吹付けのり面の性能低下のモデル化に関する研究

京都大学 工学部地球工学科

土木工学コース

赤木 舞

要旨

建設後 30 年以上を経て、今日、高速道路における吹付けのり面の老朽化が 進み、その維持補修計画立案においてアセットマネジメントの観点からの検討が 注目を集めている。本研究では、吹付けのり面の性能低下をモデル化することに より、最適な維持補修計画の立案のための判断指標のひとつとして各吹付けのり 面のライフサイクルコストを算定する。

吹付けのり面の老朽化によって引き起こされる現象として考えられるものに、 背面地山の風化による表層崩壊がある。これは、背面地山の風化が進む事により 背面地山と吹き付けコンクリート間の粘着性が低下し、一体となって地山とコン クリートが滑り落ちるもので、本研究ではスライド現象と称す。実際のスライド 現象との類似性から、吹付けのり面の安定性評価にあたっては表層崩壊モデルを 適用する。

本モデル化では、性能低下を考える際に特に地山の粘着力の低下に着目する。 ここで二つの問題点が生じる。一点目は、吹付けのり面の物性値の測定が、継続 的かつ定期的には行われておらず、モデル化を行う際に利用できるデータの数自 体が少ないという点である。二点目は、風化による粘着力の低下は、自然ハザー ドなどの様々な要因を受け進行するという点である。以上二点は、粘着力の低下 の将来予測のモデル化において不確実性を増大させる要因となり、現況に合った 結果を導くことを困難にする。そこで、本研究では粘着力の低下を表現するため に金融工学の分野で用いられる幾何ブラウン運動過程を導入することにより、上 に示すような原因により生じる不確実性をも評価することのできる吹付けのり面 の性能低下のモデル化を試みる。

i

目次

第1章	序章	
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	吹きつけのり面の性能低下のモデル化に関する基本的な考え方	
2.1	のり面安定性解析	5
2.2	吹 付 け の り 面 の 劣 化 状 況	5
2.3	粘 着 力 の 低 下 の モ デ ル 化	
2.3	1.1 基本方針	7
2.3	1.2 回帰曲線を用いたモデル化について	8
2.3	3.3 幾何ブラウン運動過程を用いたモデル化について	8
2.3	3.4 幾何ブラウン運動過程の特性	9
2.4	吹きつけのり面の年スライド発生確率	10
2.5	LCC の 評 価 方 法	10
第3章	性 能 低 下 の モ デ ル 化 に お け る 諸 値 の 設 定 方 法	
3.1	地山粘着力	14
3.2	風化帯厚さ	15
3.3	幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 の パ ラ メ ー タ μ	16
3.4	幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 の パ ラ メ ー タ	16
3.5	粘 着 力 の 低 下 の シ ミ ュ レ ー シ ョ ン を 行 う 際 の 初 期 値	17
第4章	実 地 盤 へ の 適 用 及 び 考 察	
4.1	既 に ス ラ イ ド 発 生 を 確 認 し た の り 面 へ の 適 用	18

4.2 未だにスライド発生を確認していないのり面への適用 21

第5章 結語及び今後の課題

5.1		26
5.2	今後の課題	26

参考文献	28
謝 辞	29

第1章 序章

1.1 研究の背景

のり面崩壊の代表的な対策工としては、地下水排除工・グラウンドアンカー エ・吹きつけ工・のり枠工などがある。このなかでも吹付け工を用いた斜面は、 高度経済成長の時代に建設されたものが非常に多く、建設後30年以上を経て、 現在その修繕が必要とされている。しかし、修繕を要する斜面の数が非常に多く 予算の制約もあることから、その補修計画立案において戦略的に維持補修投資予 算を決定するというアセットマネジメントの観点からの検討が注目を集めている。

土木構造物の維持補修問題に対しては、これまで技術論に基づく検討が行われてきた。土木構造物のアセットマネジメントに関する基本的な検討事項は、以下のように要約される¹⁾。

構造物の現在状態規定

構 造 物 の 劣 化 お よ び 、 自 然 八 ザ ー ド (地 震 ・ 降 雨 等)の 到 来 に 対 す る 将 来 状 態 予 測

および に基づく費用対効果を考慮した最適な維持補修計画の立案

これらの項目において、 の現在状態の規定には健全度評価が用いられ、 の 将来状態予測における不確実性の定量化にはリスク評価、 の最適な維持補修計 画の立案に関する判断指標としては、ライフサイクルコスト(以下 LCC と称す) が用いられることが一般的である。

LCCとは、構造物の建設、操業、維持のコストの総計を考えることによって、 構造物供用年数の全体にわたり経済性を検討する方法である。

通常、構造物のコストを考える時、調査や企画、設計などを含む建設コストの みを対象に評価しがちである。しかし、LCC全体からみれば、初期投資の建設コ ストはまさに氷山の一角であり、水面下には膨大なコストが隠れている。それは、 構造物の完成後に発生する維持管理上のコストである。昨今では建設コスト削減、 設備工事コスト削減、資材などのメーカーコスト削減のみに注視するケースが多 く見られる。これらの中には、行き過ぎたコスト削減の結果、完成後、LCC総コ ストの増加を招くというケースも見られる。特に、他の構造物に比べて各段に供 用年数の長い道路構造物において、これは顕著に表れる。建設後の維持管理につ

いて考えることが道路管理者側にとっても利用者側にとっても最重要課題となる ことは確実である。

しかし、舗装や橋梁等のアッセトマネジメントに関する研究が進んでいる一方 で、のり面のアセットマネジメントに関する研究は、いまだ途についたばかりで ある。例えば、先ほど示した の将来状態の予測においては、いかにして不確実 性の定量化を行うか、LCCの算定式はどう設定するのかなど、問題は山積みであ る。また、補修が必要とされる斜面は全国各所に散らばっており、その数も非常 に多いため、全箇所において定期的な計測を繰り返すことは予算的に難しい。の り面に対して、費用対効果を考慮した LCC を指標として維持補修の計画を立案す る事は、必要不可欠で早急に解決されるべき課題なのである。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、吹付けのり面の性能低下に対して不確実性を考慮したモデル 化を構築することである。またさらに、構築したモデル化が維持補修計画の最適 化について検討することができるほどの有用性を持つ判断指標を提案できるかに ついて検討を行うことである。

先述のように、のり面のアセットマネジメントに関する研究は、いまだ途につ いたばかりである。その理由は、地盤構造物が明確な劣化過程を示さないことに ある。1.1 の土木構造物のアセットマネジメントに関する基本的な検討事項 に も書いたように、構造物の劣化により引き起こされる性能低下の予測を行うこと ができなければ、LCCは算定できない。よって、第一段階として劣化過程のモデ ル化とその評価手法について考える。

劣化過程を考えるにあたり、最初に斜面構造物の性能低下の要因として想定さ れる項目を考える。さきほど、代表的な対策工として、地下水排除工・グラウン ドアンカーエ・吹きつけ工・のり枠工を挙げた。例えば地下水排除工では目詰ま りによる性能低下が考えられ、グラウンドアンカーエではグラウンドアンカーの 腐食による性能低下が考えられる¹⁾。このように対策工によって性能低下の要因 は変わり、また性能低下によってどのような現象がおこるのかは様々である。本 研究では、特に吹付け工の劣化過程を考えることとする。

吹付け工の性能低下は、吹付けコンクリートの劣化によって引き起こされ、吹

付けコンクリートの劣化が、さらにその下にある地盤の劣化を引き起こす。この 劣化過程のモデル化の難しさは、吹付け工の性能低下の原因である「風化」を力 学的に直接評価することができないという点にある。本研究では、手法の提案と その有用性についての考察を行うが、その前段階として、風化によってどのよう に劣化が起こるのか、その性能低下のメカニズムを推定する。

まず、地盤を覆っている吹付けコンクリートは、劣化によりその表面に亀裂を 発生させる。生じた亀裂から雨などの水が入り、それにより吹付けコンクリート の下の地盤が風化される。風化されることにより、地盤の粘着力は低下する。粘 着力の低下により、吹付けコンクリートと地盤の付着性が低下する。結果、コン クリートと地盤が一体となって滑り落ちる現象(以下これをスライド現象と称す) が生じる。

本研究では、このスライド現象に着目し、その発生時期を指標とした安定性評価手法を構築することとする。そして、その評価手法に基づき、検討対象としたのり面の個々の形状、物性、性能低下を反映させた LCC の算定および LCC 最小となる補修期間を算定することを目的とし、効率的な維持補修計画立案のひとつの判断材料を与えるものとしてこの手法を提案する。

