

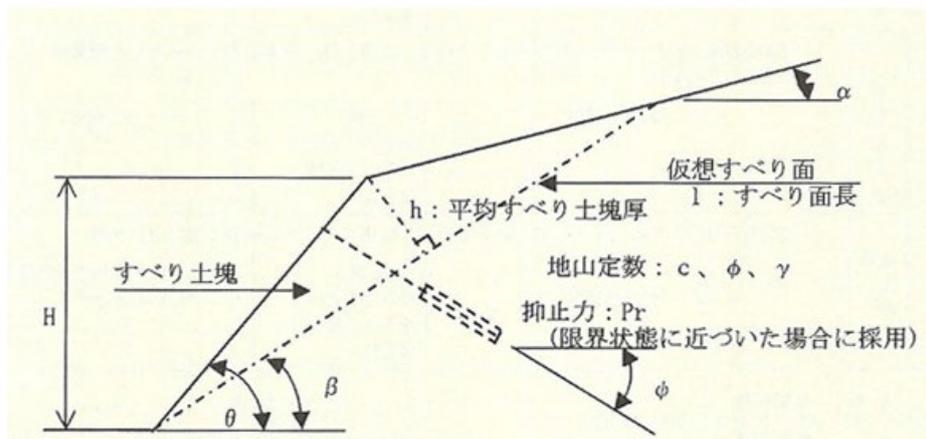
## 第五話 劣化を考慮した斜面の安定性評価（つづき 1）

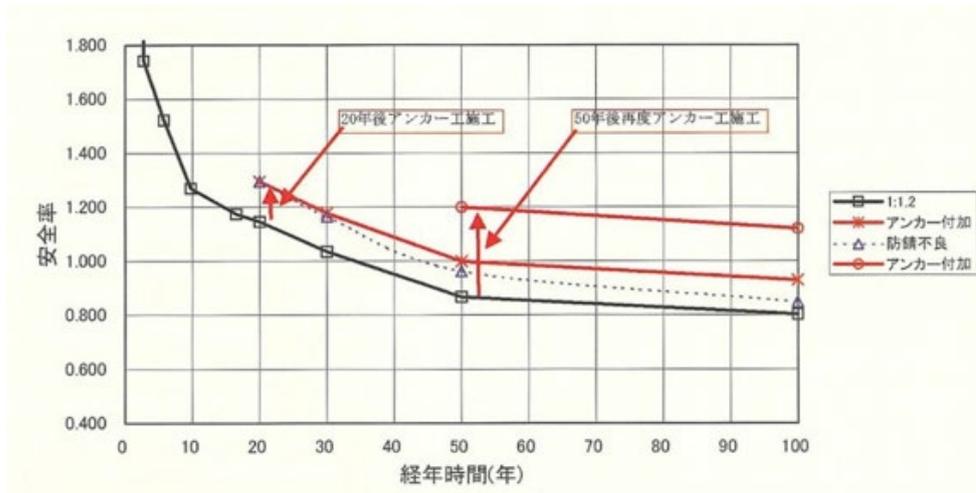
## 5.3 斜面の劣化を考慮した安定解析

斜面の安定性の評価において劣化概念の導入に関する研究事例は多くはない。斜面防災研究委員会は2003年から斜面安定評価における劣化概念について数年間研究活動を行い、2006年、2009年と二度報告書<sup>37),49)</sup>を公表している。2006年度報告書については第三話で風化による物性の変化(強度定数 $c$ 、 $\phi$ )について触れた。ここでは、2006年度報告書で記述されている地山物性の経年劣化とアンカーの経年劣化の2点を考慮した斜面安定問題を極限平衡法(極限つり合い法)で解析した結果と、2009年度報告書で記載されている弾完全塑性モデルのFEM解析と円弧すべり計算による極限平衡法の結果を紹介する。

## 5.3.1 極限つり合い法を用いた斜面安定解析(2006年度報告書)

解析対象とした斜面は図-47に示すようにアンカー工が施工された斜面で、アンカー工の抑止力を考慮しつつ直線すべり線を仮定して極限平衡法を用いた解析をしている。地山地盤の強度定数( $c$ 、 $\phi$ )は、斜面内で一様とし、第三話の図-26と類似の方法で求められた経年劣化の値を用い、単位体積重量 $\gamma$ は経年変化しないものとしている。アンカー工の劣化は、腐食によるより線の面積減少率と経年変化の関係を用いている。そして切土法面の勾配を変化させた計算や、アンカー工の導入時期による斜面の安定性の検討を行っている。

