

初期および後続の風化帯走時の変化と層理特性を反映した切土のり面の安定度評価モデルの提案

九州大学大学院 学〇 荘 恵民

九州大学大学院 F 安福 規之 正 笠間 清伸

九州大学大学院 正 石藏 良平 正 アデル アロウェイシー

1. はじめに

切土のり面の多くには表面の侵食や風化防止を目的として表面保護された切土のり面工が施工されている。しかし、施工後数十年が経過したのり面工を調べると、風化によって背面の地山が脆弱化し、変状や崩壊をきたす場合が観測されている。このため、経年変化の特性をのり面の安定度に導入し、風化程度に応じた実務に展開可能なのり面の健全度評価法の必要性が指摘されている。

本研究では経年変化と構造的な要素を切土のり面の安定度指標に導入し、切土のり面の将来の風化帯走時 t を予測したのち、のり面安定度 F の算定式に基づいて健全性が損なわれる時期を確率分布として推定する予測モデルを提案し、その有用性について考察する。

2. 切土のり面の健全度評価法の考え方とその特色

経年変化による切土のり面安定性の低下の主な理由は、のり面の風化である。切土のり面の表層から弾性波探査・速度検層を行うことで、図1のように表層から数十 cm から数 m のオーダーで弾性波速度 (P 波) が低速度となる層が現れる。本研究では、これを風化帯と定義し、参考文献1)では、切土のり面の風化帯の厚さ $d(m)$ と P 波伝播速度 $v(m/s)$ から式(1)より風化帯走時 t を求め、風化の程度を表す指標とした。

$$t = \frac{d}{v} \quad (1)$$

すなわち、 t が大きいほど風化の程度が相対的に進行していることを表現するものである。なお、この指標は時間の次元を有することに留意が必要であり、 t を表現する際に $(10^{-3}s)$ の単位が用いられている。次に、切土のり面の傾斜角を θ 、層理面の傾斜角 (図2) を γ とし、参考文献2)では、層理と風化特性を反映した切土のり面の安定度 F を式(2)で表し、これをのり面の安定度を表す指標として定義した。

$$F = \frac{1}{t \sin \theta (1 + \sin \gamma)} \quad (2)$$

本報では式(2)に基づき、経年変化による切土のり面の健全性を

評価する。式(2)に θ と γ は定数であり、風化帯走時 t だけ時間の変化と共に変化する。風化帯走時 t の経時的変化を予測することにより、切土のり面の安定度が評価でき、健全性が損なわれる時期を予測することが期待されている。

旧日本道路公団では、東名高速道路の松田 IC~多治見 IC間の切土のり面を対象として、各のり面で弾性波探査を約20年間で4回測定した。本報ではこれらの計測データを基に式(2)で安定度を計算した。図3は、対象としたのり面の安定度 F 、経過月数と崩壊状況の関係図である。ここで、のり面の健全性を示す安定領域と不安定領域の閾値を限界安定度にし、限界安定度より小さい場合健全性が損なわれると考える。図3から、閾値を表現する関数形として、経過月数 $x < 117$ のとき、限界安定度 $F_c = 0.006x$ 、経過月数 $x > 117$ のとき、限界安定度が $F_c = 0.65$ とモデル化可能である。従って、ある切土のり面に対し、健全性が損なわれる確率は式(3)で計算できる。

$$P\{F - F_c \leq 0\} = P\left\{\frac{1}{\{t\} \sin \theta (1 + \sin \gamma)} - F_c \leq 0\right\} = P\left\{\{t\} \geq \frac{1}{F_c \sin \theta (1 + \sin \gamma)}\right\} \quad (3)$$

式(3)の確率を計算するため、本研究では拡張型数量化I類という統計学的手法を用いた。拡張型数量化I類は、大量のデータを収集し、目的変数と説明変数との関係を調べ、説明変数の情報から目的変数を予測するという手法

キーワード 切土のり面, 風化防止, 風化帯走時, 拡張型数量化I類, 要対策優先順位

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館1108-2号室 TEL 092-802-3378

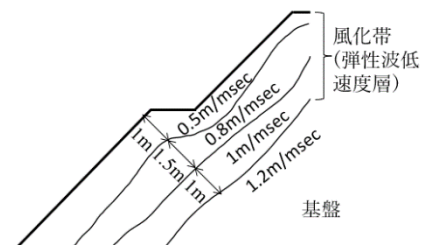


図1 風化帯の査定方法

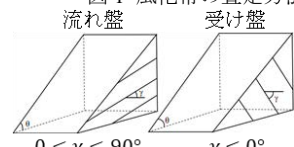


図2 傾斜角 主典：参考文献2)

