

災害免疫力の算定に繋がる切土のり面の実用的な安定度評価モデルの提案

安福, 規之
九州大学大学院 : 教授

荘, 惠民
九州大学工学府 : 博士前期課程学生

笠間, 清伸
九州大学大学院 : 教授

石藏, 良平
九州大学大学院 : 准教授

<https://hdl.handle.net/2324/6790851>

出版情報 : 地盤工学シンポジウム論文集, 2022-12. Japanese Geotechnical Society
バージョン :
権利関係 :



災害免疫力の算定に繋がる切土のり面の実用的な安定度評価モデルの提案

Proposal for a practical stability assessment model for cut slopes leading to the evaluation of disaster immunity

安福規之*, 荘恵民**, 笠間清伸*, 石藏良平***

Noriyuki YASUFUKU, Keimin SO, Kiyonobu KASAMA and Ryohei ISHIKURA

筆者らのグループでは、火山灰質土や風化残積土地盤を有する気候変動災害脆弱地域を対象として、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する特殊土地盤の特性を反映するための新しい概念「災害に対する免疫性（災害免疫力）」を基軸とし、災害免疫力の違いを地域ごとに工学的に評価するための試みを行っている。

本報では、このような観点から、NEXCO で提示されている安定度の評価指標に切土内部の層理の幾何学的特性を反映させ、統計的なアプローチを導入することで、のり面の安定度を経時的に変化する確率分布として表現し、効率的な維持管理に活かせる枠組みについて検討している。

キーワード：災害免疫力、切土のり面、風化、安定度確率、経年劣化

Disaster immunity, cut slopes, weathering, stability probability, deterioration over time

1. はじめに

我が国においては、広域的に火山灰質土や風化残積土など共通の特殊土地盤を多く有している。更に、九州や北海道地域では、近年、熊本地震（'16）、九州北部豪雨（'17）、北海道豪雨（'16）、北海道胆振東部地震（'18）、令和2年7月九州豪雨災害（'20）等によって未曾有の激甚複合地盤災害を経験した¹⁻⁵⁾。また、2019年に国が公表した気候変動に伴う降雨の将来予測では、降雨量変化倍率の最も大きく変動する地域が北海道と九州西部であり、22世紀までに最善のシナリオで1.15倍、最悪の場合は1.5倍になると分析された⁶⁾。その結果として、新たな境界条件の下で、潜在的な地盤災害脆弱性リスクを客観化し、たとえ被災しても早期に復旧・復興に繋がる地域性を十分に考慮した命を守る適応戦略が求められることとなった。

筆者らは、火山灰質土や風化残積土地盤を有する主として北海道と九州を想定した気候変動災害脆弱地域を対象として、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する特殊土地盤の特性を反映するための新しい概念「災害に対する免疫性（災害免疫力）」を基軸とし、災害免疫力の違いを地域ごとに工学的に評価するための試みを北海道と九州の研究仲間と協働で行っている⁷⁾。

本報では、切土のり面を対象として、NEXCO で提示されている安定度の評価指標⁸⁾に切土のり面内部の層理の幾何学的特性を反映させた指標を提示し、その特色をまとめる。加えて、統計的なアプローチを導入することで、経年的に変化する切土のり面の安定度を破壊確率分

布の変化として表現し、効率的な維持管理に活かせる道筋について考察する。

2. 災害免疫力の概念とのり面を想定した工学的表現

対象地盤として、自然斜面や人工斜面の道路・鉄道切土のり面、道路・鉄道盛土や河川堤防（堤体土）を想定した場合、降雨や地震力などの災害外力に対して、それぞれの対象は、経年的に変化する固有の免疫性（ここでは、「災害免疫力」と称する）を有していると考えられる。

筆者らは、個々の地盤災害に対する脆弱性の違いを災害免疫力の違いとして捉え、この災害免疫力を、力学的要素と社会的要素の組み合わせによって工学的に評価することを試みている。その概念が図-1に示すものである。図-1からわかるように、災害免疫力は、力学的要素の「災害抵抗力」と社会的要素の「災害回復力」の積として与えられると考えている。災害抵抗力に関する指標は、地盤災害に対する力学的な抵抗性をマクロな視点から表現するものである。例えば、それは、気候変動による降雨形態の変化、過去の降雨履歴の違いなどの影響を受け、また、経年的にも変化するものとして説明される。一方、社会的要素である災害回復力に関する指標は、地盤災害に伴う被災面積、被災人口などの社会的、経済的影響を考慮した被災からの回復力を相対的に表すものである。この考え方を工学的に表現した基本式が、次式であり^{7,10)}、図-2は、筆者らの考える工学的評価のイメージをまとめたものである。

$$I(t) = S(t) \times R(t) \quad (1)$$

* 九州大学大学院 教授

** 九州大学工学府 博士前期課程学生

*** 九州大学大学院 准教授

Prof., Kyushu University

Master course student, Kyushu University

Associate Prof., Kyushu University

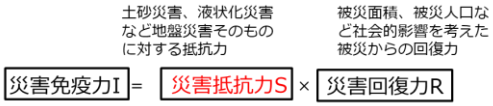


図-1 災害免疫力の概念

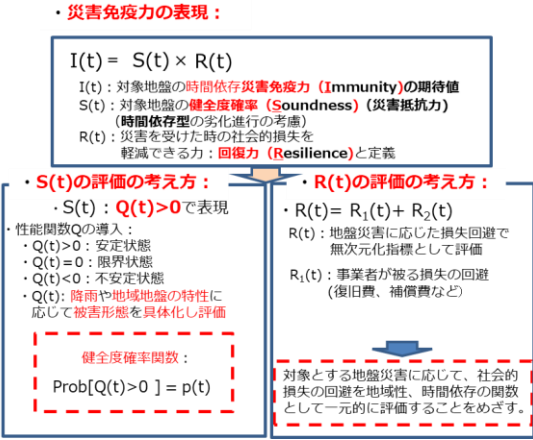


図-2 災害免疫力の工学的評価のイメージ

ここで、 $I(t)$ は、対象地盤の経年時間 t の関数として与えられる災害免疫力の期待値、 $S(t)$ は、対象地盤の経年時間に伴う劣化を考慮した健全度確率としての災害抵抗力、また、 $R(t)$ は、地盤災害を受けた時の社会的損失の程度を指標化した災害回復力として定義される。

