

地質条件に着目したグラウンドアンカー工の
維持補修計画に関する研究

平成 23 年 2 月 23 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

木 許 翔

要旨

本研究では，斜面对策工の一つであるグラウンドアンカー工の性能低下を斜面の地質毎に定量的に予測し，維持補修計画を立案する手法を提案する．具体的には，グラウンドアンカーが打設されている斜面の地質条件を考慮し，健全度評価区分に基づく点検結果を地質毎に分類する．そして，確率過程としてのマルコフ過程を用いて，グラウンドアンカーの経時的劣化を地質毎にモデル化する．また，得られたモデルを用いた解析結果と実際の点検結果の比較を行い，本モデルの妥当性を検証する．さらに，本モデルによる将来状態の予測結果に基づいて，本モデルに補修・補強を表現するモデル手法を適用し，ライフサイクルコストを判断指標として，地質毎に維持補修の優先順位や，補修・予防保全の効果について検討する．そして，地質によりアンカーの性能低下過程が異なる要因について考察を行う．

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 既往の研究との関連	2
1.4 本論文の構成	3
第 2 章 目視点検結果の地質毎の分類	4
2.1 グラウンドアンカーと点検結果	4
2.1.1 グラウンドアンカーの種類	4
2.1.2 グラウンドアンカーの点検結果の形式	4
2.1.3 グラウンドアンカーの点検結果の分析	5
2.2 対象路線の地質	6
2.3 分類する地質の種類	8
2.4 点検結果の地質毎の分類	8
第 3 章 マルコフ過程を用いた維持補修計画	9
3.1 マルコフ過程を用いた維持補修計画の概要	9
3.2 マルコフ過程を用いた性能低下のモデル化	10
3.3 最適推移確率行列の同定手法	12
3.4 維持補修計画の立案	14
3.5 維持補修計画の最適化	14
3.5.1 LCC 評価の概要	14
3.5.2 LCC の定式化	15
第 4 章 維持補修計画のグラウンドアンカーへの適用	17
4.1 推移確率行列の同定	17
4.2 点検結果と解析結果の比較	17
4.3 補修戦略の設定	17
4.4 LCC 算定	18

4.5 考察	19
4.5.1 解析結果に対する考察	19
4.5.2 LCC 算定結果に対する考察	22
4.5.3 地質によるグラウンドアンカーの性能低下特性に関する考察	24
第 5 章 結論	27
5.1 本研究の成果	27
5.2 今後の課題	28
参考文献	29
謝 辞	30

第1章 序論

1.1 本研究の背景

我が国の道路，橋梁，港湾等に代表されるインフラ構造物は，高度経済成長期に急速に整備が行われてきた．現在，それらの構造物は長期の供用により劣化が顕在化してきており，補修の必要性が指摘されている場合が多い．また，今後さらに老朽化した構造物が増加する反面，長期の景気低迷や少子高齢化に伴う公共投資縮減といった厳しい予算制約が課されることが予想されるため，効率的なインフラ構造物の維持補修計画を立案することが求められている．そこで，インフラ構造物を資産(アセット)として捉え，中長期的な維持・補修・更新に関して工学的知識にビジネス感覚および経済的観点を加え，構造物の安全性を確保するとともに利用者便益を最大化するための戦略的な意思決定手法として，アセットマネジメントが注目されている．そして，このアセットマネジメントの観点からインフラ構造物の維持補修計画を立案することが必要不可欠となっている¹⁾．

道路構造物のうち斜面对策工の一つであるグラウンドアンカー工(以下，アンカーと称す)は，主に 1980 年代以降高速道路において切り取り斜面の補強を目的として大量に整備され，現在打設されているアンカーは十数万本にのぼる．それらのアンカーが打設されて 20 年以上が経過した現状において，アンカーの導入力低下，不十分な補修，また集中豪雨などの自然災害等に起因する経時的劣化が懸念されている．そのため，アセットマネジメントの観点から，アンカーの経時的劣化を定量的に予測し，戦略的に維持補修を行っていくことが必要不可欠となっている．しかし，アンカーの性能低下過程はすべてが同一ではなく，様々な要因がアンカーの性能低下に寄与していると予想される．その要因の一つとして打設されている斜面の地質条件が挙げられ，これはアンカーの性能低下と力学的関連性がある可能性が高い．そこで，アンカーの維持補修計画を立案する際には，アンカーが打設されている斜面の地質条件を考慮する必要がある．また，地質毎にアンカーの維持補修計画を立案する手法を提案することにより，点検データがあまり得られていない斜面についても，維持補修計画を立案する目安とすることが可能となる．

1.2 本研究の目的

本研究では、アセットマネジメントの観点から、地質条件に着目してアンカーの維持補修計画を立案する手法を提案することを目的とする。

具体的には、まずアンカーの目視点検結果をそれぞれのアンカーが打設されている地盤毎に分類する。次に、マルコフ過程を用いてアンカーの性能低下モデルを地質毎に作成し、将来状態を予測する。そして、この予測結果に基づき、複数の維持補修戦略を立案した中から、ライフサイクルコスト(以下、LCC と称す)を判断指標とし、維持補修の優先順位付け、および地質毎の最適な補修戦略を決定するものである。

1.3 既往の研究との関連

本節では、道路構造物のアセットマネジメントに関する既往の研究を概観し、それらの中での本研究の位置付けを述べる。

大津ら²⁾は、アンカーの維持補修に関して、目視点検結果をマルコフ過程に適用して腐食等に起因する劣化過程を表現すると共に、LCC を判断指標として路線単位での補強・補修を実施する工法選択および優先順位付けを検討する試案を示した。

大津ら³⁾は、アンカーの性能低下について、その導入力の低下に着目してモデル化を行い、LCC を判断指標として最適補修年を判断した。また、自然ハザードとして降雨を想定した場合の斜面の破壊確率の増加を LCC 算定に反映させた。

津田ら⁴⁾は、橋梁部材の経時的劣化の過程をハザードモデルで表現し、ある時点間における健全度の推移関係を表わすマルコフ推移確率を、指数ハザード関数を用いて表現した。

以上により、本研究と既往の研究の相違点は以下になる。

本研究では、アンカーに関する既往の研究²⁾を引き継ぎ、マクロ的な観点からの維持補修を検討するが、アンカーの性能低下過程をモデル化する際に斜面の地質条件に着目し、地質毎に異なった性能低下モデルを作成する。そして、路線単位ではなく、地質単位で補修・補強の優先順位付けを行う。ただし、本研究で用いる点検結果は既往の研究⁴⁾に比べてデータ数が少なく、また点検結果の分類方

法により，ハザードモデルのような確率モデルを用いて性能低下モデルを推定することが困難であるため，簡易化のため仮定条件を設けて推移確率を算定する(第2章，第3章で詳説する)。

一方，本研究はマクロ的な観点から，膨大な数のアンカーが打設された複数の斜面を対象として，地質単位で維持補修の優先順位付けを行うものであるため，既往の研究³⁾のように特定の斜面を対象としたミクロ的な検討は行わない。そのため，アンカー一本一本の導入力について詳細な検討は行わず，LCC算定においては，斜面の破壊確率及び斜面が崩壊した際の社会的経済損失については考慮しない。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる。

第1章では，研究の背景，目的，および既往の研究について述べた。

第2章では，アンカーの目視点検結果を，それぞれ打設されている地質毎に分類する過程について説明する。

第3章では，マルコフ過程を用いた維持補修計画の立案に関する一連の流れを述べる。具体的には，まず本研究においてアンカーの性能低下のモデル化にマルコフ過程を用いる根拠について述べ，維持補修計画の概要を説明する。次に，アンカーの性能低下のモデル化における諸問題を示し，それらの問題に対処した性能低下のモデル化手法について述べる。最後に，このモデル化に基づいた維持補修計画を立案し，その最適化手法について説明する。

第4章では，第3章で提案した維持補修計画に関する評価手法を実際のアンカーに適用し，結果に対する考察を行う。さらに，地質条件に着目してアンカーの性能低下に関する考察を行う。

第5章では，第4章の結果から本研究の結論として，本研究の成果，および今後の課題について述べる。

第2章 目視点検結果の地質毎の分類

本章では，アンカーの目視点検結果の形式とその点検結果を用いる際の留意点について説明し，対象とするアンカーが打設されている斜面の地質の概要，および点検結果を地質毎に分類する方法について具体的に述べる．

2.1 グラウンドアンカーと点検結果

マルコフ過程を用いて目視点検結果に基づく性能低下モデルを作成するにあたって，その点検結果が及ぼす影響は大きい．本節では，アンカーの種類と点検結果の形式について述べ，マルコフ過程に適用する際の留意点について説明する．さらに，目視点検結果とアンカー内部の破損状況の相関性について，既往の研究の検討を引用し説明する．

2.1.1 グラウンドアンカーの種類

1988年にアンカーの防食に関する基準⁵⁾が制定されたことを受け，この基準制定前に打設された二重防食が施されていないアンカー(以下，旧タイプアンカーと称す)と，基準制定後に打設された二重防食が施されているアンカー(以下，新タイプアンカーと称す)を区別する．防食に関する基準が制定されたことにより，新旧のアンカータイプにおいてはPCケーブルの腐食に対する耐久性が異なると考えられ，旧タイプアンカーは施工後の経時変化で耐久性に問題が発生する可能性が高い．またアンカーは，図 2.1 に示すようなアンカー体が一本の鋼棒からなるアンカー(以下，鋼棒タイプアンカーと称す)と，図 2.2 に示すようなアンカー体が複数の鋼線をより合わせたものからなるアンカー(以下，より線タイプアンカーと称す)に分類される．旧タイプアンカーはそのほとんどが鋼棒タイプアンカーであり，また，新タイプアンカーはそのほとんどがより線タイプアンカーである．

2.1.2 グラウンドアンカーの点検結果の形式

本研究で用いるアンカーの点検結果は，旧 JH の健全度評価区分に準じ表 2.1

に示す六区分(表中ではⅠ～Ⅵ)に判定されているものである。また、各評価区分のアンカーの現況を表 2.2 に示す。

また、本研究で用いる点検結果は、図 2.3 に示すように、同一斜面のアンカーを複数回一斉点検したものを、その一斉点検した時点で供用期間により区別し、地質毎にまとめたものである。つまり、同一地質の数ある斜面の複数回にわたる点検結果を供用期間で区別することで、年次の違いを表現したものである。このため、点検結果の年次間隔が一定でないことに加え、点検結果の本数が年次によって異なっている。また、性能が低下した構造物は何らかの補修を施さない限り、それ以上良い状態にはならないという、構造物の性能低下の不可逆性を満足しない結果も得られうるという特徴がある。このことが、後述するようにアンカーの性能低下モデルを解析する際の支障となる。

2.1.3 グラウンドアンカーの点検結果の分析

斜面表面からのアンカーヘッドの目視点検では、地盤内部の腐食に起因するアンカー本体の欠損状態が明確に反映されていない危険性がある。このため、既往の研究²⁾では、ある路線において実施された非破壊試験結果と点検結果を比較することで、目視点検結果に基づいてアンカーの劣化状況を表現するモデルの妥当性について検討を加えており、その内容を以下に示す。