1.3 本 論 文 の 構 成

第2章では、斜面の性能低下のモデル化を行う前に、その基本的な考え方につ いて記す。まず、本研究では吹付け工の性能低下を評価する際には、実際のスラ イドによる崩壊形状との類似性に着目し、表層崩壊モデルを適用する。次に、表 層崩壊モデルの式について定義した後、スライド現象の要因である風化によって 生じる吹付けのりの性能低下の実態を示す。そして、粘着力の低下モデルについ ての方針及びモデル化で用いる考え方をまとめて記す。最後に、吹付けのり面の スライド発生確率の算定方法について記した後、LCCの評価手法と LCC 算定の ための定義式を示す。

第3章では、モデル化の第一段階として、吹付けのり面の性能低下のモデル化 における諸値の設定方法を記す。3.1 で地山の粘着力の設定方法として測定値か らの算定・推定方法を示す。3.2 では、風化した地盤の厚さの設定方法を示す。 3.3 と 3.4 では、幾何ブラウン運動過程のパラメータである平均値周りの変動性

(以後、ボラティリティ と称す)と平均的な変動率(以後、トレンドµと称す)の設 定方法について記す。

第4章においては、対象としている 13 地点を既にスライドの発生が確認され ている8地点と未だにスライドの発生していない5地点にわけて考え、前者に対 しては回帰曲線を用いたモデル化を、後者に対しては幾何ブラウン運動過程を用 いたモデル化を適用する。まず、既にスライドの発生が確認されている8地点に 対してモデル化を適用した結果を考察することにより粘着力の設定方法と風化帯 厚さの設定方法の妥当性を検討する。さらに、残りの5地点に幾何ブラウン運動 過程を用いたモデル化を適用した結果を示し、未だにスライドの発生していない 地点における吹付け工の性能低下の将来状態を予測することで、効率的な維持補 修計画立案のための判断指標として本モデル化の適応性についての考察を行う。 第5章では、第4章の結果と考察をうけて、結語及び今後の展望について示す。 第2章 吹付けのり面の性能低下のモデル化に関する基本的な考 え方

2.1 のり面安定性解析

本研究においては、吹付けのり面の崩壊形態はスライドを仮定しおり、実際の スライドの崩壊形態との類似性から、吹付けのり面の安定性評価には、図 2.1 に 示す斜面の表層崩壊モデルを適用する。表層崩壊モデルにおいては、安定性は地 山のせん断抵抗に対する上載加重の比で表され、その安全率 *Fs* は次式により表 される。

$$F_{S} = \left(1 - \frac{\gamma_{W}H_{W}}{\gamma H}\right) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha}$$

$$\gamma_{W};$$
水の単位体積重量 (kN/m^{3})
$$\gamma;$$
土の単位体積重量 (kN/m^{3})
$$c;$$
地山の粘着力 (kN/m^{2})
(2.1)
$$\phi;$$
地山の内部摩擦力 (rad)
$$a;$$
無限斜面の傾斜角 (rad)
$$H;$$
表層土の層厚 (m)
$$H_{W};$$
表層土中の水深 (m)

さらに、本研究では解析パラメータを確率変数とする事から、吹付けのり面の 健全性を示す指標として以下に示す性能関数 *Q*を定義する。

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_W H_W}{\gamma H}\right) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} - 1$$
(2.2)

なお、式(2.2)より以下の条件が吹付けのり面の健全性を表す条件となる。

$$Q \ge 0 \tag{2.3}$$

2.2 吹付けのり面の劣化状況 2)

高速道路建設初期から、現場状況の変化に対応しやすく施工も容易である吹付け工は、多数の切土のり面に対し施工されてきた。建設後 30 年以上経過し、多くののり面でひび割れ、せり出しなどの変状が確認されている。本来、吹付けの

り面における吹付けコンクリート自体への要求性能は以下の2点であり、地山の 崩壊やすべりに対する直接的な抑止力は期待されていない。

表面からの風化抑制機能

地山と吹付けコンクリートの付着による浮石などの落石防止機能

そこで、吹付けのり面の安定性を吹付けコンクリートの風化抑制機能低下によ り生じた背面地山の付着力低下という観点から考える事とし、本研究で対象とす る吹付けのり面に見られるスライド現象は、吹付けコンクリートの施工後コンク リートと地山の界面における付着力の低下が要因であると考える。

吹付けのり面の劣化を背面地山の風化と捉えるわけであるが、地山の地質や暴露される環境状況の多様性による複雑さから、背面地山の風化を評価し吹付けの り面の要求性能に関して共通の指針を作成するには至っていない。そこで本節で は、吹付けのり面の劣化の評価を研究事例に基づき整理する。

実際には、国内ののり面のうち、供用後数回にわたり速度検層が実施されてい る地点を対象とし、経年的に変化が追跡調査されている弾性波速度を用いて、背 面地山の風化による劣化進行程度を検討する。風化に伴い弾性波速度が低下する 事を利用して、弾性波速度が毎秒 1km 程度以下の低速度帯範囲を風化帯と考え、 その厚さを風化帯厚さと称する。風化の度合いと風化帯厚さを同時に評価するた めの指標値として式(2.4)で求める風化帯走時を導入する。風化帯走時とは、風化 帯を弾性波が通過するのに要する時間を表し、JH 試験所により導入されている 指標値である。

$$T = \frac{d}{V_p}$$

$$T : 風化帯走時$$

$$d : 風化帯厚さ(m)$$

$$V_p : 風化帯の弾性波速度(m/s)$$
(2.4)

図 2.2(1)~(4)に風化帯走時を縦軸、供用後の経過時間を横軸として風化帯走時の経時変化を次の~の分類に分けて整理した結果を示す。

新第三紀堆積岩 中古生代堆積岩 中古生代堆積岩 第四紀・火成岩・変成岩 さらに、風化帯走時の経時変化の傾向を 4 タイプに分け、これを模式的に示し たものが図 2.3 となる。図 2.3 において、経過時間の変化に対し、風化帯走時の 変化がみられない部分は吹付けコンクリートの密閉効果が発揮されていると理解 できる。風化が進行するに従い、グラフは右上がりになるが、途中傾きの減少が 見られ、風化進行速度が低下していることがわかる。これら 4 タイプについて詳 しく記したものが以下である。

- タイプ ……新第三紀堆積岩及び一部の中古生代堆積岩に見られるタイプで、施 工完了後から一定の期間、保護工による密閉効果が見られる。
- タイプ a…中古生代の岩盤(火成岩・変成岩・堆積岩)に典型的で、施工完了直後から風化進行が開始するタイプである。一定期間の風化進行後、 勾配の減少傾向がみられる。
- タイプ a'… 第四紀の土砂状地盤や強風化岩盤に見られ、施工完了直後から風化 進行が開始し、 aよりも進行速度が大きい。一定期間の風化進行 後、勾配は減少することがある。
- タイプ b... aと同じく、風化進行が施工直後より開始するタイプであるが、 一定期間経過しても勾配の減少や収束傾向が見られない。中古生代 の堆積岩に典型的である。

風化帯走時の経時変化から、次の知見を得る。

- 新第三紀堆積岩では吹付けコンクリートによる風化抑制期間は 50 ヶ月程度である。中古生層堆積岩では同期間が認められるものとそうでないものがある。
- 多くの地山風化進行は約100~200ヶ月経過後に収束傾向が認められる。
- 2.3 粘着力の低下のモデル化

2.3.1 基本方針

- 粘着力の低下のモデル化における基本方針は以下である。
 - 粘着力の低下を回帰曲線を用いてモデル化する。
 - これに対して、過去にスライドが発生した地点については、回帰曲線によって求められた減少傾向を用いてその整合性を検討する。
 - 未だにスライドが発生していない地点については、地盤の風化による劣化の

不確実性を考慮するため幾何ブラウン運動過程を用いる。

2.3.2 回帰曲線を用いたモデル化について

測定値より算定された地山の粘着力の値に対して指数近似を行い、粘着力の低下のモデル化を行う。粘着力の算定方法は第3章3.1に詳しく後述する。

2.3.3 幾何ブラウン運動過程を用いたモデル化について

粘着力の低下が、幾何ブラウン運動過程に従うと仮定して粘着力の低下のモデ ル化を行う。まず、幾何ブラウン運動過程について以下に示す。

幾何ブラウン運動過程は、金融工学の分野で主に用いられ、継続的な不確実性の影響を受ける長期的な変動を表す確率過程モデルである。例えば、株価、利率、 賃金率、生産高などの経済、金融に関する値をモデル化する際に用いられる。

ここでは、最も簡単な確率過程で離散的時系列過程であるランダムウォーク、 さらにランダムウォークの連続的な極限と考えられる連続的時系列過程のウィナ ー過程、ウィナー過程を一般化する事によって導かれる伊藤過程を経て、最終的 に伊藤過程の特別な形としての幾何ブラウン運動過程までの一連の導出方法を示 す。

離散的時系列過程ランダムウォークについて述べる。まず、時間 *t* とともに変化する変数の時系列 *Z*(*t*)を考える。時間 *t* は連続変数であるが、議論の簡易のため離散的時系列の不連続状態について考える。