本研究の最終的に目指すところは、対象とする事象ごとに式(1)で与えられるそれぞれの指標を具体化し、経年時間を反映した対象地盤の災害免疫力を工学的に表現し、それらを反映した地盤災害脆弱性リスクの客観的な考え方を社会に受け入れられるかたちで示すことである。例えば、ある対策を実施する上での整備優先度の客観化、事前・事後対策をすることによって災害免疫力がどの程度改善されるのかを見えるようにすること、さらに、対象地盤の健全性を確保するためには、いつのタイミングで対策を行うのが合理的なのかを判断するための工学的な枠組みを統計的な視点を取り入れて具体化したいと考えている。

本報では、このような観点から、その最初の試みとして、NEXCO の高速道路内の重要な土木インフラの一つである「切土のり面」に焦点をあてて、式(1)の右辺第一項の「災害抵抗力 $S(t)$ 」の具体的な表現として実務的に受け入れられやすいかたちで維持管理に適した安定度指標を導入し、検討した結果を示す。

3. 切土のり面の安定度指標の考え方とその特色

3.1 これまでの安定度指標への「層理」の導入

切土のり面内部の流れ盤や受け盤と称される地層構造、いわゆる「層理」はのり面の安定度や崩壊のしやすさに影響を与える要因の一つとして考えられる。加えて、「風化」の進行や程度は、切土のり面の健全性に大きな影響を与えることが知られ、地山を切った直後より地質条件や幾何学条件に応じて風化は進行し、経年的な時間経過

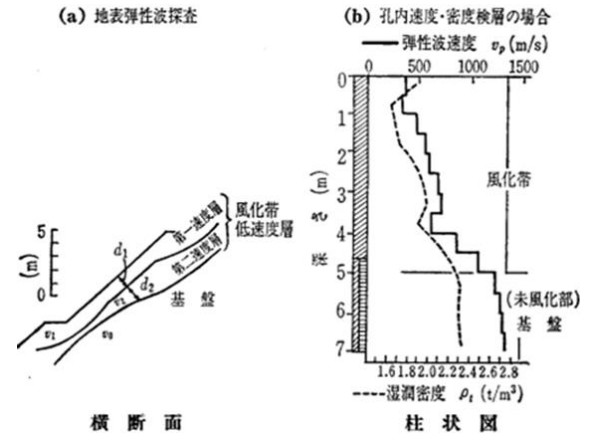


図-3 災害免疫力の工学的評価のイメージ⁸⁾

とともにのり面の健全性は相対的に低下することが想起される。しかし、のり面の風化の追跡調査は、維持管理の効率化を図るうえで重要であるにもかかわらず、経年的な時間を追って継続的になされている事象は少ない。その中で、NEXCO グループ (旧道路公団試験所) では切土のり面の風化に着目して、現地踏査により表面の変状を観察し、物理 (弾性波) 探査を行い、そこから得られたデータを基に切土のり面の安定度の評価が行われている⁸⁾。導入されている安定度指標は、風化の進行程度を表す指標とのり面の幾何学的な形状を表す平均的な傾斜角のみがパラメータであり、実務性を配慮した指標である。ここでは、現 NEXCO で展開されている安定度の評価指標⁸⁾にのり面内部の情報として「層理」の幾何学的特性を新たに反映させた安定度指標を提示し¹¹⁾、経年的に変化するのり面の健全性を統計的なデータに基づいて分析した。

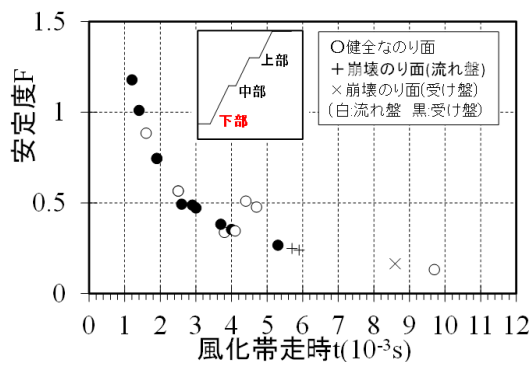
3.2 風化進行の表現と切土のり面の関係性

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-3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検出される場合がしばしばある。旧日本道路公団 (現、NEXCO グループ) では、この p 波速度が 1,500m/s 程度以下の低速度領域を風化帯と定義している。次いで、その風化帯厚さ d を P 波速度 v が横断する時間を「風化帯走時 t 」として、式(2)で定義した。

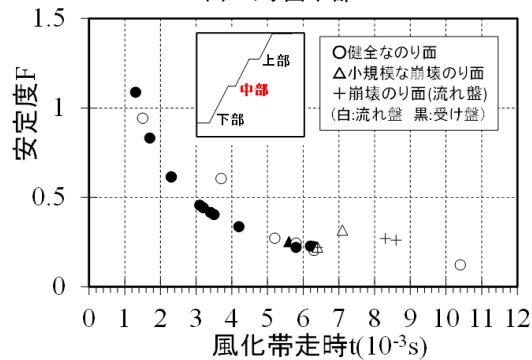
$$t = \frac{d}{v} \tag{2}$$

すなわち、この 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。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、この t を表現する際に (10^{-3} s) の単位が用いられている。