表 2.3a は、既往の研究²⁾において、ある路線の旧タイプの鋼棒タイプアンカーを対象として実施された非破壊試験結果と点検結果の比較を示す。ここで、()内の数字は、アンカーの欠損が確認された本数を表わし、キャップの浮き、角かけに関する全体的および部分的の分類は、それぞれアンカーヘッド(コンクリートブロック)が四隅とも浮いたり欠けていたりする場合と、部分的に浮いたり欠けていたりしている場合に相当する。なお、実際の目視点検では、アンカーヘッドでのキャップの浮き、ひび割れ、角かけ、および遊離石灰析出等の項目が重複して発生したアンカーが認められた。このアンカーについては、表 2.3a に示す結果では、表 2.3b に示す検査項目のランク付で順位が上位の項目に相当するものとして分類した。

表 2.3a に示す結果において、対象とする点検結果では全体の 10.6%(220 本/2066 本)のアンカーで損傷が確認された。そして、アンカーヘッドでのキャップの浮

き・ひび割れ・角かけが生じているものを中心に全体の約 5%(122 本/2066 本)のアンカーを選定して非破壊試験を実施した。その内訳は、目視点検で損傷が認められたものが 94 本(77.0%)、健全と判断されたものが 27 本(23.0%)である。同非破壊試験では、51.6%(63 本/122 本)のアンカーでは、アンカーの先端より浅い箇所で断面欠損が生じている可能性がある結果が得られた。また、表 2.3a に示す目視点検の検査項目と非破壊試験で確認された結果との関係から、アンカーヘッドでのキャップの浮き・ひび割れ・角かけが、アンカー本体の断面の欠損と相関性が高いことが確認された。

以上の結果により、旧タイプの鋼棒タイプアンカーにおいては、アンカー本体の鋼棒部の欠損・破断が直接アンカーヘッドでの損傷として確認される可能性が高いものと解釈される。一方、より線タイプアンカーでは、多数のより線で構成されているため、より線が欠損・破断しても、直接アンカーヘッドでの損傷として確認されない可能性があるかと推察される。

以上の既往の研究²⁾の分析を踏まえて、本研究では旧タイプの鋼棒タイプアンカーのみを対象とし、新タイプアンカーおよびより線タイプアンカーについては考慮しない。

2.2 対象路線の地質

本事例で対象とする路線は全部で 6 路線(A～F 路線)である。それぞれの路線が通る地点付近の地層の地質概要と土木地質的問題点を以下に示す。

1) A 路線

流紋岩～熔結凝灰角礫岩が分布する中生代白亜紀の地層①、頁岩・珪質頁岩が分布する中生代ジュラ紀の地層②、泥質岩(頁岩・粘板岩)が分布する古生代二畳紀の地層③を通る。A 路線が通る地点付近の地層①は、大きな岩盤滑りは生じにくい、ブロック状の落石・小崩落を生じやすい。また、断層破碎部では著しく粘土化している部分もある。地層②は、斜面が見かけ上地層が流れ盤(第 4 章で詳説する)となるものがある。また、小断層が多く、特に頁岩層は破碎状となる場合が多く、法面の背後に存在する場合、斜面破壊の可能性はある。地層③は、風化しやすく、かなり深部まで赤褐

色に粘土化している箇所が多く，切り土法面で小崩落が生じやすい．またこの地層のうち，粘板岩および頁岩は剥離性に富み，しばしば黒色の千枚岩質を呈し，斜面破壊の要因となることがある．

2) B 路線

流紋岩～熔結凝灰角礫岩が分布する中生代白亜紀の地層①を通る．B 路線が通る地点付近の地層①は，硬質であるが亀裂性に富み，落石・小崩落が発生しやすい．

3) C 路線

黒雲母花崗岩が分布する中生代白亜紀の地層④，砂岩・泥岩・礫岩の互層からなる中生代白亜紀の地層⑤を通る．C 路線が通る地点付近の地層④は，全体的には硬質であるが，亀裂に富み落石・小崩落が発生しやすい．また，亀裂沿いに深層風化を受け一部マサ化する．地層⑤は，斜面により流れ盤となる地点がある．

4) D 路線

頁岩・砂岩の互層からなる中生代ジュラ紀～三畳紀の地層②を通る．D 路線が通る地点付近の地層②は，小断層が多く，特に頁岩，粘板岩は破碎状を呈し，また，一部の斜面で流れ盤となっている．

5) E 路線

砂岩・チャートを含む層状頁岩からなる中生代ジュラ紀～三畳紀の地層②を通る．E 路線が通る地点付近の地層②は，切り土法面にて粘土層の上面で地下水の浸み出しが多く認められ，小崩壊を生じやすい．

6) F 路線

砂岩・チャートを含む層状頁岩からなる中生代ジュラ紀～三畳紀の地層②を通る．F 路線が通る地点付近の地層②は，法面が流れ盤となっており，特に頁岩，粘板岩は破碎状を呈し，小崩落が生じやすい．

2.3 分類する地質の種類

本研究では，前節で述べた対象とする 6 路線の地質に基づき，アンカーの目視点検結果を，打設されている地質によって，流紋岩・花崗岩・頁岩・砂岩の 4 つに分類する．具体的には，流紋岩質熔結凝灰角礫岩は流紋岩に分類する．黒雲母花崗岩は花崗岩に分類する．堆積岩は，その形成条件から様々な粒径の碎屑物が介在しやすいが，アンカーの打設地点において主体となっている地質に分類する．つまり，頁岩主体砂岩介在ならば頁岩に，砂岩主体頁岩介在ならば砂岩に分類する．また，頁岩と泥岩の間に本質的な違いはないことを考慮し，泥質岩は頁岩に分類する．

2.4 点検結果の地質毎の分類

2000 年と 2009 年に実施された対象路線のアンカーの点検結果を，前節で述べた地質毎に供用期間で区別しひとまとめにしたものを表 2.4 に示す．

第3章 マルコフ過程を用いた維持補修計画

本章では，マルコフ過程を用いたアンカーの維持補修計画を立案する手法について具体的に述べる．

3.1 マルコフ過程を用いた維持補修計画の概要

本研究では，確率統計学手法としてマルコフ過程に注目し，前章で分類した目視点検結果をマルコフ過程に適用することで，アンカーの性能低下過程をモデル化し将来予測を行う．

ある時点の状態がそれ以前の時点の状態にのみ依存するという確率過程をマルコフ過程といい，特に直前の時点の状態によってのみ決定される過程を単純マルコフ過程という．一般にマルコフ過程というときには単純マルコフ過程を指す場合が多く，本研究においても単純マルコフ過程を用いる．

マルコフ過程は，構造物の性能を表わす状態量が連続量ではなく，健全度評価区分のように離散量で表わされる場合，非常に操作性が高いという特徴がある．また，現時点の状態が多時点の状態および要因に依存するような複雑な状態推移を有する変化過程においても，類似した変化過程を有するモデルの構築が可能である．本研究でアンカーの性能低下過程の解析手法としてマルコフ過程を用いるのはこのためである．

一般的に，マルコフ過程は次式によって表わされる．

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_t = i_t) = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t) \quad (3.1)$$

ここに， P は状態生起確率， X_t は離散型パラメータ， i_t は時刻 t におけるシステムの状態を表わす．

また，システムがある状態から直後の状態へ推移する確率を行列表示した推移確率行列(以下，推移行列と称す)を T とすると，システムの状態が初期状態から τ 時点まで推移した場合の状態は次式のように表わされる．

$$S(\tau) = S(0) \cdot T^\tau \quad (3.2)$$

ここに， $S(0)$ は初期状態，および $S(\tau)$ は時点 τ での状態を表わす行列である．また，推移行列 T は，システムの状態の個数($S(t)$ の要素の数)を n とすると，次式のように $n \times n$ 行列で表わされる．

$$T = \begin{bmatrix} T_{nn} & T_{nn-1} & \cdots & T_{n1} \\ T_{n-1n} & T_{n-1n-1} & \cdots & T_{n-11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{1n} & T_{1n-1} & \cdots & T_{11} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$T_{ij} = P(X_{t+1} = j | X_t = i) \quad (3.4)$$

ここに，推移行列 T の要素 T_{ij} は1ステップで状態が i から j に推移する確率を表わす．また，以上のように，マルコフ過程を用いて要素毎に推移確率を算定することで，構造物の性能低下を予測する上で，平均化された状態推移で評価するのではなく，損傷の大きさや範囲を考慮することが可能となる．また，予測された結果に基づき維持補修計画を立案し，LCCを判断指標として維持補修計画の最適化を行うことが可能である．本章ではこの一連の流れを説明する．

3.2 マルコフ過程を用いた性能低下のモデル化

表 2.1 に示す健全度評価区分を適用した場合，アンカーを対象としたマルコフ過程を用いた性能低下のモデル化手法は，次式のように表わされる．

$$S(t + \tau) = S(t) \cdot T^\tau \quad (3.5)$$

$$S(t) = [S_{VI}(t) \quad S_V(t) \quad S_{IV}(t) \quad S_{III}(t) \quad S_{II}(t) \quad S_I(t)] \quad (3.6)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{\text{VVI}} & T_{\text{VIV}} & \cdots & T_{\text{VVI}} \\ 0 & T_{\text{VV}} & \cdots & T_{\text{VI}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & T_{\text{II}} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ここに、 $S(t)$ は供用後 t 年時点での点検したアンカーの全数を表わす状態ベクトルであり、その成分 $S_i(t)$ は、供用後 t 年時点での各ランク i に相当するアンカー本数を表わす。また、推移行列 T の成分 T_{ij} の添字 i および j は構造物の性能低下の不可逆性により $i \geq j$ となるため、 $T_{ij} = 0(i < j)$ となる。

ここで、一般的にはマルコフ過程を用いた性能低下モデルの推移行列を算定するにあたっては、点検データが出来るだけ、同一斜面で一定のデータ数および一定の点検間隔で得られていることが望ましい。しかし、本研究で得られているデータでは、前述の通り点検結果のデータ数および点検間隔は一定ではない。このマルコフ過程を用いて性能低下モデルを作成する際の点検結果の不備の対処法として、第1章の既往の研究⁴⁾で示したような、推移行列の成分 T_{ij} をハザードモデルのような確率過程モデルを用いて算定する方法などが挙げられる。

しかし、本研究で対象とするアンカーの点検データ数は既往の研究に比べて少なく、ハザードモデルのような確率過程を用いて性能低下モデルの推移確率を算定するには困難である。そこで、本研究においては、マルコフ過程を用いて性能低下モデルを解析する際に、簡易モデルを用いて表現するために以下のような仮定条件を設ける。

- ① 同一地質に打設されているアンカーは全て同様の劣化過程に従う。
- ② 推移確率行列は耐用年数を通じてただ一つに決定され、かつ一定である。
- ③ 推移確率行列が対象とする推移期間は1年間である。
- ④ 1年間の状態推移は、現状維持もしくは1区分のみの劣化とする。