図-47 解析に用いた斜面条件。出典：2006年報告書<sup>37)</sup>



図一48 アンカー工の導入時期と導入による安定性の向上. 出典：2006 年度報告書<sup>37)</sup>

図一48 の計算事例は、アンカー工なしの切土斜面は、切土施工後 20 年程度で不安定化するが、その時点でアンカー工を施工すれば崩壊までの寿命が 30 年ほど伸び、切土施工後 50 年後に再度アンカー工を設置すれば切土斜面は、100 年間は崩壊を防止できることを示唆している。

2006 年度報告書の解析結果は、第三話で述べたように強度定数の推定手法に課題があること、風化層厚の経年変化は考慮されず斜面が一様に強度劣化する仮定となっていることなど課題が多く残されているものの、崩壊時期の予測、最適な補強工法の適用時期の推定など、のり面の維持管理上知りたい情報にまでたどり着いたことは評価したい。

### 5.3.2 弾完全塑性 FEM の解析と円弧すべり解析 (2009 年度報告書<sup>49)</sup>)

2009 年度報告書には、市販の弾完全塑性 FEM プログラムを用いた解析例が記載されている。FEM 解析に用いる物性値の劣化の評価は、以下のような 3 段階を経る。第一段階で、第二話で述べた方法を参照して、弾性波速度( $V_p$ )と風化層厚を設定する。第二段階では、弾性波速度( $V_p$ )からせん断波速度 ( $V_s$ )、せん断波速度 ( $V_s$ ) から  $N$  値、 $N$  値から圧縮強度、弾性波速度 ( $V_p$ ) から変形係数、変形係数から岩盤状態指数 ( $GSI$ ) を求め、第三段階では、弾性波速度 ( $V_p$ ) または  $N$  値から  $\gamma$ 、 $N$  値あるいは  $GSI$  から ( $c$ ,  $\phi$ )、弾性波速度 ( $V_p$ ) からポアソン比を推定する。その推定には、過去のデータの蓄積から得られた相関関係の回帰式を用いている。各回帰式の推定精度については議論が残るにしても、弾性波速度の経時劣化を基礎にした斜面の経年劣化の解析の流れの考え方の一つを提示している。

2006 年報告書との大きな違いは、経過時間  $t$  および深さ  $z$  による物性の劣化の評価式の導入である。先に見た Sunamura (1996)<sup>47)</sup> の理論式 (2)、 $S = S_0 \exp[-A(z-z_c)^2 t]$  を参考に、物性  $\alpha$  の劣化を次式で与えることを提案している。

$$\alpha = a \exp[-(x^n t)] + d \quad (5)$$

ここで  $x=1/(bz+c)$ 、 $a,b,c,d,n$  はパラメーターで、データからのフィッティングにより定める。報告書では、様々な検討結果が示されているが、2009年報告書の解析手法と結果の一部が、「劣化モデルを用いた斜面の性能評価方法」と題した一連の発表<sup>50~53)</sup>である。

本手法は、応力・変位については弾完全塑性 FEM 解析で評価し、斜面の安全率は円弧すべり法を用いた極限平衡法で評価する組み合わせ手法である。斜面は、第三紀泥質岩盤を想定し、切土前および切土後 1000 年経過までの解析を行っている。図-49 に示す解析条件に図示されているように、切土下部に劣化領域を設定し、劣化領域のみの物性が劣化し劣化領域以外は未風化領域と仮定している。本解析で用いた劣化領域の設定方法の合理性、劣化領域以外は未風化領域とする仮定の合理性など検討課題が残されている。