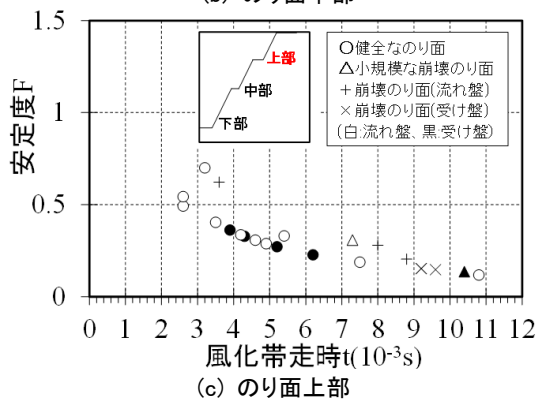
次に、切土のり面の傾斜角を θ とすると、同等の地盤構造で同等の風化程度であれば θ が大きいほど、すなわち急勾配なのり面ほど力学的には不安定であると一般には考えられる。そして、弾性波速度 v がのり面を構成する風化帯層のせん断強さと正の相関 (比例) することを想定して、参考文献⁸⁾では、切土のり面の安定度 F を式



(a) のり面下部



(b) のり面中部



(c) のり面上部

図-4 従来法での安定度 F と風化帯走時 t の関係

(3)で表わし、これをのり面の安定性を表す指標として定義した。

$$F = \frac{v}{d \sin \theta} = \frac{1}{t \sin \theta} \quad (3)$$

本報ではこれを「従来法」として取り扱う。なお、この指標は時間の逆数の単位(1/s)を持つことになる。

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が下部・中部・上部の三箇所に分けられ約 20 年間で 4 回行われている。ここでは、これらの計測調査データを用いて安定度評価を行った。

図-4 は、対象としたのり面下部、中部、上部の従来法での安定度 F と風化帯走時 t の関係をまとめたものである。図-4 (a),(b),(c)は、のり面下部、中部、上部での結果をそれぞれ示している。また、図中の(O/△/+×)は、のり面の状態を示し、白マルと黒マルは、それぞれ「流れ盤」と「受け盤」の違いを表している。

まず、下部・中部・上部で比較すると、のり面下部からのり面上部になるにつれて風化帯走時 t が大きく、安

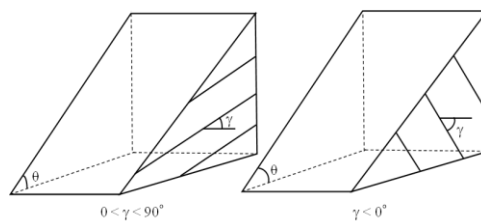


図-5 層理による斜面の分類関係

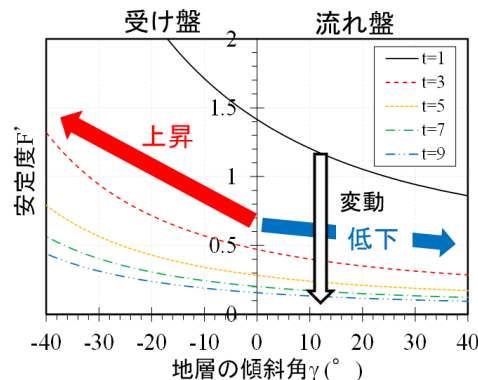


図-6 風化帯走時の変化に着目して安定度と地層の傾斜角との関係性

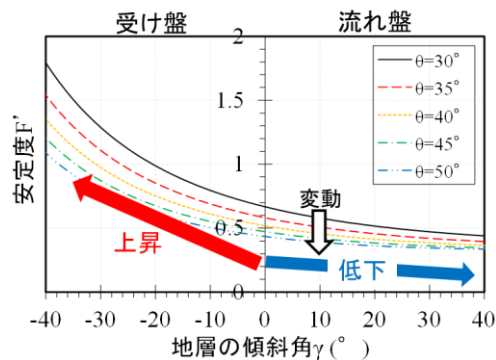


図-7 切土のり面の傾斜角に着目して安定度と地層の傾斜角との関係性

定度 F が総じて小さいデータが多く、また、のり面が変状・崩壊が記録されている数も多くなっている。このことから、のり面上部は中・下部と比べて風化が進みやすい傾向にあり、結果として変状・崩壊のリスクも大きくなることが示唆される。また、流れ盤構造を有するのり面(+)は風化帯走時が 3~6 の比較的小さい範囲で崩壊している場合があるのに対して、受け盤構造を持つ崩壊のり面(x)は風化帯走時が 8~11 程度で崩壊しているケースが多くなっている。流れ盤構造ののり面の方が受け盤のそれよりも t が小さい、すなわち、風化の程度が相対的に小さい場合でも変状や崩壊が発生しやすくなっていることが読み取れる。このようなこれまでの計測結果の傾向を踏まえ、次節では、式(3)中に受け盤、流れ盤の違いを反映した新たな安定度指標を示す。

3.3 「層理」の幾何学的特性を反映した安定度指標

切土のり面の流れ盤と受け盤の違いを示す地層中にある「層理」の向きに着目すると、模式的には、図-5のように表現できる。この「層理」の見かけの傾斜角 γ を水平=0 度よりも流れ盤側に傾斜したとき「正」、受け盤側に傾斜したとき「負」とする。式(3)に「層理」の幾何

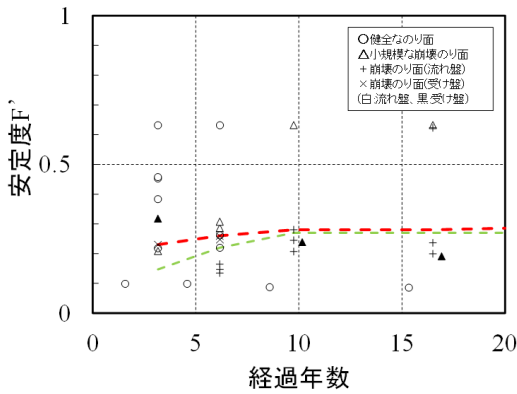


図-8 提案する安定度指標 F' と経過年数の関係性

学特性を反映させるために本報では切土のり面の安定度 F' を式(4)で定義し、これを提案法として適用する¹¹⁾。

$$F' = \frac{v}{d \sin \theta (1 + \sin \gamma)} = \frac{1}{t \sin \theta (1 + \sin \gamma)} \quad (4)$$