ここで、①の仮定条件は第2章で説明した点検データの分類方法により、同一地質のデータに、複数の路線の複数の斜面のデータが混在していることにより設けた仮定条件である。また、②～④の仮定条件は前述の通り、本研究におけるアンカーの性能低下特性を、確率過程を用いてモデル化することの困難さに対処す

るために設けたものである．すなわち，性能低下は耐用年数を通じて簡便な定常過程に従うものとし，推移期間を1年単位と短く設定した．そして，対象期間が1年と短いため，一回の状態推移は表 2.1 に示す健全度評価区分において，現状維持もしくは一区分のみの劣化とした．

以上の仮定条件の下で，状態行列と推移行列の関係，および推移行列は次式のように表わされる．また，各要素が表わす推移確率を図 3.1 に概念図として示す．

$$S(t+1) = S(t) \cdot T \quad (3.8)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{\text{VVI}} & T_{\text{VIV}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{\text{VV}} & T_{\text{VIV}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{\text{IVIV}} & T_{\text{IVIII}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{\text{III III}} & T_{\text{III II}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{\text{II II}} & T_{\text{II I}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{\text{I I}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

なお，上記の仮定条件はあくまで現在得られている点検結果の不備に対処するために設けたものである．このため，後述するように今後戦略的にデータを蓄積することで，上記の仮定条件の問題点を解消し，モデルの高度化を図ることは可能である．また，本研究では，アンカーの性能低下が停滞しないように，全ての成分 T_{ij} について $0 < T_{ij} < 1$ を満足するものとして計算する．ただし，最低ランクでは $T_{\text{I I}} = 1$ とする．

3.3 最適推移確率行列の同定手法

各時点における点検本数，および点検間隔が異なるデータを用いて，推移行列 T の成分は図 3.2 に示す計算過程を踏むことで同定される．ただし，同図における i, j, k ，および l は評価区分ではなく時点を表わし， $i < j, k < l, j < l$ の関係が成り立つことに留意されたい．前節の仮定条件の下で施工時のアンカーの初期状態がすべてランク VI であると仮定すれば，各点検間隔に対する暫定の推移行列は次の漸化式を解くことで算定される．

$$S_{VI}(t) = S_{VI}(t-1) \cdot T_{VVI}$$

$$S_V(t) = S_{VI}(t-1) \cdot T_{VIV} + S_V(t-1) \cdot T_{VV}$$

$$S_{IV}(t) = S_V(t-1) \cdot T_{VIV} + S_{IV}(t-1) \cdot T_{IVV}$$

(3.10)

$$S_{III}(t) = S_{IV}(t-1) \cdot T_{IVIII} + S_{III}(t-1) \cdot T_{IIII}$$

$$S_{II}(t) = S_{III}(t-1) \cdot T_{IIIII} + S_{II}(t-1) \cdot T_{IIII}$$

$$S_I(t) = S_{II}(t-1) \cdot T_{IIII} + S_I(t-1) \cdot T_{IIII}$$

これらの漸化式において，ランク VI における漸化式から年次を一つずつ下げて順次代入していくことで，推移行列のランク VI 成分を算定することができる．これをランク I まで繰り返し計算することで，すべての成分が算定できる．この計算によって，同一施工年のアンカーについて，施工～2000 年点検時までの性能低下過程と，2000 年点検時～2009 年点検時までの性能低下過程それぞれの推移行列を算定する．次に，得られたこの二つの性能低下過程を平均化し，同一施工年のアンカー毎に一つの暫定推移行列を計算する．さらに，この暫定解を用いて最終点検時までの拡張計算を行い，それらを合算することで地質毎の全体の点検結果とみなす．そして，初期状態から合算結果までの性能低下過程を表わす推移行列を最適推移行列とし，暫定解を求めた時の計算方法に基づき多項方程式を解くことで，地質毎の最適推移行列を同定する．

ただし，2.1.2 および 3.2 で述べたように，本研究で用いる点検データはマルコフ過程を用いて性能低下のモデル化を行うには不備があり，式 3.10 を用いて厳密解を求めるのは極めて困難である．そのため，本研究では，繰り返し計算を行って近似解を求めることとする．その繰り返し計算過程においては，それぞれの年次において，それぞれのランクに属するアンカーの点検結果とシミュレーション解析結果の本数の差の二乗を，ランク I からランク VI まで足し合わせ，その二乗和を最小にするという最小二乗法を用いる．

3.4 維持補修計画の立案

維持補修計画を立案するには，点検実施間隔，構造物の性能がどの程度低下したら補修を実施するか，あるいはどのような方法で補修するかなどを考慮する必要がある．点検実施間隔年はある時点において予測される性能低下状態，あるいは専門家の判断などによって決定される．また，補修方法は予算の制約，補修対象となる性能低下レベル(以下，ターゲットレベルと称す)および補修後の性能レベルに依存する．

ここで，状態行列 S に基づき，何らかの補修作業が行われた後の状態は， R を補修行列として次式のように表わすことができる．

$$S^*(\tau) = S(\tau) \cdot R \quad (3.11)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{VI VI} & R_{VI V} & \cdots & R_{VI I} \\ R_{V VI} & R_{V V} & \cdots & R_{V I} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{I VI} & R_{I V} & \cdots & R_{I I} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ここに， $S(\tau)$ は補修前の状態行列， $S^*(\tau)$ は補修後の状態行列を表わし，補修行列 R の要素 R_{ij} はアンカーがランク i からランク j へ推移する確率を表わす．

3.5 維持補修計画の最適化

本節では，前節で説明した維持補修計画のモデルを，LCC を判断指標として最適化する手法について説明する．

3.5.1 LCC 評価の概要

最適な維持補修計画とはより少ない支出でより高い効果を得ることのできる計画であり，具体的には点検費用あるいは補修費用などの各費用の合計が最も小さくなるような計画である．また，ライフサイクルコスト(LCC)とは，構造物の

費用を，建設～供用～廃棄の段階をトータルとして考えたものである．本研究では，この LCC を判断指標とすることで，維持補修計画の最適化を行う．

LCC は一般的に次式によって定義される⁶⁾．

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_O \quad (3.13)$$

ここに， C_C は建設費用， C_{MT} は維持補修費用， C_O はオペレーション費用を表わす．このうち，維持補修費用には点検費用，補修費用が含まれ，オペレーション費用の代表例としては，プロジェクトの融資に対する返済費用があげられる．

インフラ構造物のアセットマネジメントにおいては，既設の構造物を対象とする場合が多いため，これらの費用のうち C_{MT} のみを対象として扱うことが多い．したがって，本研究でも，これらの費用のうち維持補修費用を対象として LCC 評価を行う．

3.5.2 LCC の定式化

アンカーを点検した際に，状態がターゲットレベルに達していたアンカーについては，更新もしくは延命化による補修が施される．一方，性能は低下しているものの，ターゲットレベルには達していないアンカーに関しては，対策不要として定期的な点検のみが実施される．よって，ある一定期間に必要な LCC は，点検費用，補修費用の 2 種類からなり，またこれらはターゲットレベルの設定に依存する．

まず，点検費用はすべての立案計画に計上される費用であり，点検方法により異なるものの，点検実施間隔年によらず常に一定値をとる．また，点検費用行列 C_{ins} は次式によって表わされ， c は点検費用を表わす．

$$C_{ins} = [c] \quad (3.14)$$

次に，点検によりターゲットレベルまで性能低下が確認された場合，アンカーの補修が実施され，同時に補修費用が計上される．また，補修費用行列 C_{rep} は次式によって表わされる．

$$C_{rep} = [c_{VI} \quad c_V \quad c_{IV} \quad c_{III} \quad c_{II} \quad c_I]^T \quad (3.15)$$

ここに，要素 c_t は，ランク t のアンカーを補修する際の補修費用を表わす．ただし，補修費用はアンカーの補修方法によって異なる．

以上で定義した各費用に基づき，本研究における LCC 算定式は以下のように表わされる．

$$LCC = \sum_{i=1}^{t_x} C_{ins} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i \cdot t_m} + \sum_{i=1}^{t_x} S(i \cdot t_m) \cdot C_{rep} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i \cdot t_m} \quad (3.16)$$

$$t_x = t/t_m \quad (3.17)$$

ここに， t_x は一定期間年数 t における点検実施回数， t_m は点検実施間隔年，および $S(i \cdot t_m)$ は補修作業が行われる前の状態行列を表わす．また， ρ は社会的割引率を表わす．社会的割引率は将来の収入，支出を現在価値に割り戻して評価するための係数であり，対象国の経済の成長率または公定歩合に連動して設定される．日本では 4% が用いられる場合が多く，本研究においても 4% を採用する⁷⁾．

本来，構造物の点検は，斜面崩壊等のリスクを低減することを目的として，予防保全の観点から実施される．そのため，LCC 算定においても斜面の力学的安定性を考慮すべきである．しかし，本研究では膨大な数のアンカーを対象としており，各アンカーの導入力低下を詳細に検討するものではなく，斜面の地質毎の維持補修の優先順位付けを行うものである．したがって，LCC 算定において斜面の安定性に関する条件を加味していないことについて留意されたい．

第4章 維持補修計画のグラウンドアンカーへの適用

本章では，第2章で分類した目視点検結果を，第3章で説明した維持補修計画の立案手法に適用し，考察を述べる．さらに，地質条件に着目してアンカーの性能低下特性に関する考察を述べる．

4.1 推移確率行列の同定

本節では，表2.4に示す点検結果を，第3章で説明した性能低下のモデル化手法に適用し，各地質の最適推移行列を同定する．また，施工～2000年点検時までの性能低下過程の推移行列，2000年点検時～2009年点検時までの性能低下過程の推移行列，同一施工年のアンカー毎に平均化した暫定推移行列，それらを合算し最適化計算した地質毎の最適推移行列それぞれの同定結果を表4.1に示す．

4.2 点検結果と解析結果の比較

本節では，前節で同定した最適推移行列を用いた性能低下モデルの解析を行い，供用後経過年数毎の状態行列を算定する．また，この算定結果として，推移行列の同定に用いた表2.4に示す点検結果と解析結果の比較を図4.1に示す．そして，図4.1によって，2000年および2009年の点検結果と，これらに基づいて同定された性能低下モデルによる2000年および2009年それぞれのシミュレーションの解析結果を比較することで，本章第5節第1項において，本研究におけるモデル化手法の内挿の範囲内における予測精度とその妥当性について検証する．

4.3 補修戦略の設定

本研究では，アンカーの補修戦略として，図4.2に示すような，事後補修型と予防保全型の以下の2つの補修プランを設定する．

- 1) プラン 1:健全度ランクがⅠまで低下したアンカーのみを打ち替える．ただし，打ち替えたアンカーは当初と同様の性能低下特性に従うものとする．

- 2) プラン 2:健全度ランクが I まで低下したアンカーのみを打ち替えることに加えて，健全度ランクが II まで低下したアンカーのみに対して，防食を施し延命化する．ただし，延命化されたアンカーは今後ランク II を維持するものとする．

つまり，プラン 1 は事後補修型のプラン，プラン 2 は予防保全型のプランと位置付けられる．また，以上の 2 つのプランに対応する補修行列 R は，それぞれ以下のように表わされる．