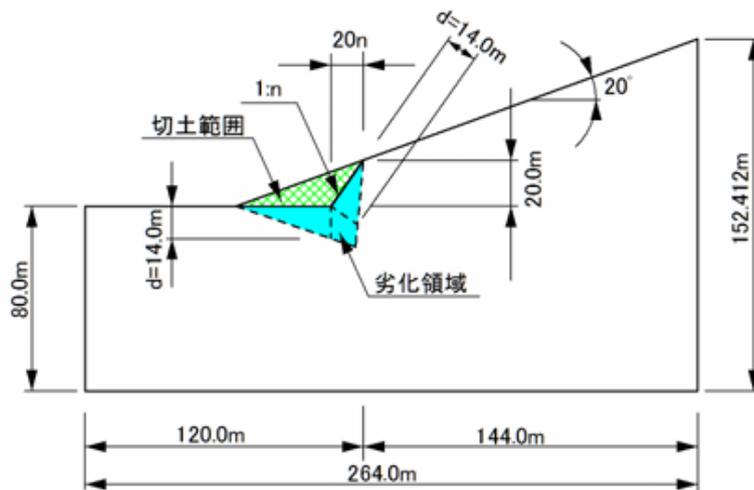


図-49 解析モデルの形状. 出典：丸木ら (2016)<sup>50)</sup>

さまざまな物性劣化のパターンを想定して極限平衡法計算から得られた安全率の経年変化を求めたのが図-50 である。詳細は原論文に譲る。

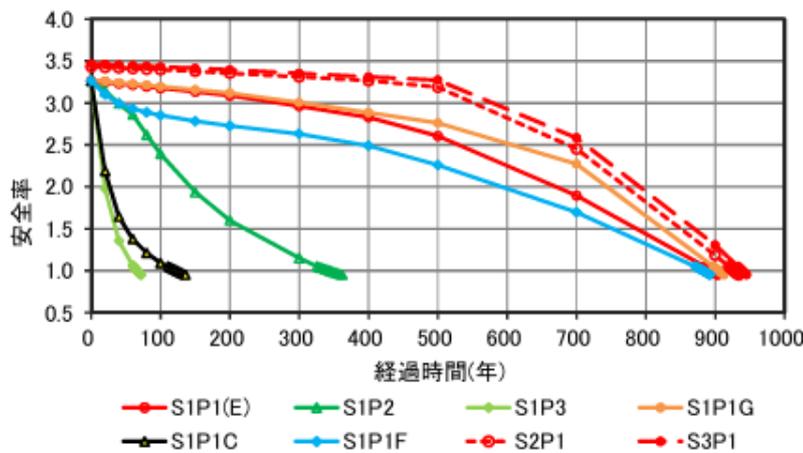


図-50 異なる物性劣化のパターンを想定した安全率の経年変化.

出典：井戸ら (2016)<sup>51)</sup>

### 5.3.3 飽和一不飽和連成弾塑性有限要素法と円弧すべり解析（山本ら<sup>46)</sup>、2009)

斜面防災研究委員会は、市販の FEM プログラムを利用する方針のもと弾完全塑性モデルを採用していた。山本らは、より高度な飽和一不飽和連成弾塑性有限要素法を用いて道路法面の長期的な健全性低下のメカニズムを検討している。事例解析対象は図-51 に示す国道 42 号にある切土法面の断面である。図に示すようにこの法面は流れ盤構造を持ち、後背地盤は集水地形を呈し、沢部には崖錐層の分布がみられる。本事例では、吹付け工が施工されている。図中の数値は、解析に用いた飽和透水係数である。

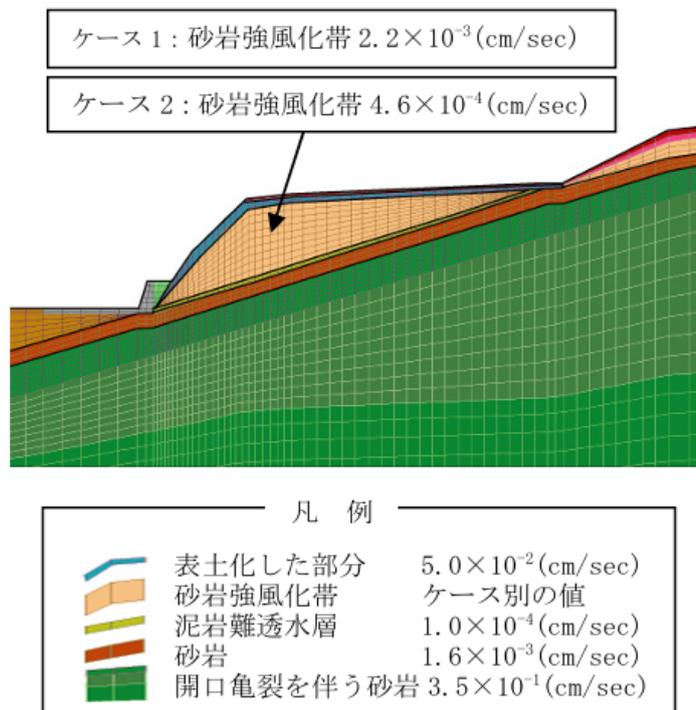


図-51 解析対象の切土法面の断面の FEM メッシュ. 出典：山本ら<sup>46)</sup>

本研究では、斜面防災研究委員会が用いた回帰式を用いて強度定数（ $c$ 、 $\phi$ ）を推定する方式ではなく、現場から採取したサンプリング試料を用いて土質試験を行いその結果を用いている点が異なる。解析では、サンプリング試料を用いた土質試験結果（ $c$ 、 $\phi$ ）の 70% 程度の強度を想定して  $c = 0 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 23.7$  度に低減した値を用いている。降雨による法面内への水の浸透条件は、吹付コンクリートが施工されているため、法面表層からの浸透はないものとし、切土法面上方の緩傾斜地からの浸透を考え、降雨強度は  $30 \text{ mm/hr}$  として、法面内部に塑性域が広く発生するまで継続して入力している。