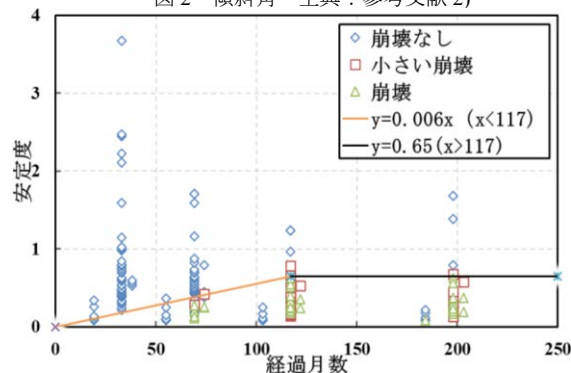
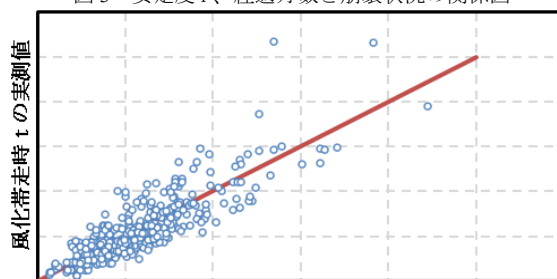
図3 安定度 F 、経過月数と崩壊状況の関係図

図4 予測値と実測値の散布図

である。各説明変数のデータに係数をかけ、合算すると、目的変数として予測値を計算できる。重回帰分析と比べ、拡張型数量化 I 類の利点は質的データと量的データ両方を適用できるところにある。従って、岩種や地山年代のような質的な説明変数があるとき、拡張型数量化 I 類の利用は有効である。本報は、368 例の切土のり面風化帯走時 t のデータに基づき、拡張型数量化 I 類で予測分析を行った。抽出した説明変数、算出した係数と予測結果は表 1 と図 4 に示す。表中の係数は各説明変数の目的変数に対する貢献度を表し、正数であれば説明変数は風化帯走時を増加させる（不安定になる）傾向を与える。数量化理論により、図 4 に示した予測値と実測値のばらつきは、平均 0、分散 σ^2 の正規分布に従う。回帰分析の考え方に基づけば、

$$\text{統計量 } z = \frac{\{t\} - \{\hat{t}\}}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(\{\hat{t}\} - \{\bar{t}\})^2}{S_{tt}}\right) V_\varepsilon}}$$

は自由度 $n-2$ の t 分布に従う。

ここに、 $\{t\}$ ：風化帯走時 t の期待値、 $\{\hat{t}\}$ ：風化帯走時 t の予測値、 $\{\bar{t}\}$ ：予測値の平均、 n ：サンプル数、 $S_{tt} = \sum_{i=1}^n (\{t\}_i - \{\bar{t}\})^2$ 、 V_ε ：残差変動の不偏分散、

$$V_\varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{(\{t\}_i - \{\hat{t}\}_i)^2}{n-2}$$

統計量 z を式 (3) に代入すると、ある時期に健全性が損なわれる確率が計算可能になる。図 5 は、提案した予測モデルに基づき、のり面将来の崩壊確率を予測する一例である。図中にのり面の将来の崩壊確率密度、崩壊確率と経過年数の関係を示した。図 6 は、37 例の切土のり面の崩壊確率と崩壊状況の関係を示し、崩壊確率 65% の時、崩壊しやすくなり、対策を取る目安と読み取れる。

3. 要対策切土のり面の優先順位の評価への展開

崩壊が懸念される膨大な数の危険区域に対し、全て対策を行うことは予算的に不可能である、そこで、要対策切土のり面の優先順位を決定することも必要となる。今後は高速道路の交通量、のり面崩壊による迂回損失、道路の長さ、混雑度、崩壊確率などでのり面の重要度の評価を実施する予定である。具体的には、道路交通量などのデータを収集し、Arcgis の近接ツール、プログラムの作成等で切土のり面の重要度を評価し、要対策切土のり面の優先順位のハザードマップを作成することを想定している。