Z(t)を無作為変数とし、値 Z(の)から開始し無作為に増減を繰り返すと考える。 t後の Z(t)の値は、Z(の)の影響は受けるがその他の値の影響は一切受けない。 また、他の時点の変化量とも無相関である。つまり、その増減の期待値はどの時 点 tにおいても 0 である。よって、各時点間の変化量を正規分布に従うと仮定す れば、長さ tの期間が N 期ある加法過程 Zを、k=0,1,2,...,N について以下のよ うに定義できる ³⁾。

$$Z(t_{k+1}) = Z(t_k) + \varepsilon(t_k) \sqrt{\Delta t}$$

$$t_{k+1} = t_k + \Delta t$$

$$\varepsilon(t_k) : 平均0で標準偏差1の正規分布に従うランダム変数$$

$$(2.5)$$

この過程をランダムウォークと呼び、式(2.5)から得られる式(2.6)において、 *t 0*として極限をとることにより連続的時系列過程への展開が可能となる。式 (2.7)で表される過程をウィナー過程と呼ぶ。

$$\Delta Z = \varepsilon(t_k) \sqrt{\Delta t} \tag{2.6}$$

$$dZ = \varepsilon(t_k)\sqrt{dt} \tag{2.7}$$

これに変動の傾向を表すドリフト率を加え、一般化すると以下となる。

$$dx = \mu dt + \sigma dZ$$

 $\mu : トレンド$ (2.8)
 $\sigma : ボラティリティ$

ここで、*Z*はウィナー過程、 μ と は定数、*x*は全ての *t*についての確率変数で ある。

さらに一般化してトレンドµとボラティリティ を現在の状態と時間の関数と し、a(x, t)、b(x, t)と仮定すれば式(2.9)が得られる。これを伊藤過程と呼ぶ。 dx = a(x,t)dt + b(x,t)dZ (2.9)

伊藤過程において、 *a*(*x*,*t*)を µ *x*、*b*(*x*,*t*)を *x* としたものが幾何ブラウン 運動過程である。

$$dx = \mu x dt + \sigma x dZ \tag{2.10}$$

2.3.4 幾何ブラウン運動過程の特性

幾何ブラウン運動過程に従う時系列 xの特性のうち以下の 2 点について述べる。
 ・時間経過に伴い時系列 xの不確実性は増す。

・時系列 x は常に非負である。

幾何ブラウン運動過程を模式的に図 2.4 に示す 4)。 Z は、平均値 0 および標準 偏差 1 の標準正規分布に従う確率過程であるため、時間軸上の太線で示す曲線が 平均的な変動 µxdxを表し、ある時間 t における平均的変動周りの変動 oxdZ は分散 が σ^2 となる正規分布に従うものとして表現される。この平均的変動周りの変動幅 は、非定常確率過程となることから、時間の経過に伴い拡大する特性を有する。 この時間経過とともに平均変動周りの変動が増加する特性を表現したものが、図 2.4 に示す破線であり、その曲線はそれぞれある時刻における(平均変動)±(その 時刻における標準偏差)を結んだものである。

また、式(2.9)の両辺を x で割ると以下の式(2.11)が得られる。

$$\frac{dx}{x} = \mu dt + \sigma dZ \tag{2.11}$$

つまり、 *x* の変化率である *dx/x* は正規分布に従い、 *x* の絶対変化量である *x* は 対数正規分布に従う事を意味する。つまり、 *x* は必ず 0 以上となり、幾何ブラ ウン運動過程で表される時系列は非負となる事が理解できる。

2.4 吹付けのり面の年スライド発生確率

吹付けのり面の健全性を評価する指標として定めた性能関数 *Q*のうち、その性 能低下を支配する変数を *x* とし、経過時間 t においてその特性が *x*(*t*)で表される とすれば、近似的に性能関数 *Q* は時間空間で連続な関数として表現可能となる。 変数 *x*(*t*)が確定量として、性能関数 *Q=0*となる経過時間を算定すれば、その時間 がのり面の余寿命に相当するものとなる。

変数 x の含む不確実性を考慮して、変数 x を確率変数としてモデル化すれば、 モンテカルロシミュレーションにより性能関数 Qの確率パスを算定することが可 能となる。結果、各確率パスにおける性能関数 Q=0 となる経過時間(以下、スラ イド発生時間と称す)tが算定される。この手順を繰り返すことにより、図 2.5(1)、 (2)の模式図に示すように性能関数 Q=0 となるスライド発生時間 t の頻度分布の ヒストグラム(あるいは図のような近似的な確率密度分布)が得られる。ここで、 単位時間間隔 tでのスライド発生時間が (ti)であれば、その単位時間において スライドが発生する確率は (ti)・ t となることから t=1 年とすれば、 (ti)が 経過年数 i に対する年スライド発生確率となる。

2.5 LCC の評価方法

現在、インフラ構造物の維持補修計画においては、効率的である事が求められ、 安定性及び補修による投資対効果を総合的に判断する必要性が広く認められてい る。その判断指標としてライフサイクルコスト(LCC)が提案されている。LCCの 定義は以下で表される⁵⁾。

$$LCC = C_{C} + C_{MT} + C_{O}$$

 $C_{C}; 建設コスト$
 $C_{MT}; 維持補修費用$
 $C_{O}; オペレーション費用$
(2.12)

この内、オペレーション費用の代表例としては、プロジェクトへの融資に対する返済額があげられ、維持補修費用には調査点検費が含まれている。

式(2.12)に示す LCC は、地震などの自然ハザードを始め、調査をしても避けられない予測不可能な出来事の影響、さらに限られたデータから将来予測を行わなければならない事などの不確実性要因を多く含む。この不確実性を考慮すれば、LCC の評価式は以下のように書ける⁶⁾。

$$LCC = C_{C} + C_{MT} + C_{O} + \Delta R$$

$$\Delta R = \Delta R_{C} + \Delta R_{MT} + \Delta R_{O}$$

$$\Delta R_{c}; 建設コストに関するリスクコスト$$

$$\Delta R_{MT}; 維持補修費用に関するリスクコスト$$

$$\Delta R_{o}; オペレーション費用に関するコスト$$

インフラ構造物のアセットマネジメントに関する研究分野では、主に維持補修 費用に関するリスクコスト *R_{MT}*のみが検討対象とされている⁷⁾。建設分野が対 象としているアセットマネジメントに関する研究の多くが、企画・調査・設計・ 施工・操業という一連の建設工事のフローの中で、特に操業段階つまり既設構造 物を対象としているためである。

本研究でも維持補修費用に関するリスクコストについてのみ考えることとし、 評価式は以下のように定義する。

$$LCC = C_M + \Delta R_M \tag{2.14}$$

したがって、LCCを考える時の焦点は維持補修リスクコストを定量的に評価する手法の構築となる。リスクの定義は、Benjamin と Cornellの定義に基づいて以下を採用する。

$$R = p \times C \tag{2.15}$$

式 (2.15) において、 *p* と *C* はそれぞれスライド発生確率と損失額を示しており、 数学的には *R* は期待損失を意味する。

以上のことから本研究における LCC の算定式は以下とする ⁶⁾。

$$LCC = \sum_{i=0}^{m} p_{ai} C_h \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^i + \sum_{i=1}^{N} I \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^i$$
i;供用後経過年数
$$p_{ai}; 年スライド発生確率 (2.16)
$$C_h; 崩壊時の損失額(復旧費用 + 迂回損失)$$
I;m年毎に発生する補修費用
$$\rho; 社会的割引率$$$$

式(2.16)に示すように、第 1 項は期待損失を表し、各年のスライド発生確率と 崩壊時の損失額の積を累積したものである。ただし、補修を行った後の崩壊は考 えないため、その累積は補修を行う m年目までである。第 2 項は補修費を表して いる。補修間隔であるm年毎に費用が計上され、それ以外の補修の行われない年 では発生費用は 0 として、算定期間で累積する。将来得られる毎年の維持補修費 用を割引率で割り引いて毎年の費用の現在価値として算定する。なお、LCC 算定 に当たり点検・調査費・清掃費・外部コスト(便益、環境コストなど)、デフレー タについては考慮しない。

将来の便益、費用を現在の価値で評価するために用いる社会的割引率をどう考 えるかについては、時間選好率(個人が合理的に行動すると仮定した場合に個人の 将来に対する選好態度を表す率)と考えることもできるし、利子率(ある資金を貯 蓄することによって得られる利子収入の割合)や投資収益率(何らかの民間部門の 生産手段への投資によって可能となる収益性の上昇率)と捉えることもできる⁸⁾。 社会的割引率が大きければ、時間選好率が高いことになり将来にわたる経済の不 確実性が高いことを意味する。つまり、経済成長の著しい発展途上国では高い値 をとり、将来的な価値を低く見る検討が行われる。一方、経済成長が安定期にあ る先進国においては比較的低い値をとるが、利子率など様々なことを視野に入れ て設定されるため各国によりその値はまちまちである。例えば、発展途上国であ るインドネシアでは政府は社会的割引率を12%としているが、先進国のドイツで は3%、アメリカでは7%の値が用いられている。日本の公共経済では4%と設定 されることが多い。これに準じて、本研究においても社会的割引率は4%と設定 する。