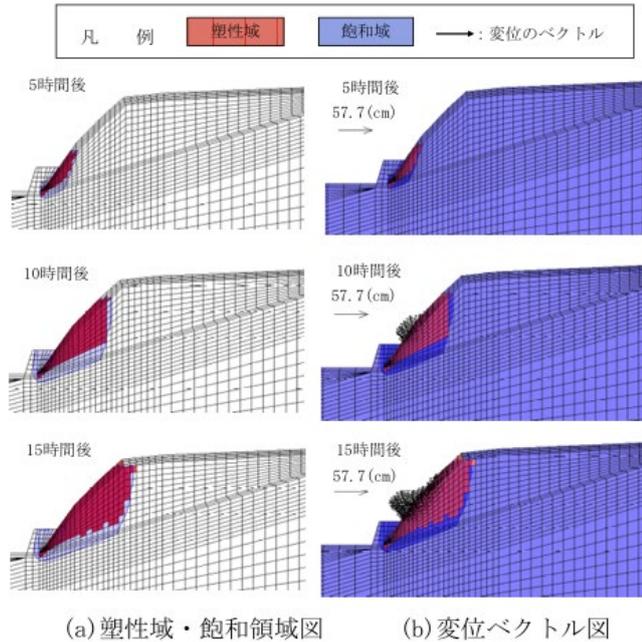


図-52 解析結果

出典：山本ら<sup>46)</sup>

図-52 は図-51 に示す砂岩強風化帯の透水係数を 2 倍にしたケース 2 の結果である。塑性域と飽和領域を示す(a)図からは、切土部の透水係数が低いため地下水がコンクリート吹付面の裏に集まり、法面に沿った部分が飽和化して表層崩壊が発生しやすくなっているのが読み取れる。(b)図の変位ベクトルを見ると、法尻を少し上がった部分に比較的大きな変位が発生し、法面から抜け落ちるような浅い崩壊の発生の可能性を示唆している。

経過年による法面の健全性の劣化を検討するには、強度の低下率が必要であり、本論文では切土法面の P 波速度の長期観測値を利用して強度低下率を求め、FEM 解析で現れた塑性域の強度を低下させて円弧すべり解析を実施して、図-53 に示す安全率の劣化曲線を与えている。

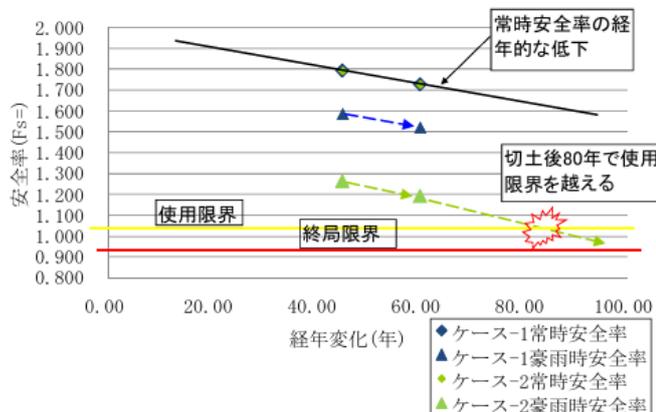


図-53 安全率の経年変化.