この式の特徴を分析するために、図-6 および図-7 をパラメトリックに描いた。図-6 は、提案法である式(4)から得られる安定度 F' と地層(層理)の傾斜角との関係性を風化帯走時 t の変化に着目して示したものであり、図-7 は、切土のり面の傾斜角 θ に着目してまとめたものである。なお、従来法は、提案式において傾斜角 γ が 0° 、すなわち「層理」が水平になっている場合と等価であると言える。

これらのパラメトリックな解析結果から、提案式の特徴として、1)風化の指標である t が増加するとともに、安定度 F' は著しく低下し、徐々にその低下率は小さくなる傾向を示すこと、2)風化の程度が同じ場合 (t が同じ場合)、のり面の傾斜角 θ が大きくなるほど安定度 F' は小さくなり、その影響の程度は「層理」の傾斜角 γ が大きくなるほど小さくなること、3)風化の程度とのり面の勾配が同じであれば、流れ盤側の安定度は受け盤側のそれより小さくなること、4)層理の傾斜角の大きさの安定度に与える影響は、受け盤側で大きく、流れ盤側で小さいことなどがあげられる。本報では、このような特性を有する式(4)を活かした切土のり面の安定性(健全性)評価に展開し、その可能性について分析する。

4. 中・長期弾性波探査結果による安定度指標の経年変化と切土のり面の健全度評価への展開

4.1 安定度指標と経過年数の関係性

3. で述べたように、経年年数を重ねるごとに風化帯走時 t が増加することで、安定度 F' が低下し切土のり面の変状・崩壊が多くなることが計測結果として示されている。中・長期的に計測された結果を通して、提案する安定度指標 F' と経過年数の関係性を示しものが図-8 である。図中には、のり面の健全性を示す安定領域と不安定領域の閾値が緑と赤の破線で示されている。緑の破線は従来法に基づくもの、赤の破線は層理の影響を反映した提案法に基づくものである。図中の破線で安定と不安定

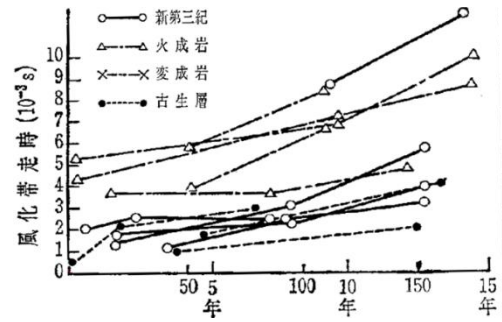


図-9 風化帯走時と経過年数の関係性⁸⁾

領域を区分すると、ある経過年数におけるのり面の安定性を簡易的に判別でき、例えば補修のタイミングなど客観的な判断指標となりえるものと考えられる。また、層理を反映させることにより、閾値が変化し、層理の影響は、特に経過年数の短い段階で顕著にあらわれることが示唆される。

4.2 切土のり面の災害抵抗力の算定モデル

図-8 を参照すると、切土のり面の健全性が保たれる限界の経年時間を推定する予測モデルとして次式を仮定する。

$$S_c(t) = F' - F'_c \leq 0 \quad (5-a)$$

$$F'_c = C \quad (5-b)$$

ここで、 $S_c(t)$ は、式(1)で示すように対象とする切土のり面の潜在的な災害抵抗力の期待値に相当し、 F' は式(4)で与えられる安定度指標、 F'_c は対象とする切土のり面の限界の安定度で、ここでは一定と仮定する。上式で $S_c(t) = 0$ のとき対象のり面は限界状態を迎える。

次に、風化帯走時の経年的変化をどのように評価するかを考える。図-9 は、多賀らによって整理されたものであり、これまでに観察されたのり面の経年的変化の一例を示している。この結果から、少なくとも風化帯走時の初期値は、決して同じではなく、切土のり面の状況によって大きく異なっていること、風化帯走時の経年的変化の表れ方もり面の状況によって異なっていることなどが読み取れる。こうした経年劣化の特性を表現するために、ここでは指数関数を導入する。すなわち、

$$t = t_0 + a(T)^b \quad (6)$$

である。ここに、 t_0 は初期の風化帯走時、 T は経過年数、 a と b は経年劣化曲線のかたちをきめるパラメータであり、のり面の地質形態や状態、保護工の特性や降雨形態の違いなどに依存するものと考えられる。

次に、式(5)中の $S_c(t)$ は、式(6)を反映させた式(4)を代入することで、

$$S_c(t) = F' - F'_c = \frac{1}{t \sin \theta (1 + \sin \gamma)} - C \leq 0 \quad (7)$$

$$= \frac{1}{(t_0 + a(T)^b) \sin \theta (1 + \sin \gamma)} - C \leq 0$$

で与えられる。

式(7)に基づけば、 $F' - F'_c = 0$ の条件から健全性が損なわれる限界の風化帯走時 t_c と限界の経過年数 T_c が次式として確定的に与えられる。

$$t_c = \frac{1}{C \sin \theta (1 + \sin y)} \quad (8a)$$

$$T_c = \left(\frac{t_c - t_0}{a} \right)^{1/b} \quad (8b)$$

これらの式は、定数 C とパラメータ a と b が具体的に得られれば、限界の風化帯走時と経過年数の推定値を与えることになる。一方で、これらのパラメータは、多くの要因に依存すると考えられるので、確定的に決めるのは容易ではない。

以下では、式(7)で与えられる予測安定度式に基づいて、ロジスティック回帰分析を適用し、先に述べた想定される切土のり面不安定化の影響要因を抽出し、その健全性の経年推移と健全性が損なわれる限界の時期(経過年数)を確率分布として推定する手法を示し、その有用性を考察する。