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここに， R_1 はプラン 1 の補修行列を， R_2 はプラン 2 の補修行列を表わす．また，本研究では，それぞれのプランに対して，点検実施間隔年を 3 年，5 年，10 年，および 15 年の 4 種類で設定し，4 種類の地質についてそれぞれ合計 8 種類の補修戦略に関して議論する．

4.4 LCC 算定

本研究では，点検費用および補修費用の具体的な数値は，NEXCO 西日本により過去に実際に実施された点検，および補修作業に要した費用に基づき，以下のように設定する．なお，新たに点検，および補修作業を実施する場合は，これらの費用はその施工条件によって変動する可能性があることに留意されたい．

$$C_{ins} = [2,000] \quad (4.2)$$

$$C_{rep}^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 550,000 \end{bmatrix} \quad C_{rep}^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10,000 \\ 550,000 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ここに、 C_{rep}^1 は補修プラン 1 に対する補修費用行列を、 C_{rep}^2 は補修プラン 2 に対する補修費用行列を表わす。

また、第 3 章で設定した補修戦略と費用に基づいた、全地質の LCC 算定結果を図 4.3 に示す。なお、本事例における LCC 算定期間は、現状(2009 年)以降 40 年間とする。また、式 3.16 に示す LCC は、対象とする地質の全てのアンカーを対象として定式化したものである。しかし、この場合、アンカーの全数が多い地質ほど LCC は大きくなり、補修戦略の優先順位付けを行うことができない。そのため、本事例では、対象とした地質毎の性能低下特性を考慮して比較するために、各地質のアンカー一本当たりの LCC を算定した。したがって、LCC 算定期間において、LCC が最小となる維持補修計画が各地質の最適維持補修計画であり、その中で点検実施間隔が短く、さらに最適維持補修計画の LCC が大きい地質ほど補修の優先順位が高いことを表わしている。また、補修プラン 1 および補修プラン 2 それぞれの、点検実施間隔年数をパラメータとして比較した 2049 年に相当する LCC を図 4.4 に示す。

4.5 考察

本節では、4.1、4.2、4.3 に基づく算定結果により、解析結果に対する考察、および LCC 算定結果に対する考察を行い、本章のまとめとする。

4.5.1 解析結果に対する考察

図 4.1 に示す 2000 年および 2009 年の点検結果とマルコフ過程を用いた性能低下のシミュレーション結果は、概ね整合性のとれているものと、解析結果が点検

結果から大きく外れているものがある。

まず、流紋岩の供用後 14 年、19 年、28 年および頁岩の供用後 13 年において、ランク V およびランク IV において、解析結果に比べて点検結果のほうが卓越する結果となっている。このよう相違の要因については以下のように推察される。

表 2.1 のような健全度評価区分に基づいて点検が実施される場合、点検員の個人的な判断基準の違い、すなわちバイアスの影響が大きくなることが一般的に指摘されている。表 2.1 に示すような評価区分では、アンカーの状況説明が曖昧であり、1 ランク程度の差はそれほど有益ではない場合がある。そのため、アンカーの性能低下がある程度認められる場合でも、供用期間が短く、その程度に確信が得られない場合、保守的にそのアンカーは健全と判断される可能性がある。一方、アンカーの性能低下があまり認められなくても、長期の供用期間を経ている場合、そのアンカーは劣化していると判断される可能性がある。これらの点検員によるバイアスの影響により、点検結果がランク V のアンカーには実質はランク VI、V、IV のアンカーが、また点検結果がランク IV のアンカーには実質はランク V、IV、III のアンカーが混在していると可能性がある。このようなバイアスの影響を小さくするための対策としては、健全度評価区分の判定基準を具体的に確立させる、または、2002 年に新たに設定された健全度評価区分⁸⁾のように、健全度評価区分を少なく設定するといったものが挙げられる。ただし、本研究ではこの 2002 年に新たに設定された健全度評価区分は用いていないことに留意されたい。

次に、花崗岩については、2000 年および 2009 年どちらの比較においても、概ね整合性のとれた比較結果となっている。これは、本事例では花崗岩地盤についてはある 1 つの斜面のデータしか使用していないため、2.1.2 で述べたように多斜面のデータを一つにまとめたり、3.3 で述べたように複数の施工年のデータを合算するといった手順を踏んでいないため、純粹にある 1 地点の斜面の性能低下特性として結果が得られたことによると推察される。また、花崗岩の最適推移行列において、ランク II からランク I に推移する確率が 0.9999 と非常に高くなっている。これは、表 2.4 に示す通り、花崗岩の 2000 年および 2009 年の点検結果において、ランク II およびランク I と判定されたものが 1 本もなかったため、ランク II からランク I への推移確率を求めることができず、また、最小二乗法を用いて推移確率を算定する過程において、ランク I に推移するのが早いほうが解が収束しやすかったということが原因であると推察される。これは、頁岩の 1988 年施工

のアンカーの暫定推移行列, 砂岩の 1986 年施工のアンカーの暫定推移行列についても同じことが言える. このことについては, 今後戦略的に点検データを蓄積することによって, 性能低下モデルの精度向上を図ることが可能である. ただし, これらの推移行列においては, ランクⅢからランクⅡに推移する確率が非常に低くなっているため, 実質ランクⅡからランクⅠに推移するアンカーはほとんどないというシミュレーション結果になる. そのため, 将来状態を予測するにあたっては, ランクⅡからランクⅠに推移する確率が高いことが予測結果に及ぼす影響は小さいということに留意されたい.

また, 本研究における性能低下モデル化手法では, 各施工年で平均化した解析結果を最終調査年まで推移させたものを合算し, さらに最適化計算することで, 地質全体の性能低下特性としている. このため, モデル化に関してはアンカーの本数が多い施工年の点検結果による影響が大きくなる. したがって, 頁岩の供用後 12 年および 21 年のように他の施工年に比べてアンカーの本数が極端に少ない場合, 性能低下モデルはアンカーの本数が多い施工年の状態推移に依存してしまい, アンカーの本数が少ない施工年については整合性が低くなる. これが要因となり, 頁岩においては, 1988 年施工のアンカーの状態推移は解析結果にあまり反映されなかったと推察される.

さらに, 砂岩の供用後 12 年および 21 年において, シミュレーション結果が点検結果から大きく外れている. この要因については, 以下のように推察される.

3.2 で述べた通り, 本研究では, 推移行列 T の成分 T_{ij} の添字 i および j は構造物性能低下の不可逆性により $i \geq j$ となるため, $T_{ij} = 0 (i < j)$ としている. しかし, 砂岩の 12 年～13 年, および 21 年～22 年の間の実際の点検結果でみた状態推移は, この不可逆性を満足していない. これは, 2.1.2 で述べた通り, 本研究で用いる点検結果は, 同一地質の数ある斜面の複数回にわたる点検結果を供用期間で区別することで, 年次の違いを表現したものであることに起因する. この不可逆性の不満足が, 砂岩においては最も顕著に表れているため, 点検結果と解析結果が不一致する結果が得られたと推察される. さらに, 前述の通り, 本研究の性能低下モデルはアンカーの本数が多い点検年次に依存する. このため, 1988 年施工のアンカーの点検結果が性能低下モデルの解析結果に強く影響し, 他の供用年についても整合性が低くなるという結果になったと推察される. この問題については, 前述の通り今後戦略的に点検データを蓄積する他に, 既往の研究⁴⁾で橋梁劣化予測

に適用されているように，マルコフ過程を用いた性能低下モデルをハザードモデルで表現し，構造特性や使用環境の違いを特性パラメータで表わす，つまりアンカーにおいては同一地質でも斜面において異なる要因を特性パラメータで表現し不確実性を考慮するということで，解決できる可能性がある．

なお，本研究で示したマルコフ過程を用いた性能低下のモデル化手法においては，3.2 の仮定条件②で示したように，耐用年数を通じて定常劣化を仮定している．このため，流紋岩，花崗岩，砂岩のように点検結果においてランクⅠのアンカーの本数が極端に少ない場合，この点検結果に基づいて得られた性能低下モデルを用いた将来予測においては，長期の供用を経てもランクⅠのアンカーがほぼ発生しないという結果が生じる．現実的にはこのようなことは考えられないため，供用中に性能低下過程が時間的に変化する場合(例えば，供用開始直後は性能低下が顕著であったが，その後はあまり性能低下が見られない等)については本研究で用いたモデル化手法には検討の余地がある．この問題を解決するためには，前述の通り，今後戦略的にデータを蓄積する，あるいは，マルコフ過程を用いた性能低下モデルをハザードモデルで表現することにより性能低下モデルの精度向上を図る必要性がある．

4.5.2 LCC 算定結果に対する考察

図 4.3 に示す全ての地質において，ランクⅠまで性能が低下したアンカーのみを打ち替える事後補修的なプラン 1 よりも，ランクⅠまで性能が低下したアンカーを打ち替えることに加えてランクⅡまで性能が低下したアンカーの延命化を図る予防保全的なプラン 2 の方が，LCC が小さくなっている．しかし，流紋岩および花崗岩においては予防保全による LCC 縮減額が小さい一方，頁岩および砂岩においては予防保全による LCC 縮減額が非常に大きくなっている．このように，地質によって補修戦略による維持補修費用の違いが顕著に表れた要因については，以下のように推察される．

式 4.2，4.3 に示すように，アンカーの打ち替え費用がアンカーの延命化費用に対して 55 倍となっている．このため，点検実施間隔中に性能がランクⅠまで低下するアンカーの発生頻度が LCC においては支配的要因となる．したがって，プラン 2 を適用することの利点は，延命化を施した後のアンカーの性能はランクⅡで

維持されるため、ランクⅠのアンカーの発生本数を低減することである。流紋岩および花崗岩においてはランクⅢからランクⅠまでの推移が比較的遅いため、プラン2によるランクⅡの延命化の効果が薄く、特に花崗岩においては、ランクⅡおよびランクⅠのアンカーの発生本数が非常に少ないため、事後補修と予防保全の間でほとんどLCCに差が見られないという結果になったと推察される。一方、頁岩および砂岩においては、ランクⅢからランクⅠへの推移が非常に速く、特に頁岩においてはランクⅠのアンカーの発生本数が多い。このため、プラン2を選択することによるLCC縮減効果が大きかったと推察される。

さらに、図4.4に示す点検実施間隔年による2049年に相当するLCCの比較において、流紋岩および花崗岩については点検間隔を15年とすることが最適となっている。一方、頁岩は点検間隔を3年、砂岩は10年と設定することが最もLCC算定結果が小さい。このように地質によって最適な点検実施間隔が異なることについては、以下のように推察される。

流紋岩および花崗岩においては、アンカーの劣化速度が極めて小さいため、補修費用よりも点検費用のほうが支配的要因となる。このため、点検間隔を長く設定することによるLCC縮減効果が大きくなる。また、砂岩については流紋岩や花崗岩よりも劣化速度が速いため、点検間隔を10年と流紋岩や花崗岩よりも短期に設定することが最適という結果が得られた。一方、頁岩においては劣化速度が非常に速いため、点検間隔を3年と短く設定し、こまめに点検、補修を実施する戦略のほうがLCCの縮減効果が大きくなっている。