本研究のように、定期的に補修を行うようなモデル化において、補修間隔を変 えて LCC の計算を進めれば、LCC は図 2.6 のように累積されていく。例えば、 図 2.6 における LCC2 とは 2 年間隔で補修を行った場合の LCC の累積の様子を表

しており、2年でスライドの発生が見られない吹付けのり面においては図 2.6 に 示すように補修費用のみが計上されていく。図 2.7 は図 2.6 における経過年 50 年次の累積された LCC の値を比較したもので、横軸は補修間隔である。図 2.7 を 見れば図中のピンクの点において最も LCC の値が小さくなっている事から、この 最小の LCC を与える補修間隔を LCC 最小補修年間隔とし最適な維持補修計画を 立案する際のひとつの判断指標として採用する。LCC 最小補修年間隔の算定にお いて、吹付けのり面の性能低下の将来予測期間を 50 年と設定している場合は経 過年 50 年次の累積された LCC の値を比較しているが、将来予測期間を 100 年と 設定している場合には経過年 100 年次の累積された LCC の値について比較を行 い求める事とする。 3章 性能低下のモデル化における諸値の設定方法

実地盤への適用に際して、以下の値の設定が必要となる。

- ・地山の粘着力
- ・風化帯厚さ
- 幾何ブラウン運動過程のパラメータµ
- ・ 幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 過 程 の パ ラ メ ー タ
- 粘着力の低下が幾何ブラウン運動過程に従うと仮定した際のシミュレーションを行うための初期値
- そこで、本章ではこれらの設定方法について示す。
- 3.1 地山の粘着力

地山の粘着力は、調査により測定された値である一軸圧縮強度と地山の縦波弾 性波速度、超音波伝播速度を用いて算定する。

地山の粘着力の設定を行うにあたり、吹付けのり面の調査対象地があまりにも 多いため、一般に個々の斜面に対する調査の回数自体が極端に少なく、調査の行 われる間隔も一定ではないという問題点がある。しかし、吹付けのり面の性能低 下を評価する性能関数の各年の値を求めるにあたっては、各年の粘着力の値が必 要である。そこで本研究では、少ない粘着力のデータを用いて各年の粘着力の推 定を行う手法を提案する。本手法の妥当性については、実地盤への適用により検 証を行う。

地山の粘着力の算定および推定は、次の4段階で行う¹⁾。簡単にフローチャートで表したものが図 3.1 である。

1) 調査によって得られた一軸圧縮強度(コア)による粘着力 Coの算定を 行う。この場合の Coは風化の影響を受けていない地山の粘着力を意味 する。コアの一軸圧縮強度と粘着力 Coの関係は、図 3.2 に示す過去の 試験結果に基づき算定する ⁹⁾。一軸圧縮強度を qn とすれば、その関係 式は以下である。

$$C_0 = 10^{(0.9144 \times \log q_n - 0.6106)}$$
(3.1)

2) 各調査次における亀裂係数 Crの算定を行う。亀裂係数 Crは以下で

定義される 10)。

$$C_{r} = 1 - \left(\frac{V_{p}}{V_{p0}}\right)^{2}$$

 $V_{p};$ 地山の縦波弾性波速度 (m/s) (3.2)
 $V_{p0};$ 供試体の超音波伝播速 度(m/s)

各調査次の速度検層から求められた風化された地山の縦波弾性波速度 *Vp*と供試体の超音波電波速度 *Vp0*を用いて、亀裂係数 *Cr*を求める。 供試体の超音波電波速度 *Vp0*は、風化の影響を受けていないと考え られる深さ約 10*m*から採取した供試体を用いて測定する。

3) 各調査次の地山の粘着力の算定を行う。ステップ2で求めた亀裂係数 Crと粘着力の低減係数 Kcの間には図 3.3のような関係がある。 これより求められた亀裂係数 Crから、粘着力の低減係数 Kcを求める。粘着力の低減係数 Kcとステップ1で算定された粘着力 Coの間には式のような関係がある 9)。

$$C = K_c \times C_0 \tag{3.3}$$

この Cが、実際の地山の粘着力であると考える。

4) 推定された地山の粘着力 Cを、横軸を建設後の経過年 t、縦軸を粘着力 Cとしたグラフ上にプロットする。それらの点に対して指数回帰 を行い、指数回帰により求められた式を用いて各年の地山の粘着力の 値を推定し、安定性の計算を行う。

以上に従い求めた地山の粘着力の算定例として、対象地点のひとつである福井地点の結果を表 3.1 および図 3.4 に示す。福井地点においては、調査は建設後の供用年数 32 年間の間に 4 回(6 年、10 年、14 年、32 年)行われており、32 年目でスライドの発生は確認されていない。

3.2 風化帯厚さ

風化に伴う低速度帯範囲を風化帯厚さとする。本研究で対象としている地盤は、 表 3.2 よりその風化タイプは 型または 型である。風化タイプ 型と 型にお いて風化帯厚さは収束し、かつ風化帯厚さのピークは 300ヶ月以下にあることか ら考えて、将来の性能低下予測における性能関数では風化帯厚さは、現在の値を そのまま確定値として用いる事とする。設定の一例として、粘着力と同様に福井 地点の結果を図 3.5(1)、(2)に示す。図 3.5(1)には風化帯厚さを設定する際の概念 図を示し、図 3.5(2)には測定によって得られた各調査年次における風化帯厚さを プロットしそれらをつなげ連続量として考えたグラフを示す。

3.3 幾何ブラウン運動のパラメータµ

µの値を設定するために、2.3式(2.11)から以下の関係が導き出される。

$$E\{X(t)\} = X(0)e^{\mu t}$$
(3.4)

このことから、推定された粘着力に対し指数近似を行い、求められた式から、 各地点におけるそれぞれのトレンドµの値を求める。簡単にフローチャートで図 3.6 に示す。

注意すべき点は、 *t* は本来なら 1 から 100 へ *t*=1 で変化する値であるが、本 研究では幾何ブラウン過程を用いているため、0 から 1 へ *t*=0.01 で変化すると 考える。よって、 μ の値は指数近似の式の指数部分を 100 倍した値となる。

3.4 幾何ブラウン運動のパラメータ

不確実性のパラメータであるボラティリティ は、推定された粘着力の値から 次の段階を踏んで求める。このボラティリティ は、平均的変動率周りの変動特 性を表す指標で、実務では時間に依存しない定数とされ表現される。幾何ブラウ ン運動過程を市場価格の分野に用いるときには、一般的には過去の変動特性に基 づき算定されることが多く、この場合はヒストリカルボラティリティと呼ばれる こともある。本研究でも、このヒストリカルボラティリティと同じ考えを用いて 求めることとする。その設定方法を簡単にフローチャートで示したものが図 3.6 である。

- 3.1 で算定された粘着力を横軸に建設後の経過年、縦軸に粘着力をとってプロットする。それに対して線形補完を行う。線形補完により最新のデータがある年まで、一年毎の粘着力を推定する。
- 求めた一年毎の粘着力の自然対数をとる。N年目の粘着力をc_N、N+1年
 目の粘着力をc_{N+1}とすると、lnc_Nとlnc_{N+1}が求められる。この差をとって、

差分行列を作る。

3) その差分行列の標準偏差を求める。これをボラティリティ と設定する。

3.5 粘着力の低下のシミュレーションを行う際の初期値

幾何ブラウン運動過程を用いて現在以降の粘着力の低下をシミュレーションす る際には初期値の設定が必要となる。ここで粘着力の設定方法としては、2通り が考えられる。一つ目は、3.1 の粘着力の算定方法によって、測定値である一軸 圧縮強度と地山の縦波弾性波速度、超音波伝播速度から求められた値のうち最新 点検時の値を初期値とする考え方である。二つ目は、3.1 の粘着力の算定方法で 求められた粘着力に対して回帰曲線を引くことにより求められる最新点検時の粘 着力の値を初期値として扱うという考え方である。

本研究では二つ目の考え方を採用する事とする。仮に一つ目の考え方を採用し 予測スライド発生年までの算定を行えば、本研究で対象としている地点では、図 4.5 に示すように最新点検時において回帰曲線の値より実際の測定値が高いため、 実際にスライドが発生する時期よりもスライド発生年が遅く算定される可能性が あり、楽観的な見方をした結果が得られる事が考えられる。測定値から求められ た粘着力は測定誤差などの不確実性を含んでいることを考えれば、性能低下のモ デル化において不確実性を考慮したモデル化を提案するためには二つ目の考え方 が適していると考える。