4. まとめ

安定度の算定式 (2) に基づき、東名高速道路の切土のり面の風化帯走時 t に関するデータを分析し、将来の風化帯走時 t を予測することで、健全性が損なわれる時期を推測するモデルを提案した。これにより、切土のり面の要対策時期および要対策の優先順位評価に展開できる可能性を示した。

5. 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(A), 課題番号:20H00266)の支援を受けて実施されたものである。最後に宇多涼太郎氏(現広島市役所)はじめ NEXCO グループの関係者の皆さまには、本研究を進めるうえで多大な情報提供をいただいた。ここに心より感謝を申し上げる。

参考文献：

- 1) 多賀直大, 田山聡, 奥園誠志, 八木沢隆哉：長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性, 土と基礎 39-6(401), pp.41-47, 1991.3
- 2) 宇多涼太郎, 安福規之, 石蔵良平：地層構造と風化特性を反映させた切土のり面の安定度評価について, 令和 2 年度土木学会西部支部研究発表会, 2021.03
- 3) 高速道路総合技術研究所：平成 28 年度のり面の健全度評価に関する技術資料作成報告書, 平成 30 年 3 月
- 4) 唐沢好男：回帰分析と信頼区間 ～ばらつきの大きい少数データから誤った推論をしないための～, Technical Report YK-019, Jan. 8, 2019

表 1 抽出した説明変数、算出した係数と予測結果

アイテム	カテゴリー	係数	
保護工	開放型	-0.058	
	密閉型	-0.193	
	植生工	0.031	
岩種	崩土、湖水堆積物など	-0.311	
	変成岩	-0.467	
	火成岩	0.174	
	火山砕屑岩	-0.140	
	深成岩	0.794	
地山地質年代	砕屑岩	-0.364	
	新生代第四紀	-0.123	
	新生代古第三紀	0.694	
	新生代新第三紀	0.430	
	中生代	-0.030	
アイテム	係数	拡張型数量化 I 類	
初期風化帯走時	1.059	単相関係数	0.854
経過月数	0.003	決定係数	0.730
のり勾配	-0.069	サンプル数	368

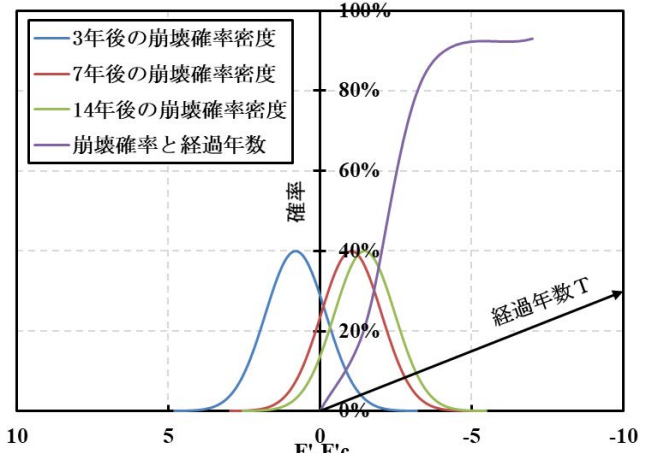


図 5 崩壊確率密度、崩壊確率と経過年数の関係図

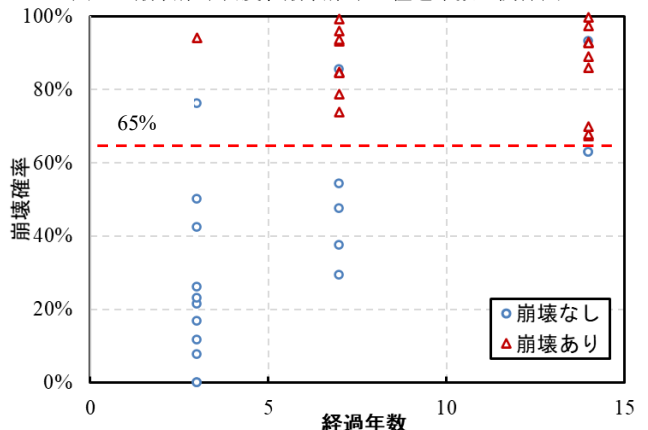


図 6 崩壊確率と崩壊状況の関係図