また、全ての検討において予防保全型のプラン2のほうが事後補修型のプラン1よりもLCCが小さくなったことについては、2.1.3で述べたように本研究で対象としたアンカーは二重防食を施されていない旧タイプ鋼棒タイプアンカーであったため、新タイプアンカーのように防食を施すことによる劣化の抑制が効果的であったためと推察される。ただし、本研究においては、延命化したアンカーは以後性能が維持されると仮定したが、実際には延命化したアンカーも徐々に劣化が進行する。また、更新後のアンカーは以前と同様の性能低下過程に従うとしたが、実際は更新後のアンカーには二重防食が施されるため、更新前と同様の性能低下過程を示さない可能性がある。したがって、今後補修されるアンカーが増加していくことを考慮すると、補修後のアンカーの性能低下についても検討していくことが重要となる。

ここで、4.4 で述べたように、本研究では、LCC 算定期間において LCC が最小となる維持補修計画が各地質の最適維持補修計画であり、その中で点検実施間隔が短く、最適維持補修計画の LCC が大きい地質ほど補修の優先順位が高いことを表す。したがって、本研究において検討対象とする 4 地質(流紋岩、花崗岩、頁岩、砂岩)での旧タイプ鋼棒タイプアンカーの維持補修に関する優先順位付けは、頁岩、砂岩、流紋岩、花崗岩の順となる。

以上のように、旧タイプ鋼棒タイプアンカーに対して、本研究で提案する、アンカーの経時的性能低下特性、および補強・補修戦略を考慮したモデル化手法を適用することで、地質毎にアンカーに対する維持補修の優先順位付け、および最適な維持補修計画を定量的に選択することが可能となる。

4.5.3 地質によるグラウンドアンカーの性能低下特性に関する考察

本研究で検証した 4 つの地質のうち、頁岩と砂岩に、性能低下過程、LCC 算定結果、および最適維持補修計画に相似した結果が得られた。また、流紋岩と花崗岩にもこれらの相似が認められた。したがって、本項では、これらの 4 つの地質を、堆積岩(頁岩・砂岩)と火成岩(流紋岩・花崗岩)にさらに大きく分類し、堆積岩と火成岩で性能低下過程が大きく異なる要因について考察する。

アンカーで補強された一般的な斜面・構造物において想定される重大な事象とその要因は、図 4.5 のように複雑に関連しており、また、同図において矢印の太さは各要因の影響度を表わす⁹⁾。そこで、本研究では、切り取り斜面の背面地山の地質がアンカーの劣化に影響する要因の一部として、背面地山の地質の風化、アンカー体への水の浸入、および斜面の変位に着目し考察を行う。

まず、背面地山の風化について考察を行う。図 4.6 は、既往の研究¹⁰⁾による岩石中の有効間隙率と深度の相関図である。ただし、有効間隙率とは、岩石中に存在する全ての間隙(真の間隙)のうち外気と通じているものであり、真の間隙と区別される。図 4.6 によると、中古生代堆積岩は岩石そのものが風化する、または掘削に伴う亀裂の開口により亀裂面に沿って岩片に風化が及ぶという形で風化が進行し、その風化深度は 2~4m である。一方、火成岩は地表のごく近傍で風化し、その風化深度は 0.5m 以内である。また、図 4.7 は堆積岩と火成岩の風化帯厚さを示す。これらの相違は、堆積岩の方が火成岩に比べて透水性が大きいということ

が一因として推察される．さらに，1つの斜面に打設されているアンカーでも全長は様々であり，本事例では具体的には流紋岩で2.5~13m，花崗岩で3.5m，頁岩で5~14.5m，砂岩で8.7mであるため，ほぼ全ての場合で風化帯厚さよりもアンカー全長の方が長い．そのため，アンカー体定着長までは風化は及ばず，背面地山が風化することにより，アンカーの引き抜き抵抗力よりも導入力の方が低下すると予想される．このことにより，堆積岩は火成岩に比べて風化深度が深く，地質の風化に伴うアンカーの導入力の低下が大きかったことがアンカーの早期劣化に繋がったと推察される．

次に，堆積岩は火成岩に比べて透水性が大きく，また，前述の通り堆積岩は火成岩よりも風化帯が大きいいため，風化帯を流れる水の量も多い．さらに，堆積岩はその形成条件から様々な粒径の碎屑物で互層が形成されやすく，地層の境界付近が地下水の水みちとなることが多い．このため，堆積岩のアンカーはアンカー体に水が浸入する可能性が高く，水の浸入がテンドンの腐食に繋がり，その結果，アンカーが早く劣化したと推察される．

最後に，流れ盤について考察する．図4.8に示すように，互層状態の地質が傾斜して斜面を形成している場合に，地層が斜面側へ向かって傾斜している状態を流れ盤といい，逆に斜面の内部へ向かって傾斜している状態を受け盤という．一般的に流れ盤の地質構造は斜面破壊を誘発させやすく，逆に受け盤の地質構造は比較的安定しているとされている．そのため，流れ盤の斜面ではアンカーに想定外の外力が作用し，アンカーの早期劣化に繋がる可能性がある．そこで，流れ盤がアンカーの劣化にどれほど寄与するかを定量的に示すため，本研究で用いた頁岩のデータの中から流れ盤構造のもののみを抽出して性能低下過程をモデル化し，頁岩全体の性能低下モデルと性能低下過程を比較し検証する．流れ盤頁岩の推移行列同定結果を表4.2に，点検結果とシミュレーション結果との比較を図4.9に示す．また，図4.10は，頁岩全体と流れ盤頁岩において，アンカー全体の本数を1として，供用開始から50年までの性能低下過程を10年毎にシミュレーションし比較したものである．

まず，図4.9に示すように，流れ盤の性能低下モデルのシミュレーション結果については概ね整合性がとれている．一部解析結果が点検結果と外れている要因については，4.5.1で述べた通りである．したがって，流れ盤の性能低下モデルについても内挿の範囲内でのある程度の予測精度があり，これらの性能低下モデル

に基づいて将来状態を比較することに問題はないことが確認された。

次に、図 4.10 から、流れ盤の頁岩は頁岩全体に比べて供用早期のランクⅣまでの推移は若干が早い、長期供用時のランクⅢ以下への推移は頁岩全体の方が早いと言える。したがって、今回の検証では流れ盤構造がアンカーの性能低下に寄与しているとは一概には言えないことが分かる。ただし、本研究で用いた点検データには地質の詳細な情報は少なく、斜面の地質が流れ盤かどうかについての言及がないものも数多く見られた。また、本事例では頁岩全体のデータの中から流れ盤となっているものを抽出しモデル化を行ったため、流れ盤については頁岩全体よりもサンプル数が少なく、斜面 1 つ 1 つ固有の特性がより強く反映された可能性がある。したがって、流れ盤については、今後斜面の詳細な地質調査を行い、より詳しいデータと多くのサンプル数を用いて再度検証を行う必要がある。

以上の検討を要約し、本研究において、堆積岩と火成岩の間でアンカーの性能低下が大きく異なった要因については、以下のように推察される。

- 1) 堆積岩は火成岩に比べて風化深度が深く、また、火成岩は岩石が部分的にまばらに風化することに対して、堆積岩は岩石が全体的に風化する。この風化メカニズムの相違により、堆積岩は風化に伴うアンカーの導入力の下が著しい。
- 2) 堆積岩は火成岩に比べて透水性が大きいため、切り取り斜面の背面を流れる地下水の量が多い。このため、堆積岩はアンカー体に水が浸入することによるテンドンの腐食が進行しやすい。

しかし、本事例では背面地山の風化帯厚さや透水性に関するデータは得られていないので、これらの検討は実際に検証を行えていない。したがって、今後データを収集し、これらの検討について定量的に検証する必要がある。

第5章 結論

本章では，本研究のまとめとして，本研究の成果と今後の課題を述べる．

5.1 本研究の成果

本研究においては，アンカーの目視点検データに基づき仮定条件を設けたマルコフ過程を用いて，マクロ的な観点から戦略的に地質毎でのアンカーの補修・補強に関する検討手法を提案すると共に，その有用性について示した．また，アンカーの性能低下過程について，背面地山の地質に着目し推察した．本研究の成果は，以下のように要約される．

- 1) 本研究で提案した仮定条件を設けたマルコフ過程を用いたアンカーの性能低下モデルは，4地質を対象としたシミュレーション結果については，流紋岩，花崗岩，および頁岩については実際の点検結果と概ね整合性のある結果が得られ，内挿の範囲内である程度の予測精度があり，マクロ的な観点から維持補修を検討する上で実用性があることが確認された．砂岩については，本事例の条件の下では，点検データの不足により性能低下モデルの精度が低く，シミュレーションにおいても点検結果との整合性は低い結果となった．
- 2) 本研究の性能低下モデルに基づいて，地質毎のアンカーの性能低下特性を反映した維持補修計画を立案する手法を適用することで，頁岩，砂岩，流紋岩，花崗岩の順に補修するというように，地質毎にアンカーに対する維持補修の優先順位付けが可能であることを示した．
- 3) 本研究で提案するアンカーの補強・補修戦略を考慮したモデル化手法を適用することで，アンカーに対する最適な補修戦略を地質毎に定量的かつ明示的に選択することが可能であることを示した．
- 4) アンカーの性能低下特性が斜面の地質によって異なる要因を，切り取り斜

面の背面地山の風化，透水性，および地層の構成に着目して考察し，堆積岩と火成岩の風化メカニズムの相違，および透水性の違いが，アンカーの性能低下過程が斜面の地質によって異なる要因の一つであるという知見を示した．

5.2 今後の課題

本研究では，流紋岩，花崗岩，頁岩についてはマクロ的な観点からの維持補修計画の検討が可能な水準の予測精度が確認された．しかし，前節で述べたように，砂岩においては，本事例の条件の下では，点検データの不足により性能低下モデルの精度が低く，シミュレーションにおいても点検結果との整合性は低い結果となった．また，4.5.1で述べたように，一部の推移行列では推移確率に明らかに間違った値が見られた．これらのことについては，今後戦略的に点検結果を蓄積し，データベースを整理することによって，マルコフ過程に基づく解析結果の予測精度が向上することが期待できる．さらに，本研究では得られたデータ数の関係上4つの地質について検討を行ったが，今後更なるデータの収集により他の地質についても本研究で提案したモデル化手法を適用し，その精度を検証することが必要である．

また，時間とともに性能低下過程が変化する可能性を考慮して，本研究で設定した仮定条件を見直し，ハザードモデルを用いて推移行列を算定するモデル化手法を検討する必要がある．その際，同一地質でも斜面において異なる要因，例えば斜面毎のアンカーの施工本数や，当該地点での年間降雨量などを特性パラメータで表現するといった，不確実性を考慮することが重要である．ただし，アンカーは橋梁部材等に比べてデータが少ないため，ハザードモデルを用いる際にはデータが少ないことによる問題点についての検討が必要となる．

さらに，マクロ的な検討からミクロ的な検討に移り，アンカーの導入力および斜面の安定性を考慮したモデル化手法を検討していく必要がある．その際，斜面崩壊に伴う社会的経済損失をLCC算定式に導入することで，本研究で得られた結論が変化する可能性もある．

参考文献

- 1) 大津宏康：アセットマネジメント総論(1)，サマースクール 2010「建設マネジメントを考える」，pp.1-12，2010.
- 2) 大津宏康，S.Thamrongsak，幹拓也，上出定幸：点検結果に基づくグラウンドアンカー工の維持補修計画，土木学会論文集 F，Vol.66，No.1，pp.158-169，2010.
- 3) 大津宏康，松山裕幸，N.Supawiwat，高橋健二：斜面对策工の性能低下過程の不確実性を考慮した LCC 評価，土木学会論文集 F，Vol.62，NO.2，pp.405-418，2006.
- 4) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集 No.801/I-73，pp.69-82，2005.
- 5) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，1988.
- 6) 大津宏康，赤木舞，松山裕幸，大谷芳輝：吹付けコンクリート斜面の維持補修費評価に関する研究，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.13，pp.301-314，2006.
- 7) 道路投資の評価に関する研究委員会編：道路投資の評価に関する指針(案)，道路投資の評価に関する研究委員会，日本総合研究所，1998.
- 8) 日本道路公団：アンカー工の点検および健全度調査マニュアル(案)，2002.
- 9) 土木研究所，日本アンカー協会：グラウンドアンカー維持管理マニュアル，2008.
- 10) 松山裕幸，天野淨行，山本高司：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 F，Vol.62，No.3，pp.445-458，2006.