4章 実地盤への適用及び考察

対象地点は 13 地点で、各地点における地質(堆積岩)、2.2 に示した風化タイプ、 スライド実績の有無そして最新点検時期については表 3.2 の通りである。表 3.2 をみると、すでにスライドの発生している地点と未だにスライドが発生していな い地点があることが確認できる。

そこで本章では、まず既にスライドの発生している地点に対して、第3章に示した設定方法を適用し、それに基づいて求められる風化帯厚さ・地山の粘着力の 算定及び推定結果を示す。その後に、それらの算定及び推定結果を性能関数に代 入することにより安定性評価を行い、その結果を示す。これは、第3章で示した 風化帯厚さの設定方法と地山の粘着力の算定・推定方法が、実際にどれほど現況 を反映しているのかを確認するためであり、安定性評価を行った結果を利用して 第3章に示した風化帯厚さと地山の粘着力設定方法の妥当性について考察を行う。

その後に、未だにスライドの発生していない地点に対して、本研究で提案する 幾何ブラウン運動過程を用いた吹付けのり面の性能低下の将来予測モデルを適用 した結果を示す。本研究では、地山の粘着力の低下が幾何ブラウン運動過程に従 うと仮定しており、これが研究の核となる部分である。

幾何ブラウン運動過程を用いたシミュレーション後、第1章にも示したように 最適な維持補修計画の立案のための判断指標となる LCC の算定を行い、LCC 最 小補修年間隔を導き出す。さらに、地盤への適用結果を考察することにより、幾 何ブラウン運動過程を用いた本モデル化の適用性について検証を行う。

4.1 既にスライド発生を確認したのり面への適用

対象地点である 13 地点のうち、既にスライドの発生を確認したのり面は 8 地 点である。それらに対して第 3 章に記した設定方法に基づいて風化帯厚さの設定 を行うと図 4.1(1)~(8)のようになった。各地点において、 20 年後付近まで経過 年の増加とともに風化帯厚さが増大し、それ以降は収束していることが確認され る。

次に粘着力の設定についてであるが、3.1のステップ1)から4)に従い算定及び 推定を行う。粘着力の算定には、実際の測定から得られた値を用いる。3.1 ステ ップ1にある一軸圧縮強度から算定される粘着力 *Co*とそれを与える一軸圧縮強 度の各地点における結果、及び 3.1 ステップ 2 に示す供試体の超音波伝播速度の 結果は表 4.1 に示すとおりである。

3.1 ステップ 2 に示すように、各調査次における地山の縦波弾性波速度を式(3.2) に適用することにより亀裂係数 *Cr*が算定され、表 4.1 に示した粘着力 *Co*ととも に式(3.3)に代入すると粘着力 C が推定される。地盤中の地山の縦波弾性波速度に 関しては、図 4.1(1)~(8)のそれぞれにある二つの図のうち左側の図に示す。図 3.5(1)凡例を参照すれば、風化に伴う低速度範囲を示す太線の上の範囲に示され た値が風化帯における地山の縦波弾性波速度である。

以上のように粘着力の各調査年次における算定を行った結果は表 4.2 のように なる。表 4.2 には各地点における調査年次と粘着力を記しており、この表に基づ いて粘着力を縦軸、経過年を横軸にとったグラフを作成し、粘着力の算定値に対 して回帰曲線を引けば図 4.2(1)~(8)となる。図 4.2 から時が経つにつれ粘着力が 低下する事が確認できるが、図 4.2(5)に示す笹子 1 と(7)に示す吉田 2 では異なる 傾向が見られる。笹子 1 においては最新点検時期の粘着力の値が飛びぬけて大き くなっているため、回帰曲線を用いて粘着力の変化を表すと結果的に増加曲線と なっている。粘着力が時の経過とともに増大していくことは考えにくいので、最 新点検時期の粘着力の値は測定ミスである可能性が考えられる。また、吉田 2 に おいては粘着力の算定値自体は若干の変化が見られるが、回帰曲線を用いるとほ ぽ一定の値となっている。実際には回帰曲線の式は y=0.2066e^{0.0046x}で、粘着力は ゆるやかに上昇していると近似されていることがわかる。これらの粘着力の変化 の傾向が安定性評価を行う際にどのような影響を与えるかについては、性能関数 の結果を示した後に考察を加えることとする。

風化帯厚さ、粘着力の設定結果を式(2.2)に示したパラメータを確定値とした性 能関数に代入したところ図 4.3(1)~(8)のような結果が得られた。これを見ると各 地点とも、性能関数の値は風化帯厚さの値の挙動と非常に似た変化を示すことが 確認できる。風化帯厚さが増大すると性能関数の値は減少しており、また、粘着 力、風化帯厚さともに時間が経つに従い収束するため、それらの収束とともに性 能関数の値も収束する傾向がある。粘着力の変化が増加曲線となっていた笹子 1 と吉田 2 において性能関数の変化の様子に着目すると、粘着力は増大しているが それ以上に風化帯厚さの増大の影響を受けて性能関数は減少していることが確認 される。全地点において時の経過とともに性能関数の値が減少しており、吹付け

のり面の性能低下が表現されていることが確認できる。さらに、この性能関数の 減少傾向について考察を行うために、予測スライド発生年を算定する。図 4.3 の ように性能関数は時間の経過とともに減少し、0以下となる。性能関数が0のと きスライドが発生することから、性能関数が0となる時の経過年を予測スライド 発生年として表 4.3 にまとめた。表 4.3 の地点名の横の括弧内に示す実際のスラ イド発生年次と比較を行えば、8 地点中3地点で実際のスライド発生年と算定さ れた予測スライド発生年が非常に近くほぼ一致していることが確認できる。その 他の5地点について以下に考察を行う。

まず、白河3であるが、予測スライド発生年に比べ実際のスライドが非常に早 い時期に生じていることがわかる。実際のスライド発生は吹付けのり面建設の5 年後であるが、2.2の最後に示したように白河3のような新第三紀堆積岩におい ては、通常吹付けコンクリートの密閉期間は約50ヶ月である。この事から考え ると、白河3におけるスライド発生は吹付けコンクリートの密閉期間終了直後で あり、その要因は、背面地山の風化による粘着力の低下ではなくほかの要因であ る可能性が高いといえる。よって、白河3の吹付けのり面の性能低下に対し、本 モデル化の適用は不可能であると考える。算定結果よりも実際のスライド発生年 が非常に早く、地質は新第三紀であることから、同じことが吉田2にも言える。 これら2地点のように本モデル化で性能低下が評価できないのり面に対処するた めには、全のり面に対して、建設後、吹付けコンクリートの密閉期間が終了する 50ヶ月前後を目安に詳細点検を行い、異常が確認された場合には補修を行うこと などの対策が考えられる。このように評価できないのり面は存在するが、現在あ る吹付けのり面の大半は既に建設後5年以上経過していることから、運用面に対 する本モデル化の適用性に問題はないと考える。

次に、鹿沼1についてであるが、実際のスライド発生時期よりもかなり遅く予 測スライド発生年が算定されていることが表 4.3 より読み取れる。表 4.1 の鹿沼 1の一軸圧縮強度を見ると 32164.96kN/m²という非常に高い値となっていること から、これが原因で実際よりも粘着力が高く推定され算定結果と実績が整合しな いと考えることができる。よって、これを解決するためには、試験対数を多くす ることにより測定値の誤差を解消すればよい。

次に笹子1について考察を行う。粘着力の結果の考察においても触れたように、 笹子1地点で測定値より算定された粘着力に対する回帰曲線は増加関数となって

いる。これは、吹付けのり面建設直後の時点における粘着力が、実際の粘着力よ り低く推定されており、そのため予測スライド発生年が実際よりも早く算定され たと考えることができる。よって、笹子1に対しても鹿沼1と同様に試験対数を 増やし測定誤差を解消することができれば整合する結果を得られると考える。

最後に勝沼であるが、これは今まで述べてきたどの事例とも一致しない。性能 関数の変化の様子をみると、図 4.1(6)に示すように風化帯厚さの増加に伴い性能 関数の値が急激に低下しており、実際のスライド発生年よりも予測スライド発生 年が早くなっている。実績と算定結果の値の隔たりが大きい原因は不明であるが、 予防保全という観点から見れば実績よりも算定結果が早い時期であるという点で は、ある程度整合性があるのではないか、と考える。

以上より、対象とした 8 地点中、本モデル化の適用外である白河 3 と吉田 2、 また計測結果に明らかなミスが確認できる鹿沼 1 の 3 地点を除けば、5 地点中 3 地点で実績と算定結果がほぼ一致し、2 地点において一致しなかったと結論づけ られる。

以上より、3.1 に示した手順に従い推定された粘着力の値に対して、回帰曲線 を用いることで粘着力の低下をモデル化する本手法は、未だ改善の余地はあるも のの吹付けのり面の安定性評価を行う上では十分にその役割を果たしていると考 えることができる。

