helm, P.R., Dixon, N., Glendinning, S., Smethurst, J.A., Rouainia, M., Briggs, M., El-Hamalawi, A., Blake, A.P. (2021): Forecasting the long-term deterioration of a cut slope in high-plasticity clay using a numerical model, Engineering Geology 280(2021) 105912.
- 59) Smethurst, J., Clarke, D. and Powrie, W. (2006): Seasonal changes in pore water pressure in a grass-covered cut slope in London Clay, Geotechnique 56, No.8, 523-537.
- 60) Rouainia, M., Helm, P., Davies, O., Glendinning (2020): Deterioration of an infrastructure cutting subjected to climate change, Acta Geotechnica, 15, 2997-3016.
- 61) Armstrong, J, Helm, P., Preston, J., and Loveridge F. (2024): Economics of geotechnical asset deterioration, maintenance and renewal, Transport Geotechnics, 45 101185,1-11.



バックナンバー

シリーズ 2

<u>No.18</u>	<u>2026年3月6日</u>
<u>No.17</u>	<u>2026年2月20日</u>
<u>No.16</u>	<u>2026年2月6日</u>
<u>No.15</u>	<u>2026年1月21日</u>
<u>No.14</u>	<u>2026年1月9日</u>
<u>No.13</u>	<u>2025年12月19日</u>
<u>No.12</u>	<u>2025年12月5日</u>
<u>No.11</u>	<u>2025年11月21日</u>

シリーズ 1

<u>No.10</u>	<u>2025年11月7日</u>
<u>No.9</u>	<u>2025年10月24日</u>
<u>No.8</u>	<u>2025年10月10日</u>
<u>No.7</u>	<u>2025年9月26日</u>
<u>No.6</u>	<u>2025年9月12日</u>
<u>No.5</u>	<u>2025年8月22日</u>
<u>No.4</u>	<u>2025年8月 8日</u>
<u>No.3</u>	<u>2025年7月25日</u>
<u>No.2</u>	<u>2025年7月 4日</u>
<u>No.1</u>	<u>2025年6月20日</u>