謝 辞

最後になりましたが，本研究を進めるにあたってご協力頂いた方々，お世話になった方々への感謝の意を表したいと思います．

京都大学大学院工学研究科・大津宏康教授には，ご多忙の中幾度も中間発表の場を設けて頂き，研究を進めていく上で常に的確なご助言をして頂きまして，大変感謝致します．初めての研究というものにとまどっている筆者に対して，研究に対する姿勢や土木技術者としての心構えから教えて下さり，時に厳しくも常に温かいご指導をして頂きましたことを，本当に心からお礼申し上げます．

京都大学大学院工学研究科・木元小百合准教授には，本研究の副査として，お忙しい中筆者の論文を読んで頂き，細部にわたって的確なご助言をして下さいましたことを深く感謝致します．

京都大学大学院工学研究科・塩谷智基准教授には，筆者が研究室に配属された直後から積極的に交流を図って頂き，また筆者にとって新鮮な情報を数多く教えて下さり，様々な視点から物事を捉えるということを学ばせて頂きました．心から感謝致します．

京都大学大学院工学研究科・稲積真哉助教には，研究面においてだけでなく生活面においても様々なご助言をして頂き，不自由なく研究ができる環境を作って頂きましたことに，大変感謝致します．

また，西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社の上出定幸氏には，お忙しい中貴重な資料を数多く提供して頂きましたことに，心からお礼申し上げます．

伊東宏美秘書には，常に研究生活を様々な面でサポートをして頂きましたことに大変感謝致します．また，大津研究室の諸先輩には，研究面のみならず生活面においても親切にして頂き，本研究を無事遂行することができました．深く感謝致します．特に，修士課程・幹拓也氏には，本研究を進めるにあたって的確なご助言を数多くして頂きました．心からお礼申し上げます．そして，4回生の方々には，時に刺激し合い，時に励まし合いながら，苦楽を共にして非常に有意義な研究生活を送ることができましたことを大変感謝致します．

最後に，大学に通い不自由なく勉学に励めるという素晴らしい環境を与えて下さり，自分をここまで育ててくれた両親に，改めて感謝の意を表します．

表2.1 グラウンドアンカー健全度評価区分

評価区分	状況
I	現状で全く機能していない
II	機能が大幅に低下しており、今後区分 I になる可能性がある
III	機能が低下しており、今後区分 II になる可能性がある
IV	機能は多少低下しているが、対策によって機能を保持できる
V	機能は良好で、対策により保持できる
VI	現状のままで、良好な状態を維持できる

表2.2 各評価区分のグラウンドアンカーの現況

評価	アンカーの現況
I	コンクリートキャップが崩落している
	コンクリートキャップが手で動く
II	コンクリートキャップが浮いている
	錆がひどい、オイルが無い
	水もれ、遊離石灰、錆が有る
III	コンクリートキャップにクラックが入っている、水が漏れている
	鋼製キャップの錆、オイル漏れ著しい
IV	コンクリートキャップ表面の風化、劣化
	鋼製キャップに錆発生、遊離石灰またはオイルが僅かに漏れている
V	特に変状無し

表2.3a アンカーの点検/調査結果の実施数量, 損傷・欠損状況

検査項目		目視/打音検査	非破壊試験
キャップの浮き	全体的	67	53(41)
	部分的	12	2(0)
キャップのひび割れ		9	4(1)
漏水		0	0(0)
遊離石灰石出		77	15(5)
キャップの角かけ	全体的	5	5(4)
	部分的	26	12(8)
鋼棒先端露出		18	3(0)
アンカー破断		6	-
損傷本数		220	94(59)
健全本数		1846	27(4)
全体本数		2066	122(63)
損傷率(欠損率)		10.60%	77.0%(51.6%)

表2.3b 点検結果のランク付

優先順位	具体事例
高 ↑↓ 低	アンカー破断
	キャップの浮き(全体的)
	キャップの角かけ(全体的)
	キャップの浮き(部分的)
	キャップのひび割れ
	漏水
	遊離石灰石出
	キャップの角かけ(部分的)
	鋼棒先端露出

表2.4 点検結果一覧(1)

地質	路線	施工年	点検年	供用年数	評価区分						total
					Ⅵ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
流紋岩	A	1986	2000	14	0	240	0	0	2	0	242
	B	1981		19	0	0	223	76	0	0	299
	A	1986	2009	23	0	158	74	5	5	0	242
	B	1981		28	0	0	221	77	0	1	299

地質	路線	施工年	点検年	供用年数	評価区分						total
					Ⅵ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
花崗岩	C	1988	2000	12	0	695	2	0	0	0	697
	C	1988	2009	21	0	375	120	202	0	0	697

表2.4 点検結果一覧(2)

地質	路線	施工年	点検年	供用年数	評価区分						total
					Ⅵ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
頁岩	A・F	1988	2000	12	0	102	40	0	0	0	142
	D・E	1987		13	0	19	511	4	26	3	563
	A・C	1985		15	0	368	216	0	4	5	593
	A・F	1988	2009	21	0	101	40	1	0	0	142
	D・E	1987		22	0	0	401	58	78	26	563
	A・C	1985		24	0	295	233	17	24	24	593

地質	路線	施工年	点検年	供用年数	評価区分						total
					Ⅵ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
砂岩	C	1988	2000	12	0	0	0	0	67	1	68
	C	1987		13	0	0	34	2	0	0	36
	C	1986		14	0	6	48	0	0	0	54
	C	1988	2009	21	0	0	0	0	67	1	68
	C	1987		22	0	0	0	29	7	0	36
	C	1986		23	0	0	0	54	0	0	54

表4.1a 推移確率行列同定結果・流紋岩(1)

供用開始～供用14年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.0001	0.9999	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9992	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用14年～供用23年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9546	0.0454	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9760	0.0240	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.7949	0.2051	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1986年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.1905	0.8095	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9908	0.0092	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9838	0.0162	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.8152	0.1848	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1a 推移確率行列同定結果・流紋岩(2)

供用開始～供用19年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.4536	0.5464	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.3794	0.6206	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9813	0.0187	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用19年～供用28年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.4536	0.5464	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.3794	0.6206	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9990	0.0010	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9985	0.0015	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1981年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.6370	0.3630	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.6118	0.3882	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9833	0.0167	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9995	0.0005	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2618	0.7382
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1a 推移確率行列同定結果・流紋岩(3)

最適推移行列						
評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.6879	0.3121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9582	0.0418	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9742	0.0258	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9916	0.0084	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9889	0.0111
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1b 推移確率行列同定結果・花崗岩

供用開始～供用12年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.1353	0.8647	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9997	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用12年～供用21年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9337	0.0663	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.7582	0.2418	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

最適推移行列

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.4769	0.5231	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9861	0.0139	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.8804	0.1196	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1c 推移確率行列同定結果・頁岩(1)

供用開始～供用12年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.3046	0.6954	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9691	0.0309	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用12年～供用21年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9989	0.0011	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9972	0.0028	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1988年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.3444	0.6556	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9763	0.0237	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9990	0.0010	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2888	0.7112
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1c 推移確率行列同定結果・頁岩(2)

供用開始～供用13年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.2187	0.7813	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.7478	0.2522	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9923	0.0077	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.2486	0.7514	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9803	0.0197
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用13年～供用22年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.0785	0.9215	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9694	0.0306	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.7898	0.2102	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9399	0.0601
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1987年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.6350	0.3650	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.6771	0.3229	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9859	0.0141	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.7952	0.2048	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9626	0.0374
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1c 推移確率行列同定結果・頁岩(3)

供用開始～供用15年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.0001	0.9999	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9665	0.0335	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9942	0.0058	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7982	0.2018
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用15年～供用24年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9757	0.0243	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9724	0.0276	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.6327	0.3673	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8146	0.1854
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1985年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.3235	0.6765	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9677	0.0323	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9873	0.0127	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8512	0.1488
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1c 推移確率行列同定結果・頁岩(4)

最適推移行列						
評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.6133	0.3867	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9422	0.0578	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9834	0.0166	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.7150	0.2850	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9355	0.0645
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1d 推移確率行列同定結果・砂岩(1)

供用開始～供用12年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.0790	0.9210	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.0668	0.9332	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.0668	0.9332	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.0679	0.9321	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9981	0.0019
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用12年～供用21年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9000	0.1000	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1988年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.4160	0.5840	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.0512	0.9488	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.3059	0.6941	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9987	0.0013
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1d 推移確率行列同定結果・砂岩(2)

供用開始～供用13年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.2251	0.7749	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.2289	0.7711	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9945	0.0055	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用13年～供用22年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.1682	0.8318	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9729	0.0271	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1987年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.5195	0.4805	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.5435	0.4565	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9556	0.0444	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9795	0.0205	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1d 推移確率行列同定結果・砂岩(3)

供用開始～供用14年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.3919	0.6081	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.8357	0.1643	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

供用14年～供用23年

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.9000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.0323	0.9677	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9999	0.0001	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

1986年施工・平均化

評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.5246	0.4754	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.8032	0.1968	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9558	0.0442	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.9998	0.0002	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.9999
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.1d 推移確率行列同定結果・砂岩(4)

最適推移行列						
評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.5752	0.4248	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.7561	0.2439	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9202	0.0798	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.8920	0.1080	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9968	0.0032
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