また、3.1 に示した風化帯厚さの設定方法に関しても同様に妥当性を確認できたと考える。

4.2 未だにスライド発生を確認していないのり面への適用

現在、必要性が高まりつつあるものは劣化の進んだ吹付けのり面に対する最適 な維持補修計画立案であり、その対象となるものは本節で取り扱う未だにスライ ドの発生していないのり面である。そこで、未だにスライドの発生していないの り面に対して、本研究で提案する不確実性を考慮した性能低下のモデル化を適用 する。不確実性の評価は幾何ブラウン運動過程を導入することにより行う。そこ で、対象となっている13地点のうち、未だにスライド発生の確認されていない5 地点については、各地点について行われた最新点検時以降について幾何プラウン 運動過程を用いた将来予測のモデル化を適用する。このモデル化においては、表

層崩壊モデルの適用、性能関数の設定、風化帯厚さの設定及び粘着力の算定・推 定方法などはこれまでと同じである。新しい点は、変数である風化帯厚さと地山 の粘着力に関して以下のような考え方を用いる点である。

風化帯厚さ

各地点における点検時期を示した表 4.4 から、最新点検時は紫波 1 で 384 ヶ月 後、白河 1 で 372 ヶ月後、笹子 2 で 348 ヶ月後、笹子 3 で 324 ヶ月後、福井 1 で 384 ヶ月後である。2.2 の最後にまとめたように、多くの地山風化進行は約 100 ~ 200 ヶ月経過後に収束傾向が認められる。この事から考えて風化帯厚さは既に 収束していると考えることができ、将来予測のモデル化を適用する際は最新点検 時以降についてモデル化を行う事から、風化帯厚さの値は確定値として問題がな いことが確認される。つまり、各地点において設定された風化帯厚さの結果であ る図 4.4(1)~(5)において、赤点で示された値を本モデル化においては確定値とし て安定性評価に用いる。以上より、吹付けのり面の安定性の将来予測における変 数は地山の粘着力のみと考えることが可能となる。

地山の粘着力

5 地点における地山の粘着力の算定値は表 4.5 であり、それを基に横軸に経過 年次、縦軸に粘着力をとり作成したグラフに対し回帰曲線を引けば図 4.5(1)~(5) となる。3.3 に示したように粘着力の算定値に対する回帰曲線の式から求められ る幾何ブラウン運動過程のパラメータであるµの値と 3.4 に記した手法により求 められる の値の算定結果は表 4.6 となり、算定されたパラメータµと を用い ることにより、地山の粘着力の低下が幾何ブラウン運動過程に従うときのシミュ レーションを各地点について行えば、図 4.6(1)~(5)に示す結果となった。

以上 、 の結果を性能関数 Q に代入した安定性評価の結果を図 4.7(1)~(5) に示す。

実地盤に適用した算定結果に対して、考察を行う。

先ほども述べたとおり、風化帯厚さは一定と考えるため性能関数内の変数は粘着力のみと考えることができる。実際、図 4.7 に示した性能関数の変化と図 4.6 に示した粘着力の変化の様子は非常に似ており、 で行った幾何ブラウン運動過 程を用いたシミュレーションのパラメータである μ と の影響は性能関数によく 表れていることが確認できる。例えば図 4.6(3)笹子 2 では、いったん増えた変動

幅 は 粘 着 力 が 0 に 近 づ く に 連 れ て 急 激 に 狭 ま っ て い る 。 こ れ は 幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 過程の性質を反映したものであるが、この変化の形と図 4.7(3)の形はほぼ一致し ている。つまり、性能関数の値の変動幅と変動の傾向は幾何ブラウン運動のパラ メータのボラティリティ とトレンドµに支配されている。一般にボティリティ が大きいほうが変動幅は大きくなるが、図 4.6(1)紫波 1 と図 4.6(5)福井を比較 すればボラティリティ が 0.11の紫波と 0.30の福井の変動幅には一見大きな違 いは見られない。これは、トレンドμに着目することにより理解できる。表 4.6 にあるように紫波のトレンドμが-3.2 であるのに対して福井のトレンドμは - 6.51 である。これは、ボラティリティ の値が大きくてもトレンドµの値が大 きければ、結局は傾きに引っ張られるようにして変動幅は狭くなる事を意味して いる。このように計算結果に見られる変動幅の大小は、ボラティリティ のみで 評価することはできず、ボラティリティ とトレンドµの相互的な関係により決 定づけられる。ボラティリティ とトレンド μ は過去の測定値から求められた値 である事を考えれば、上で述べた事は、本モデル化における性能関数の挙動は過 去の測定値の影響を多分に受けている、と言い換えることもできる。つまり、モ デ ル 化 の 精 度 向 上 の た め に は 過 去 の 測 定 値 の 精 度 向 上 が 必 要 で あ る と 言 え る 。

性能関数 Qが 0 となる時の経過時間 t を予測スライド発生年とすることから、 2.4 に基づき図 4.7(1)~(5)から予測スライド発生年の頻度分布を求めた。その結 果が図 4.8(1)~(5)であり、このスライド発生年の頻度分布から年スライド発生確 率の算定を行った結果は表 4.7(1)~(5)のようになる。図 4.8 をみると(2)白河 1 と(3)笹子 2 の予測スライド発生年はおおきな幅を持っていることが確認できる。 これは、図 4.7(2)、(3)を見れば容易に理解できる。性能関数の値の持つ変動幅が、 そのまま予測スライド発生年の変動幅に反映されているのである。また、すでに スライドの発生が確認されているのり面に対して行ったように回帰曲線を用いた モデル化を未だにスライドの発生が確認されていない地点に対しても適用しその 結果を比較して表 4.8 にまとめた。回帰曲線を用いたモデル化は言い換えればト レンドのみを用いたモデル化といえる。例えば、図 4.8(4)笹子 3 は整った形をし ており、予測スライド発生年が正規分布をしていると仮定することができる。図 4.8 より中央値は 56 年と読み取ることができ、表 4.8 からトレンドのみを用いた モデル化ではスライド発生年は 54 年次と算定されていることが確認できる。こ れは、本モデル化で導入した幾何ブラウン運動過程における乱数は 2.3.2 に示す

ように標準正規乱数としているためであると考えられる。他の地点についても、 図 4.8 および表 4.9 から同様のことが読み取れる。

スライド発生確率の結果を用いて、2.5 に従い LCC の算定を行い、LCC 最小補 修 年 間 隔 を 求 め た 。 LCC 算 定 結 果 と LCC 最 小 補 修 年 間 隔 の 算 定 結 果 を 示 し た も のが図 4.9 である。図 4.9 と表 4.9 とから、算定された LCC 最小補修年間隔は回 帰 曲 線 を 用 い て 求 め ら れ る 予 測 ス ラ イ ド 発 生 年 よ り も 若 干 早 い 時 期 で 、 か つ 幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 過 程 を 用 い て 算 定 し た 予 測 ス ラ イ ド 発 生 年 に 対 し て は 中 央 値 よ り も 少 し 早 い 時 期 と な っ て い る こ と が 確 認 で き る 。 例 え ば 紫 波 1 で は 、 L C C 最 小 補 修 年間隔は11年と算定されている。回帰曲線を用いるモデル化によって算定され る 予 測 ス ラ イ ド 発 生 年 は 13 年 、 幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 過 程 を 用 い る モ デ ル 化 に よ っ て 算 定 さ れ る ス ラ イ ド 発 生 年 は 10 年 ~ 18 年 で あ る 。LCC の 定 義 式 で あ る 式 (2.16) を見ても分かるように、LCCが最小となるためには壊れる直前に補修を行えばよ い。よって、紫波1で得られている結果は LCC の定義から言えばこの LCC 最小 補修年間の算定結果は妥当な結果であるといえる。白河1に関しても同様に比較 を 行 え ば 、 L C C 最 小 補 修 年 間 隔 は 36 年 で あ る の に 対 し て 、 回 帰 曲 線 を 用 い る モ デ ル 化 に よ っ て 算 定 さ れ た 予 測 ス ラ イ ド 発 生 年 の 値 は 45 年 、 幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 過程を用いるモデル化によって算定される予測スライド発生年は25年~70年で ある。 25 年 ~ 70 年という大きな幅を持つ予測結果ではあるが、紫波 1 と同じ考 え 方 を す れ ば 、 白 河 1 に 関 し て も LCC 最 小 補 修 年 間 隔 の 算 定 結 果 は 妥 当 で あ る といえる。このような考え方の基では、モデル化を適用し算定を行った5地点中 4 地 点 に つ い て L C C 最 小 補 修 年 間 隔 の 算 定 結 果 は 妥 当 な 結 果 で あ る と 言 え る 。 笹 子 3 のみは算定された LCC 最小補修年間隔が 46 年で、幾何ブラウン運動過程を 用いたモデル化で算定される予測スライド発生年である48年~66年内ではない。 しか し そ の 差 は わ ず か で あ り 、予 測 ス ラ イ ド 発 生 年 よ り も LCC 最 小 補 修 年 間 隔 の 方が早いことから、LCC 最小補修年間隔の結果の妥当性を疑うものではないと判 断 す る 。 よ っ て 、 本 研 究 で 提 案 し た 吹 付 け 工 の 性 能 低 下 の モ デ ル 化 に よ り 導 き 出 される LCC 最小補修年間隔は対象とした 5 地点中、全地点で妥当な値であり、 本 モ デ ル 化 は 最 適 な 維 持 補 修 計 画 の 立 案 に 際 し て 判 断 指 標 を 提 供 す る 点 に お い て 有用性をもつことが確認できた。