出典：山本ら<sup>46)</sup>

以上、斜面防災研究委員会の研究と山本らの物性の劣化を考慮した研究を概観した。FEM 解析を見ると、弾完全塑性モデルを構成式とした市販のプログラムを用いた斜面防災研究委員会の解析に比べて、飽和一不飽和連成弾塑性 FEM で降雨条件を導入した高度な解析手法の山本らの解析に違いはあるものの、本質的には両者のアプローチは共通している。共通点①：物性の経年劣化については高速道路の P 波速度の経年劣化の観測データを参考に行っていること、共通点②：安全率は極限平衡法、応力・変形は FEM 解析の 2 つの異なる組み合わせ手法を用いている点である。FEM 結果と安全率をつなげる手法の一つがせん断強度低減法である<sup>54),55)</sup>。後にその適用例を見る。

### 5.3.4 湿度の季節変動に伴う斜面劣化の差分解析 (Postill et al. 2020<sup>56)</sup>)

第四話で湿度の季節変動に伴う斜面劣化の模型実験を紹介した。その実験結果を説明する解析手法が開発されている (Postill et al. 2020<sup>56)</sup>)。実験では、相対湿度の季節変動を模型斜面に与えたが、数値解析では大気相対湿度の変動の代わりに斜面表面での境界における水収支のバランスを考慮して、飽和一不飽和連成弾塑性問題を FLAC-Two-phase Flow Option を用いて差分解析を行っている。構成モデルとしては第三話、図-23 で触れたひずみ軟化モデルを採用している。

下図は図-35 の再掲で、遠心実験時の相対湿度の変動である。

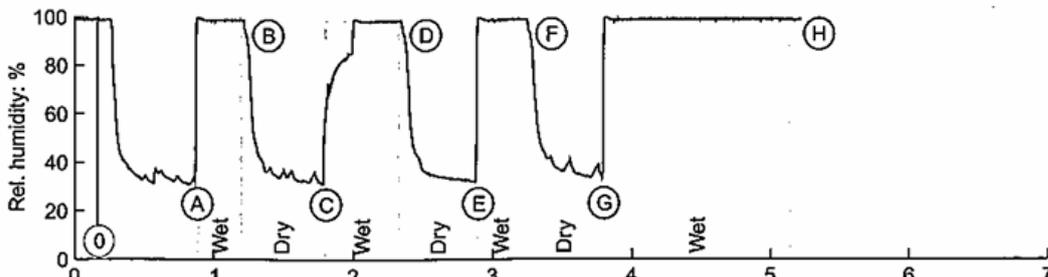


図-54 遠心実験時の相対湿度の変動 (図-35 再掲)

それに対応して図-55 は解析で用いた斜面表面境界での水収支のモデル化である。

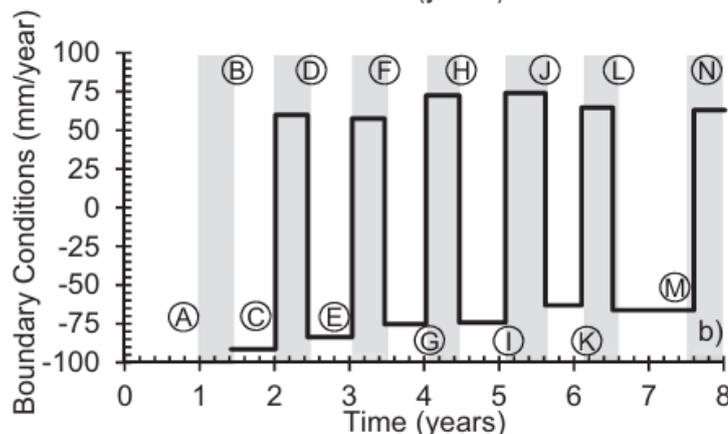


図-55 斜面表面境界での水収支のモデル化. 出典：Postill ら (2020)<sup>56)</sup>

斜面内の間隙水圧挙動についての解析値と実験値との比較が図-56で、実線が実験値、破線が解析値である。図-54のD点（湿潤期）とG点（乾燥期）についてせん断ひずみ分布の実験値と解析値の比較が図-57である。物理実験から得られた定量的諸量との比較結果を見ると、本解析の予測精度はかなりよいと判断される。