表4.2 推移確率行列同定結果・流れ盤頁岩

最適推移行列						
評価区分	VI	V	IV	III	II	I
VI	0.7342	0.2658	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
V	0.0000	0.8959	0.1041	0.0000	0.0000	0.0000
IV	0.0000	0.0000	0.9917	0.0083	0.0000	0.0000
III	0.0000	0.0000	0.0000	0.8357	0.1643	0.0000
II	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8960	0.1040
I	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

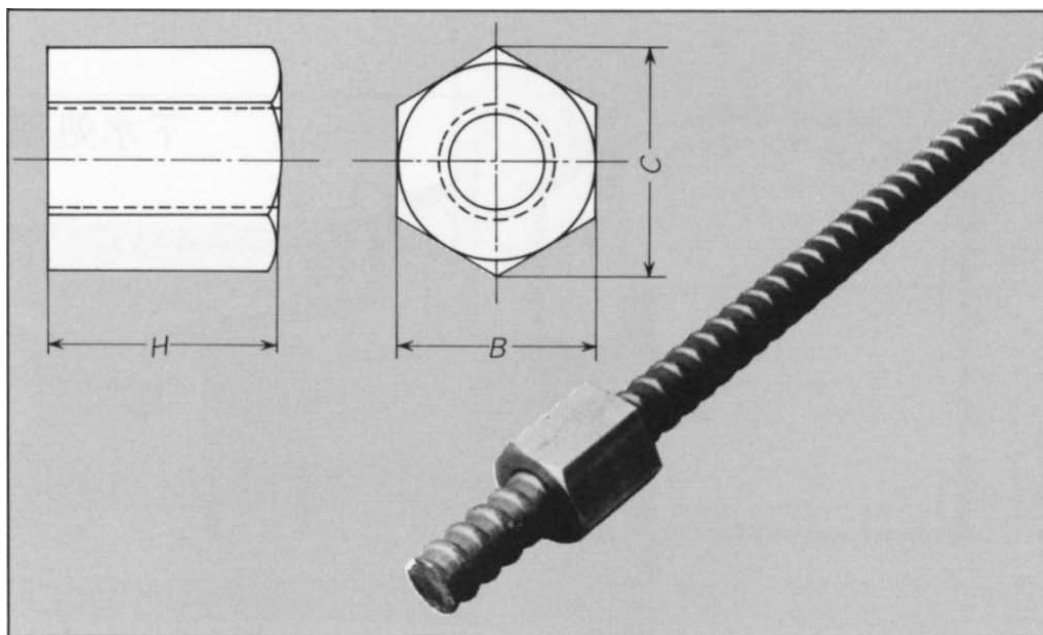


図2.1 鋼棒タイプアンカー

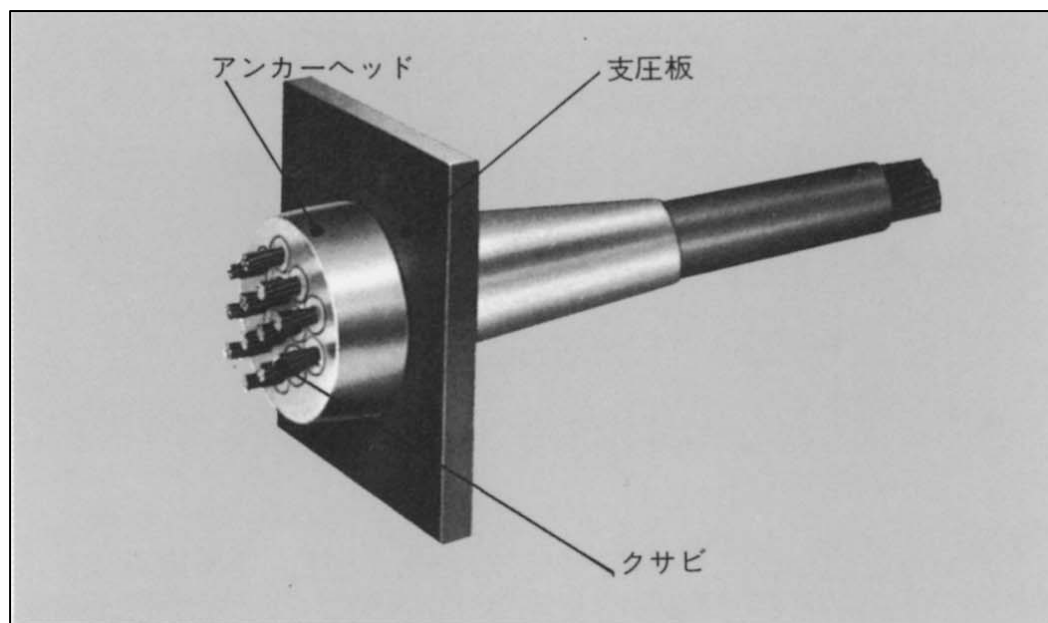