さらに安全率という観点から考察を進めるために、算定された LCC 最小補修年 間隔における安全率の頻度分布をヒストグラムとして表した。その平均値を調べ

たところ、その結果は図 4.10(1)~(5)のようになり安全率の平均値は表 4.9 に示 すような値となった。表 4.9を見れば分かるように安全率が1よりも大きくその 差 も 小 さ い こ と か ら 、 算 定 さ れ た LCC 最 小 補 修 年 間 隔 は 対 象 と し た 5 地 点 全 て において、破壊する直前に補修を行うという理想的な状況に近い算定結果である ことが確認できる。また、図 4.10 に示す安全率の頻度分布と図 4.6 に示す幾何ブ ラウン 運動 過程を用いた粘着力の将来予測結果の関係について考察を行えば、笹 | 子 2 や 福 井 と い っ た 粘 着 力 が 0 に 近 づ く に つ れ て グ ラ フ の 変 動 幅 が 狭 ま っ て い く ような地点においては、安全率の算定結果において全体の形に着目したとき、左 側によっている印象を受ける。これは、変動幅が狭まるに連れて、平均値以下の 範 囲 に お い て は 幾 何 ブ ラ ウ ン 運 動 過 程 の 式 中 に 含 ま れ る 乱 数 の 動 き が 制 限 さ れ て い く が 、 平 均 値 以 上 の 範 囲 に お い て は 乱 数 の 動 き は 制 限 を 受 け な い た め で あ る と 考え、これらのグラフ全体の形の歪みに関して問題はないと考える。さらに、図 4.10 に示される安全率のもつ幅について考える。例えば紫波1であれば、安全率 の 最 小 値 が 約 0.98 で あ る の に 対 し 最 大 値 は 約 1.12 で そ の 差 は お よ そ 0.14 と 言 っ た小さいものであるが、笹子2においては安全率の最小値は約0.8であるのに対 して最大値は約2であり、その差は1.2という大きな値になっている。この安全 率 の 最 大 値 と 最 小 値 の 幅 は 、 表 4.6 に 示 す 各 地 点 の ボ ラ テ ィ リ テ ィ の 値 と 関 係 し ていると考えられる。幅が大きいほど不確実性を含んでおり、予測された値への 信頼性は低いと考えられるが、測定値を用いてボラティリティを随時更新してい けばボラティリティは小さい値となり信頼性は高くなると推測される。

第5章 結語及び今後の課題

5.1 結語

本研究において提案したモデル化は、これまで力学的に安定性を評価すること が難しかった背面地山の風化に伴い発生するスライド現象に対し、粘着力の低下 に着目することにより性能低下の評価、さらに吹付けのり面の性能低下の将来予 測を行う事を可能にした。モデル化を確立することにより、安定性および経済性 に基づく定量的な LCC 評価を行うことを可能となり、その LCC 評価が最適な維 持補修計画の立案を行う際の判断指標として十分な有用性があるかについて、実 地盤に対し提案したモデル化を適用することにより確認した。本モデル化がこれ までのモデル化と大きく違うところは、性能低下の将来予測を行う際に必ず問題 となる不確実性に対処するために幾何ブラウン運動過程をモデルに導入し、その 不確実性を可視的に評価したところである。幾何ブラウン運動過程を用いること により、それまで漠然と捉えていた不確実性を理解しやすい形で表現できるよう になった。

本モデル化は以下のような利用方法が考えられる。例えば、今回対象としたような吹付けのり面は、全国各地に散らばって存在している上に数自体が非常に多いため、安定性評価を行うための性能関数に含まれる物性値を各のり面に対して 計測を行うだけで莫大な資金が必要となる。検査コストには予算の制限がつくこ とは避けられないことであるから、実地盤に対して最適な維持補修計画を立案す るためには、本モデル化で求めた LCC 最小補修年間隔を利用して、その値が小さ い地点から優先的に検査を行うなどの対策をとることもできる。

今後、さらにインフラ構造物の維持補修の必要性が高まりアセットマネジメントの重要性が増すことは明らかである。本モデル化の精度をさらにあげ、より信 頼性を持った将来予測を行うことが必要である。

5.2 今後の課題

課題として挙げられることは、将来予測の精度向上のためにはどうすればいいか、ということである。精度向上のためには、例えば予測スライド発生年の幅を

小さくすることなどが考えられる。本モデル化における重要な値であり、算定結 果のばらつきを支配しているのは幾何ブラウン運動過程で用いられるパラメータ µと である。 がヒストリカルボラティリティと呼ばれるように、その2つの 値は過去の計測結果に基づき算定される。よって、精度向上のためには、µと の値がより現状を示すのに適した値となるよう事が必要である。現状を反映した 値にするためには、各斜面に対して物性値の計測を継続的にかつ定期的に行えば よい。なぜなら、計測量が増加するに連れて、µや のモデル化に伴う現状との ずれは全般的に減少するものと解釈されるからである。その他の方法としては、 粘着力の低下のシミュレーション数を増やす、あるいは本研究では幾何ブラウン 運動過程において *t*を 0.01 あるいは 0.02 としていたがそれをさらに小さな値 にしてシミュレーションを行うことによって、年スライド発生確率は精度高いも のになり、その結果本モデル化の精度向上につながると考えられる。

参考文献

- 日本道路公団試験研究所:切土のり面構造物の維持補修計画の精度向上に 関する検討,2005.
- 2) 松山裕幸,山本高司,田上雅彦,川久保昌平:吹付けコンクリートの安定性と 劣化状況,土木学会論文集,2005(投稿中).
- 3) 小林潔司:リアルオプション:数学的基礎,建設マネジメントを考える,pp.179-196,2001.
- 4) 大津宏康,尾ノ井芳樹,大西有三,足立純:PFI プロジェクトの地盤に起因する建設コスト変動評価に関する研究,土木学会論文集, 777/-65,pp.175-186,2004.
- 5) Ohtsu,H.:Slope/Embankment Management,AIT-Kyoto University Joint Summer School in Hanoi -Road Infrastructure Asset Management Course-,Text,p.9,2005.
- 6) 大津宏康,松山裕幸,Nutthapon Supawiwat,高橋健二:斜面対策工の性能
 低下過程の不確実性考慮した LCC評価,土木学会論文集,2005(投稿中).
- 7) 大津宏康:アセットマネジメント概論(2),建設マネジメントを考える,pp.25-33,2005.
- 8) 道路投資の評価に関する研究委員会:道路投資の評価に関する指針(案),日本総合研究所,1998.
- 9) 応用地質学会,岩盤分類,応用地質特別号,p.105.
- 10) 日本道路公団,設計要領第二集,第 6 編橋梁下部構造・仮設構造
 物,pp.6-117.