5. 安定度の経年変化への統計的な考え方の導入

5.1 安定状況予測式の提案

ロジスティック回帰分析は、いくつかの要因(説明変数)から「2値の結果(目的変数)」が起こる確率を説明・予測することができる統計手法で、多変量解析の手法の一つである。本報では切土のり面の安定状況を目的変数にし、説明変数は提案した切土のり面の予測安定度 F' と切土のり面の保護工種類 x_2 にした。保護工種類 x_2 も説明変数とする理由は安定度 F' に保護工の効果を反映されていないことである。切土のり面の安定状況のこれまでのデータから見ると、密閉型保護工(コンクリート吹付工、コンクリートブロックなど)を施工した切土のり面に不安定になる場合が非常に少なく、大部の不安定のり面は開放型(植生工、法枠工など)を施工した切土のり面であることを確認できた。従って、保護工の種類も切土のり面の健全度に非常に大きい影響を与えると考ええる。安定度 F' と保護工種類をロジスティック回帰式の説明変数にして作成した安定状況予測式は、次となる。

$$y = \frac{1}{1 + \exp\{-(\alpha + \beta_1 F' + \beta_2 x_2)\}} \quad (9)$$

y : 安定状況の判別得点, α : 切片, β_1 : 安定度 F' の回帰係数, F' : 提案した予測安定度式, β_2 : 保護工種類 x_2 の回帰係数, x_2 : 観測された切土のり面の保護工種類のデータ(開放型:0, 密閉型:1)

本報では、切土のり面の不安定状況データを0にし、安定状況データを1にすると、ロジスティック回帰の考え方による式(9)で算出した判別得点 y は0.5より小さければ、不安定と判定し、大きければ、安定と判定できる。従って、式(5-a)と(5-b)は、

$$\begin{aligned} S_c(t) &= F' - F'_c \leq 0 \\ &= \frac{1}{1 + \exp\{-(\alpha + \beta_1 F' + \beta_2 x_2)\}} \leq 0.5 \\ &= F' - \left(\frac{-\alpha - \beta_2 x_2}{\beta_1} \right) \leq 0 \end{aligned} \quad (10-a)$$

$$F'_c = C = \frac{-\alpha - \beta_2 x_2}{\beta_1} \quad (10-b)$$

となる。

5.2 パラメータの推定

式(9)を用いて健全度評価モデルを作成するために、ロジスティック回帰式の未知パラメータ α, β_1, β_2 と経年劣化の予測式(6)の未知パラメータ a, b を推定する必要がある。岩種と地質年代による切土のり面の経年劣化特性に異質性が存在するため、パラメータを推定する時、切土のり面のデータを岩種と地質年代によるいくつかのグループに分けてグループごとにパラメータを推定する必要があると考える。ただし、分けたのり面グループにデータの数が少ないため、推定されたパラメータの信頼性が低いという問題が発生する可能性がある。この問題を解決するために、本報では、階層ベイズモデル¹²⁻¹⁵⁾という手法でパラメータをのり面グループごとに推定する。階層ベイズモデルはパラメータが分布を持つ確率変数として考える推定方法である。具体的には、一つの超事前分布(事前分布の分布)を設定し、ベイズ統計学で全データを分析すると、超事前分布から各グループのパラメータの事前分布を(概略的な分布)生成できる。そして、ベイズ統計学でグループごとにデータを分析し、事前分布から各グループのパラメータの事後分布(より正確な分布)を推定できる。

数式で表すと、

$$p(\theta|Y) = \frac{p(Y|\theta)}{p(Y)} \propto p(Y|\theta) \times p(\theta|h_\theta) \times p(h_\theta) \quad (11)$$

となる。

ここで、 θ : 推定されるパラメータ, Y : 観測されたデータ, $p(Y)$: 正規化定数(事後確率の総和を1にするための定数), $p(Y|\theta)$: 尤度関数, $p(\theta|h_\theta)$: 推定されるパラメータの事前分布, $p(h_\theta)$: 超事前分布(推定されるパラメータの事前分布を決めるハイパーパラメータの分布)。

階層ベイズモデルでパラメータを推定するとき、階層構造による全のり面データとグループごとにデータを同時に分析可能で、結果の信頼性を確保でき、推定の精度も向上できるという利点がある。

最尤推定法と比べ、階層ベイズモデルは係数を点推定するのではなく、MCMC法¹⁶⁾等を用いて事後確率密度分布として求める。そのため推定される不確実性をも含めて考慮してパラメータを推定できる。

本研究では、東名高速道路の松田IC~多治見IC間の切土のり面の調査報告書から207例切土のり面のデータ⁹⁾を収集した。地質年代と岩種による表-1のような7つグループに分け、グループごとに階層ベイズモデルでデータを分析し、パラメータ $\alpha, \beta_1, \beta_2, a, b$ を推定する。ここで、 $\alpha = (\alpha_1 \dots \alpha_K), \beta_1 = (\beta_{11} \dots \beta_{1K}), a = (a_1 \dots a_K), b = (b_1 \dots b_K)$ 。特に、ここで収集した切土のり面データの中に、大部の切土のり面の保護工種類は開放型保護工で、密閉型

表-1 切土のり面の分類

| 分類 | 地質年代, 岩種 |
|----|--------------------|
| 1 | 新第三紀, 泥岩砂岩互層(泥岩優勢) |
| 2 | 新第三紀, 泥岩砂岩互層(砂岩優勢) |
| 3 | 新第四紀, 崩積土 |
| 4 | 中生代, 変輝緑岩・緑色片岩混在 |
| 5 | 新第三紀, 礫岩 |
| 6 | 新第三紀, 砂岩・泥岩・礫岩混在 |
| 7 | 新第三紀, 安山岩 |