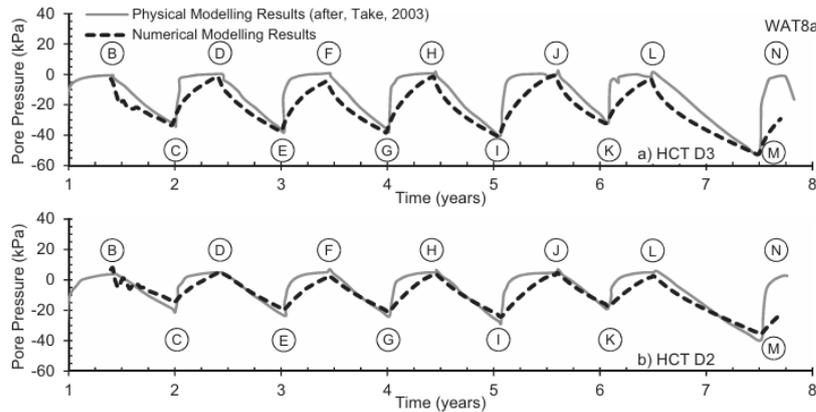


図-56 斜面内の間隙水圧挙動に関する解析値と実験値との比較

出典：Postill ら (2020) <sup>56)</sup>

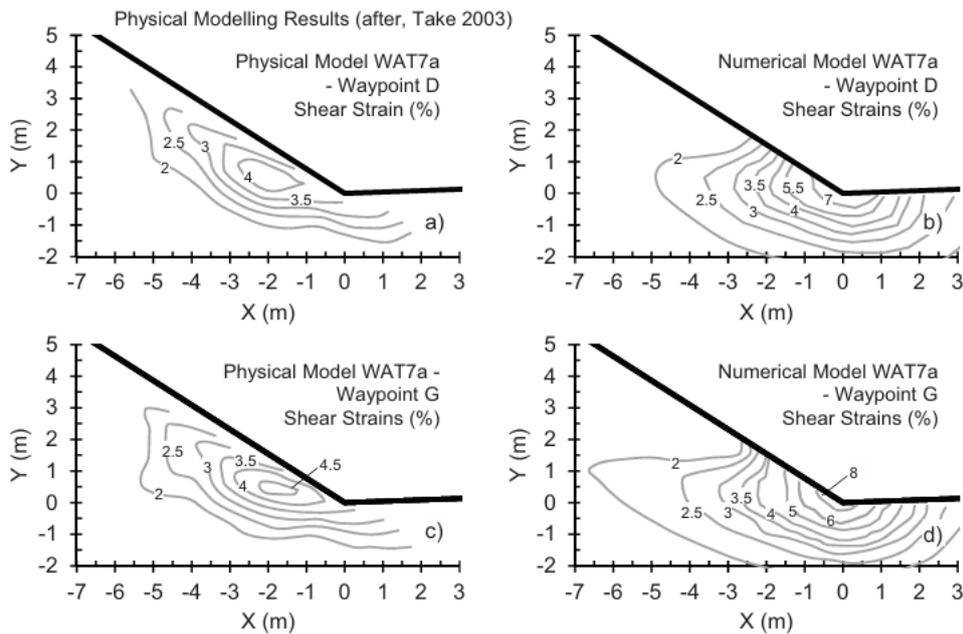


図-57 湿潤期と乾燥期のせん断ひずみ分布に関する実験値と解析値の比較

出典：Postill ら (2020) <sup>56)</sup>

(つづく)



## 参考文献

- 49) 斜面防災研究委員会 (2009) : 斜面安定性評価における劣化概念の導入 (その2)、建設コンサルタツツ協会近畿支部。
- 50) 丸木義文、田村泰志、大前雄史、井戸秀明 (2016) : 劣化を考慮した斜面の性能評価方法 (その1)、地山物性値の劣化モデル、全地連「技術フォーラム 2016」講演集、111
- 51) 井戸秀明、田村泰志、大前雄史、山崎博 (2016) : 劣化を考慮した斜面の性能評価方法 (その2)、斜面の安定と応力変形解析結果、全地連「技術フォーラム 2016」講演集、112
- 52) 山崎博、田村泰志、大前雄史、新町剛志 (2016) : 劣化を考慮した斜面の性能評価方法 (その3)、解析結果の考察 I、全地連「技術フォーラム 2016」講演集、113
- 53) 酒井信介、丸木義文、大前雄史、田村泰志 (2016) : 劣化を考慮した斜面の性能評価方法 (その5)、斜面の性能評価に向けた提案、全地連「技術フォーラム 2016」講演集、115
- 54) 鶴飼 恵三 (1990) : 安定解析におけるせん断強度低減法の有用性、土と基礎、38-1、67-72.
- 55) Griffiths, D.V., Lane, P.A. (1999): Slope stability analysis by finite element. Géotechnique、49、No.1、387-403.
- 56) Postill, H., Dixon, N., El-Hamalawa, A. and Take, W.A. (2020): Modelling seasonal ratcheting and progressive failure in clay slopes: a validation, Canadian Geotechnical Journal, 57, 1265-1279.





## バックナンバー

### シリーズ 2

- No.16 2026年2月6日
- No.15 2026年1月21日
- No.14 2026年1月9日
- No.13 2025年12月19日
- No.12 2025年12月5日
- No.11 2025年11月21日

### シリーズ 1

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