謝辞

本研究に取り組んだこの一年は、非常に貴重な一年でありました。学問と真剣 に向き合うことの大変さについて身をもって感じると同時に、周りの方の暖かな 目に見守られていると実感する日々でした。

京都大学大学院工学研究科教授大津宏康先生には、遅遅として進まない筆者の 研究に対し根気強く助言を頂き、行き詰る度に打開の糸口を示していただきまし た。熱心にご指導頂きましたことを心から感謝致します。

京都大学大学院工学研究科教授大西有三先生には、すばらしい研究環境を与え て頂きましたこと、深く感謝致します。一年間を大西研究室で過ごせた事はとて も幸せでした。

京都大学大学院工学研究科助教授西山哲先生、京都大学大学院工学研究科助手 上原真一先生、京都大学大学院工学研究科技官矢野隆夫氏、伊藤榮利子秘書には、 研究のみならず様々な面でご指導・ご協力いただき深く感謝しております。

また、京都大学大学院工学研究科境亮祐氏、坂井一雄氏には、研究で壁にぶつ かった時など筆者の相談に乗って頂き、数え切れないほどのご支援をいただきま した。本当にありがとうございました。

調査次数	1次	2次	3次	4次
経過年数	5.8	9.5	14.3	31.5
V _{p0} (km/s)	2.08	2.08	2.08	2.08
V _p (km/s)	1.8	1.9	0.6	1.1
C _r	0.25	0.17	0.92	0.72
K _c	0.41	0.55	0.04	0.08
C ₀ (kN/m ²)	549.16	549.16	549.16	549.16
C(kN/m ²)	224.57	304.00	20.59	42.17

表3.1 福井地点の粘着力の算定結果

・供試体の超音波伝播速度V_{p0}は調査次数4で得られている値を用いる。 ・粘着力c₀はコアの一軸圧縮強度から算定した値を用いる。

地点名	スライド実績の有無	地質	風化タイプ
紫波1	なし(32年次)	新第三紀	
紫波2	あり(14年次)	新第三紀	
白河1	なし(31年次)	新第三紀	
白河3	あり(5年次)	新第三紀	
白河5	あり(7年次)	中世代変成岩	
鹿沼1	あり(19年次)	中世代	
笹子1	あり(17年次)	中世代	
笹子2	なし(29年次)	中世代	
笹子3	なし(27年次)	中世代	
勝沼	あり(27年次)	中世代	
吉田2	あり(6年次)	新第三紀	
福井	なし(32年次)	新第三紀	
和歌山1	あり(13年次)	中世代	

表3.2 各地点の地盤データ

表4.1 各地点における粘着力の推定に必要な諸値の算定結果

地点	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	超音波伝播速度 V _{p0} (km/s)	粘着力 C ₀ (kN/m²)
紫波2	735.48	1.26	147.10
白河3	2863.47	2.45	529.55
白河5	1588.64	4.40	304.00
鹿沼1	32164.96	5.80	4805.13
笹子1	1765.15	4.11	333.42
勝沼	2647.73	3.10	490.32
吉田2	3069.40	2.35	558.96
和歌山1	3863.72	3.05	696.25
(1)紫波2

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
1	143.36
3	40.60
9	15.20
14	11.08
27	20.20

(3)白河5

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
5	9.81
7	10.89
13	10.10
18	10.49
31	10.49

(5)笹子1

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
4	13.63
6	18.93
17	14.51
30	50.01

(7)吉田2

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
6	20.00
10	20.00
17	25.30
36	22.85

(2)白河3

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
5	37.66
7	19.91
13	19.91
18	26.97
31	19.91

(4)鹿沼1

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
6	191.90
8	178.469
14	151.21
19	158.86

(6)勝沼

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
0	46.09
1	40.50
3	28.63
9	16.47
27	19.47

(8)和歌山1

調査年次(年)	粘着力(kN/m ²)
5	25.60
8	27.46
13	22.26
18	24.81
30	20.79

地点名(スライド発生年次)	予測スライド発生年
紫波2 (14年次)	12年次
白河3 (5年次)	27年次
白河5 (7年次)	8年次
鹿沼1 (19年次)	50年次以上
笹子1 (17年次)	3年次
勝沼 (27年次)	9年次
吉田2 (6年次)	50年次以上
和歌山1 (13年次)	16年次

表4.3 予測スライド発生年算定結果

表4.4 各地点における点検時期

地点名	点検時期(年)
紫波1	6.8.14.19.32
紫波2	1.3.9.14.27
白河1	5.7.13.31
白河3	5.7.13.18.31
白河5	5.7.13.18.31
鹿沼1	6.8.14.19
笹子1	4.6.17.30
笹子2	3.5.11.16.29
笹子3	1.2.4.9.14.27
勝沼	0.1.3.9.27
吉田2	6.10.17.36
福井	6.10.14.32
和歌山1	5.8.13.18.30

(1)紫波1

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
6	80.02
8	49.81
14	16.77
19	22.75
32	29.22

(2)白河1

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
5	273.39
7	56.48
13	39.42
31	70.90

(3)笹子2

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
3	484.91
5	1860.20
11	33.93
16	33.93
29	243.39

(4)笹子3

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
1	66.09
2	70.41
4	70.41
9	52.07
14	48.05
27	56.78

(5)福井

調査年次(年)	粘着力(kN/m²)
6	224.57
10	304.00
14	20.59
32	42.17

地点	トレンドµ	ボラティリティ
紫波1	-3.20	0.11
白河1	-2.37	0.22
笹子2	-5.86	0.54
笹子3	-0.99	0.03
福井	-6.51	0.30

表4.6 各地点における幾何ブラウン運動過程のパラメータである トレンドµとボラティリティの算定結果

(1)紫波1

経過時間(年)	年スライド生起確率
10	0.011
11	0.074
12	0.240
13	0.348
14	0.216
15	0.088
16	0.021
17	0.001
18	0.001

(2)白河1

経過時間(年)	年スライド生起確率
28	0.002
29	0.001
30	0.001
31	0.003
32	0.007
33	0.012
34	0.014
35	0.016
36	0.032
37	0.040
38	0.044
39	0.044
40	0.071
41	0.067
42	0.051
43	0.062
44	0.061
45	0.064
46	0.052
47	0.047
48	0.062
49	0.041
50	0.038
51	0.034

経過時間(年)	年スライド生起確率
52	0.033
53	0.027
54	0.018
55	0.013
56	0.009
57	0.009
58	0.008
59	0.004
60	0.007
61	0.001
62	0.000
63	0.001
64	0.002
65	0.001
66	0.000
67	0.000
68	0.001

(3)笹子2

経過時間(年)	年スライド生起確率
14	0.002
15	0.014
16	0.030
17	0.047
18	0.057
19	0.086
20	0.086
21	0.083
22	0.073
23	0.091
24	0.076
25	0.080
26	0.065
27	0.047
28	0.046
29	0.030
30	0.026
31	0.017
32	0.011
33	0.009
34	0.007
35	0.005
36	0.005
37	0.004

経過時間(年)	年スライド生起確率
38	0.001
39	0.001
40	0.000
41	0.000
42	0.001

(4)笹子3

(5)福井

経過時間(年)	年スライド発生確率
49	0.004
50	0.008
51	0.030
52	0.044
53	0.064
54	0.123
55	0.132
56	0.160
57	0.163
58	0.101
59	0.079
60	0.048
61	0.021
62	0.011
63	0.011
64	0.000
65	0.001

経過時間(年)	年スライド発生年
10	0.001
11	0.018
12	0.081
13	0.179
14	0.244
15	0.200
16	0.130
17	0.083
18	0.041
19	0.012
20	0.007
21	0.003
22	0.000
23	0.001

表4.8 各地点における回帰曲線によるモデル化と 幾何ブラウン運動過程によるモデル化の 予測スライド発生年の算定結果の比較

地点	回帰曲線による モデル化の算定結果	幾何ブラウン運動過程 によるモデル化の算定結果
紫波1	13年次	10年次~18年次
白河1	43年次	28年次~68年次
笹子2	21年次	14年次~42年次
笹子3	54年次	49年次~65年次
福井	14年次	10年次~23年次

表4.9 各地点における中央安全率

地点名	中央安全率
紫波1	1.05
白河1	1.15
笹子2	1.25
笹子3	1.08
福井	1.08



図2.1 表層崩壊モデル概念図



図2.2 風化帯走時 - 経過時間曲線







図2.3 風化帯走時 - 経過時間の模式図



図2.4 幾何ブラウン運動過程の模式図











図2.6 補修年間別のLCCの累積



図2.7 補修年間の違いによるLCCの比較



図3.1 粘着力推定のフローチャート



図3.2 一軸圧縮強度と粘着力の関係



図3.3 亀裂係数Crと粘着力の低減係数Kcの関係



図3.4 福井地点の粘着力の低下曲線



(1)風化帯厚さの設定概念図



図3.5 福井地点の風化帯



図3.6 トレンド及びボラティリティの設定手法



(1)紫波2





(2)白河3





図4.1 風化帯厚さの設定結果



(6)勝沼

図4.1 風化帯厚さの設定結果





2 3 5 1 4 0.0 0.60 0.85 0.55 1.0 0.95 0.39 1.00 2.0-1.30 3.0 0.80 0.83 0.60 2.00 4.0 1.20 1.04 5.0

(7)吉田2



(8)和歌山1

図4.1 風化帯厚さの設定結果



(5)笹子1

(6)勝沼

図4.2 粘着力の算定結果



図4.2 粘着力の算定結果









(2)白河3





(4)鹿沼1







図4.3 性能関数Qの算定結果





(1)紫波1





(2)白河1

図4.4 風化帯厚さの設定結果



経過年

(4)笹子3

2.5

図4.4 風化帯厚さの設定結果



図4.4 風化帯厚さの設定結果



図4.5 粘着力の算定結果



図4.6 幾何ブラウン運動過程を用いた粘着力の将来予測



図4.7 安定性評価の結果



図4.8 予測スライド発生年の結果



図4.9 LCC及び最小補修年間隔の算定結果


安全率

(4)笹子3

安全率



図4.10 最小補修年間隔における安全率の算定結果