表-2 パラメータの平均値と標準偏差

| パラメータ | 平均値 | 標準偏差 |
|--------------|--------|-------|
| α_1 | -17.34 | 8.39 |
| α_2 | -8.73 | 2.61 |
| α_3 | -28.72 | 17.89 |
| α_4 | -31.05 | 17.51 |
| α_5 | -8.48 | 4.04 |
| α_6 | -15.63 | 5.77 |
| α_7 | -34.27 | 12.45 |
| β_{11} | 231.58 | 95.72 |
| β_{12} | 49.00 | 32.92 |
| β_{13} | 74.46 | 44.66 |
| β_{14} | 72.45 | 43.49 |
| β_{15} | 24.57 | 16.60 |
| β_{16} | 264.74 | 88.92 |
| β_{17} | 165.11 | 63.19 |
| β_2 | 41.90 | 29.63 |
| a_1 | 0.10 | 0.13 |
| a_2 | 0.45 | 0.48 |
| a_3 | 0.37 | 0.52 |
| a_4 | 0.23 | 0.26 |
| a_5 | 0.41 | 0.64 |
| a_6 | 0.23 | 0.30 |
| a_7 | 0.20 | 0.28 |
| b_1 | 2.95 | 0.63 |
| b_2 | 1.28 | 0.52 |
| b_3 | 1.26 | 0.64 |
| b_4 | 1.65 | 0.61 |
| b_5 | 1.33 | 0.83 |
| b_6 | 1.68 | 0.52 |
| b_7 | 0.49 | 0.38 |

表-3 安定状況予測式の正答率

| のり面分類 | 正答率(%) |
|-------|--------|
| 1 | 100 |
| 2 | 86 |
| 3 | 100 |
| 4 | 100 |
| 5 | 83 |
| 6 | 92 |
| 7 | 100 |

保護工を施工した切土のり面の数が非常に少なく、わけた切土のり面グループの中には、保護工種類を分類できないグループも見受けられた。そのため、保護工種類 x_2 の回帰係数 β_2 をグループごとに推定せず、全のり面データを分析することで β_2 を推定することにした。

階層ベイズモデルでパラメータを推定するとき、パラメータの事前分布を設定する必要がある。本研究では、 α の事前分布は正規分布と仮定した。安定度の増加と密閉型保護工の施工による切土のり面の健全性は向上すべき(判別得点は1に近づく)と想定されることから、 β_1, β_2 の事前分布は正の値をしか取れない半正規分布(Halfnormal)にした。そして、経年劣化程度は経年と共に増加すると想定されるので、経年劣化の予測式に a, b の事前分布も正の値をしか取れない半正規分布にした。事前分布を決める超事前分布は分散が大きい正規分布(無情報超事前分布)にした。

解析には python(version 3.9.12)のベイズ統計ライブラリ pymc(version 4.0.0)を使用し、MCMC法にはNUTS法¹⁶⁾を使用する。階層ベイズモデルでパラメータを推定する概要は図-10に示す。

5.3 パラメータの推定結果と安定状況予測式の正答率

階層ベイズモデルで推定されたパラメータの分布の形、平均値と標準偏差は図-11と表-2に示す。

推定されたパラメータの平均値で作成した安定状況予

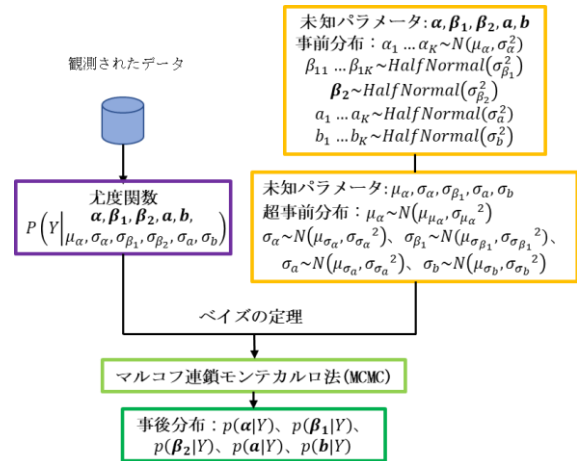


図-10 階層ベイズモデルでパラメータを推定する概要

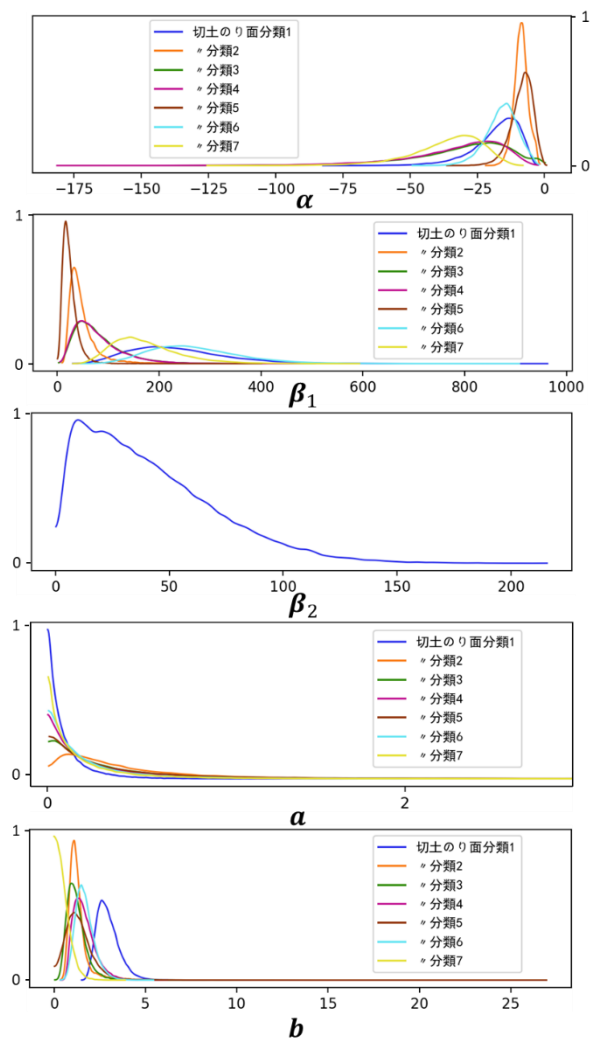


図-11 パラメータの分布の形

測式(9)の正答率(全ての判別のうち、正解した判別の割合)は表-3に示す。

5.4 パラメータの値からの考察

次には階層ベイズモデルで推定されたパラメータの値で切土のり面の風化特性を考察する。まずはロジスティック回帰式のパラメータ β_1, β_2 について考察する。

パラメータ β_1 を考察するため、切土のり面の安定度が

表-4 各のり面グループの β_1 のオッズ比

| のり面分類 | 地質年代, 岩種 | オッズ比 |
|-------|--------------------|------------|
| 1 | 新第三紀, 泥岩砂岩互層(泥岩優勢) | $e^{2.32}$ |
| 2 | 新第三紀, 泥岩砂岩互層(砂岩優勢) | $e^{0.49}$ |
| 3 | 新第四紀, 崩積土 | $e^{0.74}$ |
| 4 | 中生代, 変輝緑岩・緑色片岩混在 | $e^{0.72}$ |
| 5 | 新第三紀, 礫岩 | $e^{0.25}$ |
| 6 | 新第三紀, 砂岩・泥岩・礫岩混在 | $e^{2.65}$ |
| 7 | 新第三紀, 安山岩 | $e^{1.65}$ |

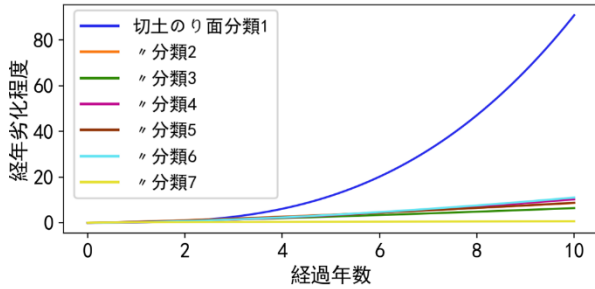


図-12 経年劣化パス(aT^b)の形

0.01 を下げる時, 各のり面グループの β_1 のオッズ比¹⁷⁾ ($e^{0.01\beta_1}$)を計算する。ここで, オッズ比($e^{0.01\beta_1}$)は安定度が0.01を下げると, 不安定になりやすさは低下前の何倍になるかを表す指標である。すなわち, オッズ比で安定度の低下による不安定になりやすさの増加速度を表せる。各切土のり面グループのオッズ比は表-4に示す。

オッズ比から見ると, のり面分類3(崩積土)を基準とし, 安定度が毎0.01を下げる時, 不安定になりやすさの増加程度はのり面分類1(泥岩砂岩互層, 泥岩優勢)が崩積土の4.9倍, のり面分類2(泥岩砂岩互層, 砂岩優勢)が崩積土の0.8倍, のり面分類4(変輝緑岩・緑色片岩混在)が崩積土の0.98倍, のり面分類5(礫岩)が崩積土の0.61倍, のり面分類6(砂岩・泥岩・礫岩混在)が崩積土の6.75倍, のり面分類7(安山岩)が崩積土の2.48倍であることがわかる。

すなわち, のり面分類は1(泥岩砂岩互層, 泥岩優勢), 6(砂岩・泥岩・礫岩混在)と7(安山岩)の場合は安定度の低下によって不安定になりやすく, 2(泥岩砂岩互層, 砂岩優勢), 3(崩積土), 4(変輝緑岩・緑色片岩混在), 5(礫岩)の場合は比較的崩壊しにくいと言える。

パラメータ β_2 は β_1 と同じくオッズ比で考察する。 β_2 のオッズ比は $e^{\beta_2} = e^{42.035}$ である。ここで, オッズの意味は密閉型保護工を施工した切土のり面が安定状況を維持するしやすさが, 開放型保護工を施工した切土のり面の何倍を表すかを示すものである。 $e^{42.035}$ は1より遥かに大きいので, 密閉型保護工による切土のり面の経年劣化の防止効果が高く, 対策によって不安定になる可能性が相対的に低くなることが示唆される。ただし, 本研究で収集した切土のり面のデータは20年間の調査データであるので, 20年間を超えると, 密閉型保護工の効果がどのように変動するかについては検討していく必要があると考える。

次には, 経年劣化程度の予測式(6)のパラメータ a, b を

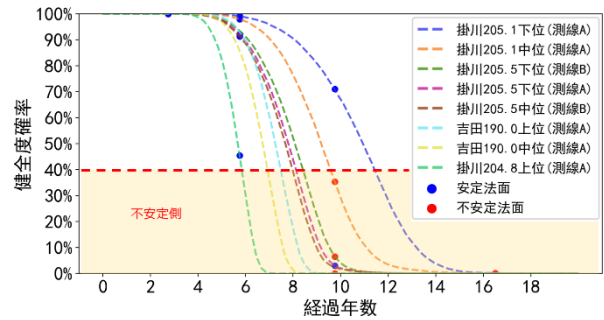


図-13 健全度確率予測曲線の検証

考察する。経年劣化パスの形を決める部分 aT^b をプロットすると, 図-12に示す。

経年劣化パスの形から見ると, のり面分類1(泥岩砂岩互層, 泥岩優勢)の経年劣化の進行速度は非常に速く, 2(泥岩砂岩互層, 砂岩優勢), 3(崩積土), 4(変輝緑岩・緑色片岩混在), 5(礫岩), 6(砂岩・泥岩・礫岩混在)の経年劣化の進行速度は比較的緩やかで, 7(安山岩)の経年劣化の進行速度は非常に緩やかであることを読み取れる。特に, のり面分類7(安山岩)のパラメータ b の値は $0 < b = 0.49 < 1$ であるから, 安山岩の経年劣化の進行速度は経年と共に低下する傾向にあることがわかる。

5.5 健全度評価モデルの提案と検証

階層ベイズモデルにより推定されたパラメータ $\alpha, \beta_1, \beta_2, a, b$ は図-11に示すような分布を持つ確率変数である。従って, パラメータの分布を式(10-a)に代入すると, 切土のり面が経過年数 T の時, 健全度が損なわれる確率は式(12)で計算できる。

$$p(F' - F'_c \leq 0) = p(F' - F'_c \leq 0) = p\left(\frac{1}{(t_0 + a(T)^b)\sin\theta(1 + \sin\gamma)} - \left(\frac{-\alpha - \beta_2 x_2}{\beta_1}\right) \leq 0\right) \quad (12)$$

式(12)により算出した健全度が損なわれる確率と経過年数から健全度確率予測曲線を作成可能である。本研究では8例面の健全度確率予測曲線を作って, 28例の各のり面に属するテストデータで安定度評価モデルを検証した。結果は図-13に示す。

結果から見ると, 提案したモデルにより予測した切土のり面の中で, 低健全度確率を示した多くのり面が, 実際に不安定化したのり面と整合しており, 提案モデルの有用性を示していると考えられる。特に, 切土のり面の健全度確率が40%の以下に落ちる時, 不安定になる切土のり面の数が多くなることから, 対策を取る一つの目安と読み取れる。

6. まとめ

本報では, 過去の降雨や地震履歴, 経年的に変化する特殊土地盤の潜在的な地盤災害脆弱性リスクを客観化するための概念として, 力学的要素である「災害抵抗力」と社会的要素である「災害回復力」の二つからなる「災害免疫力」の考え方を新たに提示した。ここでは, この考え方を基本にして, 切土のり面を対象とした「災害抵抗力」の工学的評価について実務的な観点から分析した。

本報で得られた知見をまとめると以下ようである。

- 1) 東名・中央高速道路の切土のり面の計測調査データを整理し、風化帯走時とのり面の安定度の関係性について分析し、流れ盤と受け盤の違いを安定度の算定に導入することの重要性について論じた。その分析結果を踏まえ、実務的な観点から切土のり面の安定度評価に層理と風化の影響を反映した式(4)を提案した。
- 2) 風化帯走時と経過年数を関係づける式(6)を活かして、のり面の健全性が損なわれる限界の風化帯走時 t_c と限界の経過年数 T_c の推定式を与えた。
- 3) ロジスティック回帰分析と階層ベイズモデルを組み合わせることで、経年的に変化する切土のり面の健全度を式(12)のように確率分布の変化として表現し、それに基づいて安定度評価モデルを提案した。モデルを検証する結果から見ると、提案したモデルで予測する切土のり面の健全度確率は実際の安定状況と一致している場合が多く、本モデルを活かした切土のり面の将来における安定状況を評価できる可能性を示した。

謝辞:本研究は、日本学術振興会(JSPS)の科学研究費である基盤研究(A)(課題番号:20H00266)の助成を受けて行われた。本報をまとめるために使用した切土のり面の計測調査データは、NEXCOグループのご厚意により提供いただいたものであり、心よりの感謝を申し上げたい。この2年継続的に協働で研究を進めさせていただいている石川達也教授(北海道大学)、川村志麻教授(室蘭工業大学)、村上哲教授(福岡大学)、酒匂一成教授(鹿児島大学)、所哲也准教授(北海学園大学)、川尻峻三准教授(現九州工業大学、元北見工業大学)にあらためて感謝の意を表したい。また、本研究の内容は宇多涼太郎氏(元、九州大学大学院工学府、現、広島市役所)の修士研究の内容を活かして取りまとめている。この場を借りて感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 平成28年熊本地震地盤災害調査団(2017):平成28年熊本地震地盤災害調査報告書,(公社)地盤工学会.
- 2) 平成29年九州北部豪雨地盤災害調査団(2018):平成

- 29年7月九州北部豪雨による地盤災害調査報告書,(公社)地盤工学会.
- 3) 平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査団(2017):平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査報告書,(公社)地盤工学会.
- 4) 平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団(2019):平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書,(公社)地盤工学会.
- 5) 令和2年7月九州豪雨地盤災害調査団(2021):令和2年7月九州豪雨地盤災害調査報告書,(公社)地盤工学会.
- 6) 夏目貴之(2019):温暖化見越して想定降雨量を1.1倍に,NIKEI CONSTRUCTION,9月9日号,pp.22.
- 7) 令和2年・3年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)実績報告書(研究実績報告書)(2022):気候変動適応型災害免疫力の向上を志向した地域地盤災害脆弱性評価手法の確立と適用(課題番号:20H00266),日本学術振興会.
- 8) 多賀直大・田山聡・奥園誠之・八木沢孝(1991):長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性裁引,土と基礎,第39巻,6号,pp.41-47.
- 9) 高速道路総合技術研究所(2018):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.
- 10) Yasufuku N and Alowisy A (2022): Challenges and lessons learned from heavy rainfall-induced geo-disasters over the last decade in Kyushu Island, Japan, Progress in Landslide and Technology, 1(2) (in press).
- 11) 安福規之・宇多涼太郎・石藏良平・Adel Alowsy (2021):層理・風化特性を反映させた切土のり面の安定度指標の提案と適用,第56回地盤工学会研究発表会,12-10-3-01.
- 12) 貝戸清之・小林潔司・青木一也・松岡弘大(2012):混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計,土木学会論文集D3,68巻4号p.255-271.
- 13) 深澤圭太・角谷拓(2009):始めよう!ベイズ推定によるデータ解析・日本生態学会誌,59巻2号p.167-170.
- 14) 小川福嗣・近田康夫(2018):橋梁点検データによる劣化予測に関する一考察,構造工学論文集A,64A巻p.120-128.
- 15) 大石若菜・加藤郁生・西村修・佐野大輔(2020):スパース推定法と階層ベイズ推定法による環境水中ウイルス自然死滅モデルの構築,土木学会論文集G,76巻7号p.
- 16) Osvaldo Martin(2018): Bayesian Analysis with Python: Introduction to statistical modeling and probabilistic programming using PyMC3 and ArviZ, 2nd Edition (English Edition),.
- 17) Annette J.Dobson(2008):一般化線形モデル入門 原著第2版.

The author's group is attempting to evaluate the differences in disaster immunity in engineering practice for each region based on a new concept of 'disaster immunity' in order to reflect the past rainfall and earthquake history and the characteristics of local soil ground that change over time, targeting climate change disaster vulnerable areas with volcanic ash soils and weathered residual soils ground.

From this perspective, this paper examines a framework for expressing the stability of slopes as a probability distribution that changes over time and the key outcome is characterized by reflecting the geometric characteristics of the stratigraphy inside the cut slope in the stability evaluation index presented by NEXCO.