図2.2 より線タイプアンカー

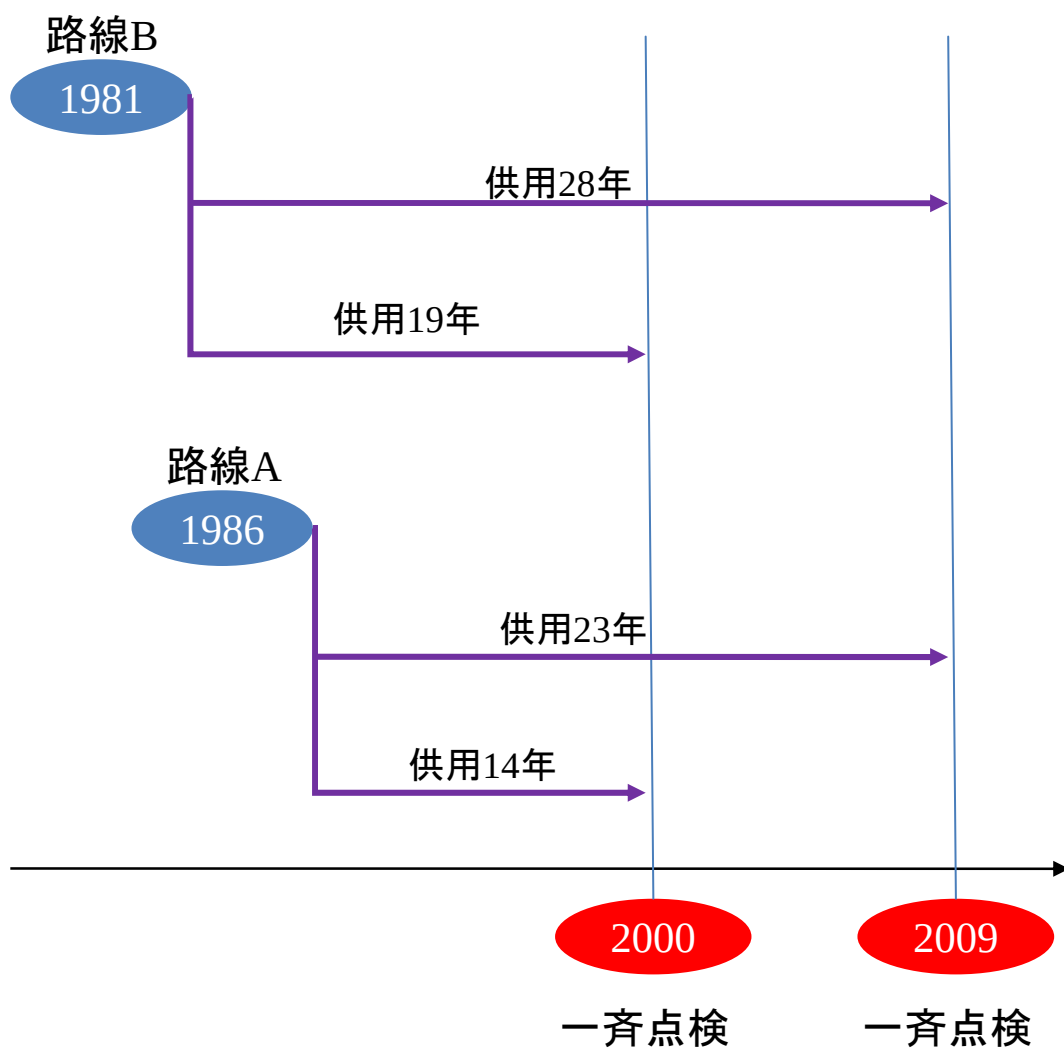


図2.3 グラウンドアンカーの点検結果の使用概念

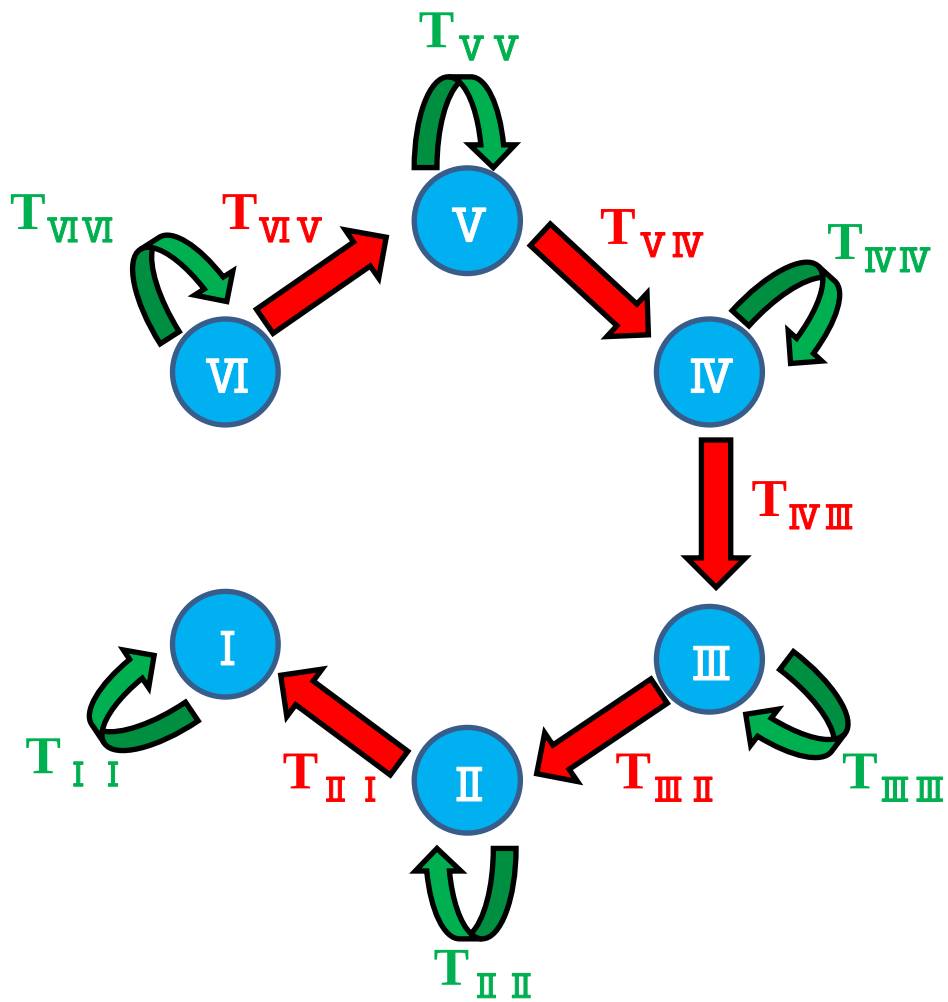


図3.1 推移確率行列の概念図

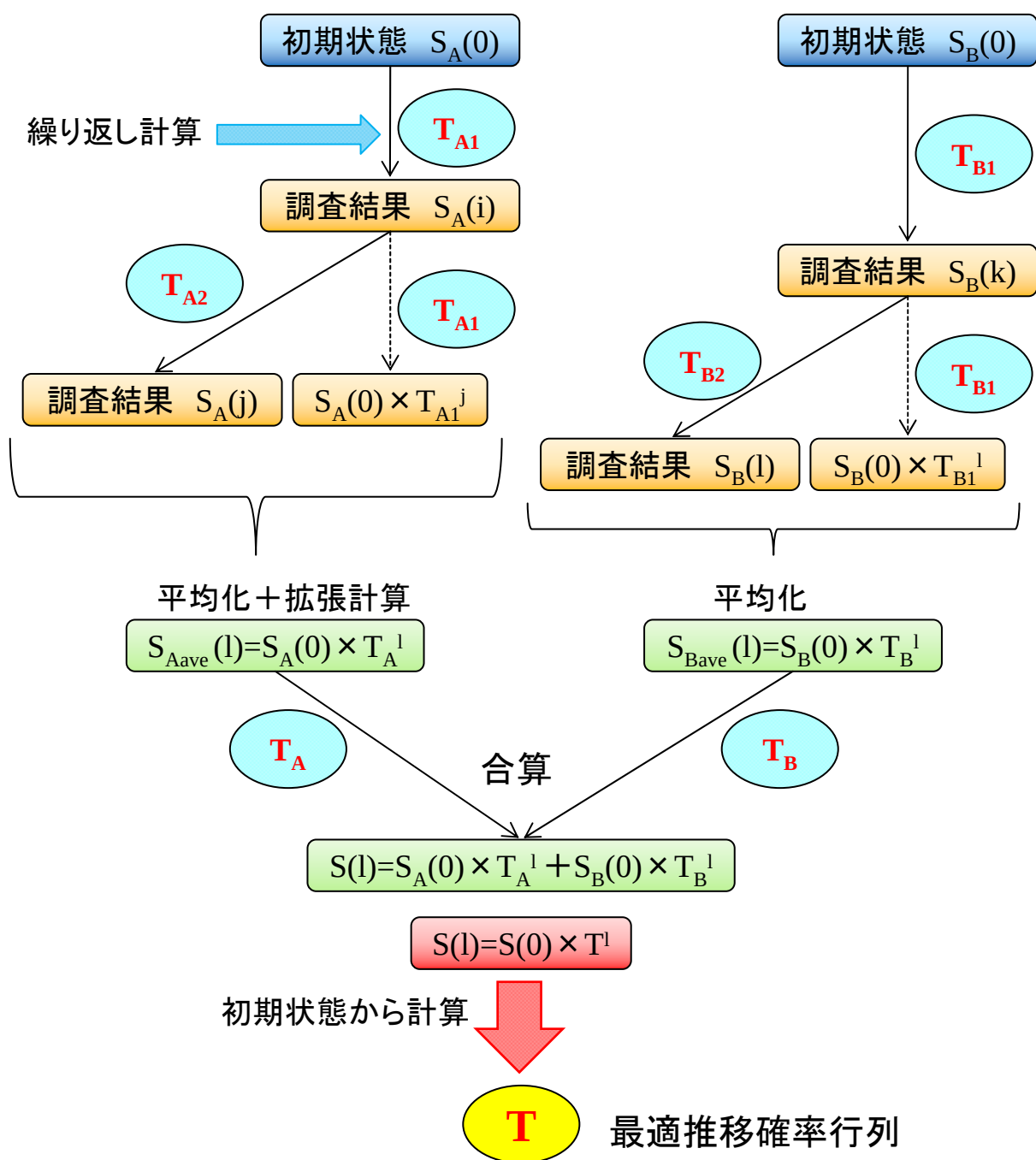


図3.2 最適推移確率行列同定手順

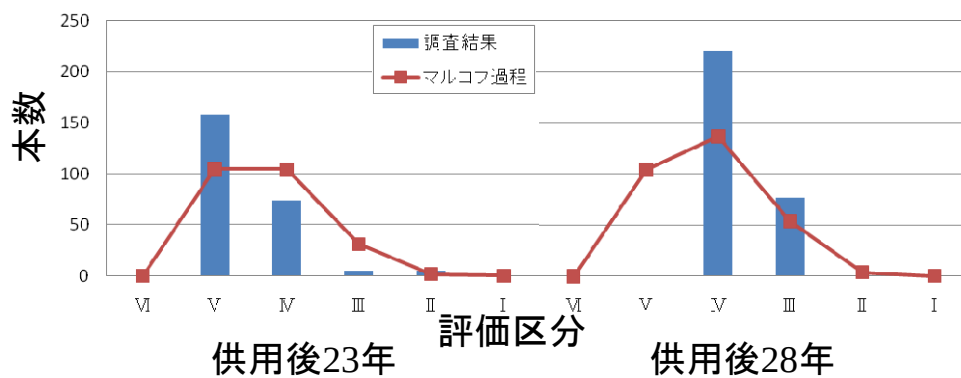
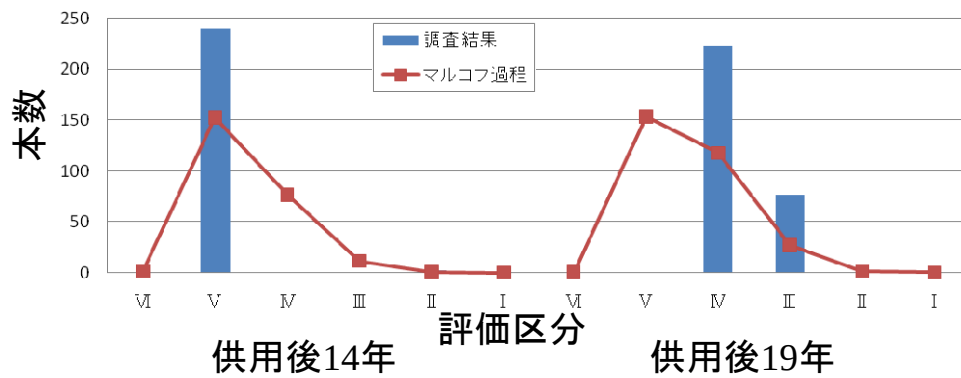


図4.1a 点検結果と解析結果の比較(流紋岩)

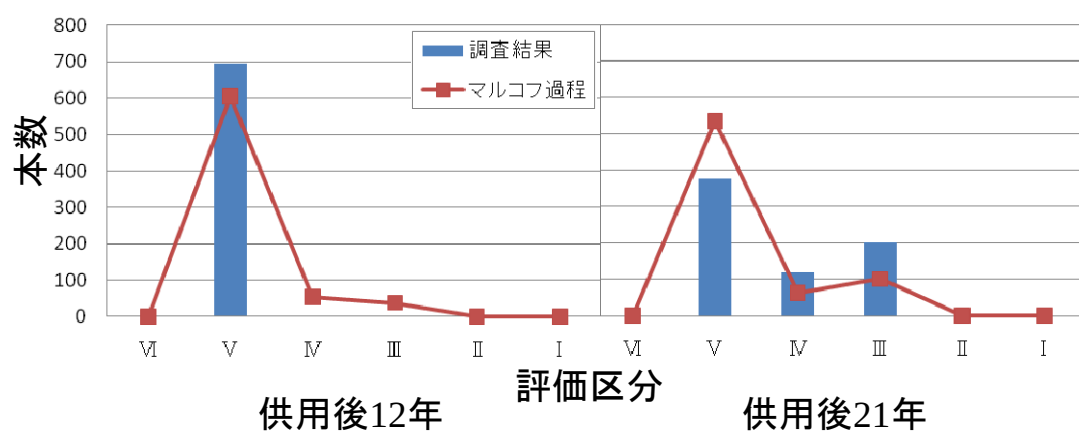


図4.1b 点検結果と解析結果の比較(花崗岩)

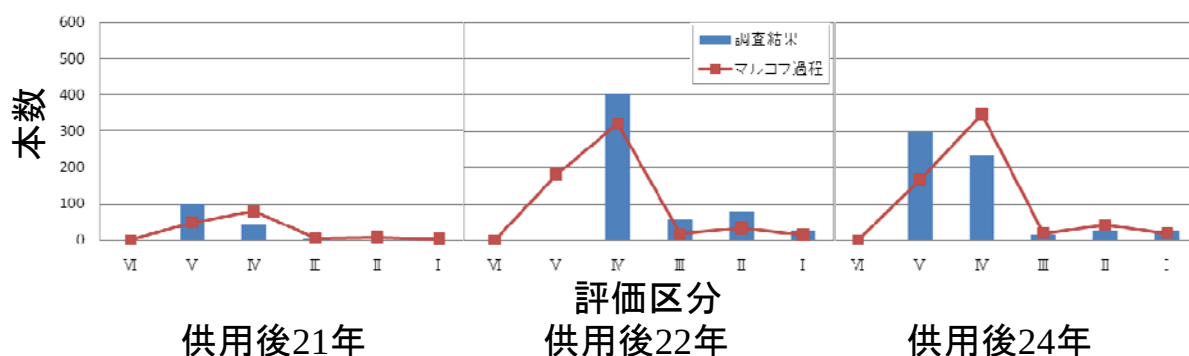
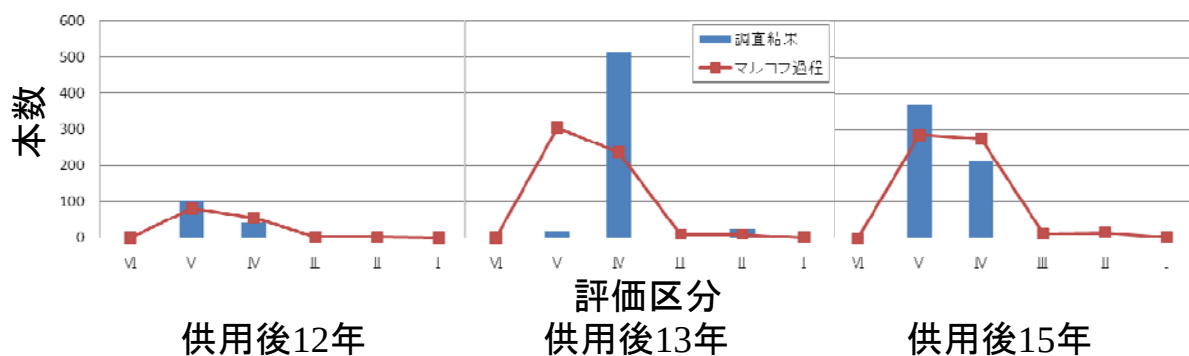


図4.1c 点検結果と解析結果の比較(頁岩)

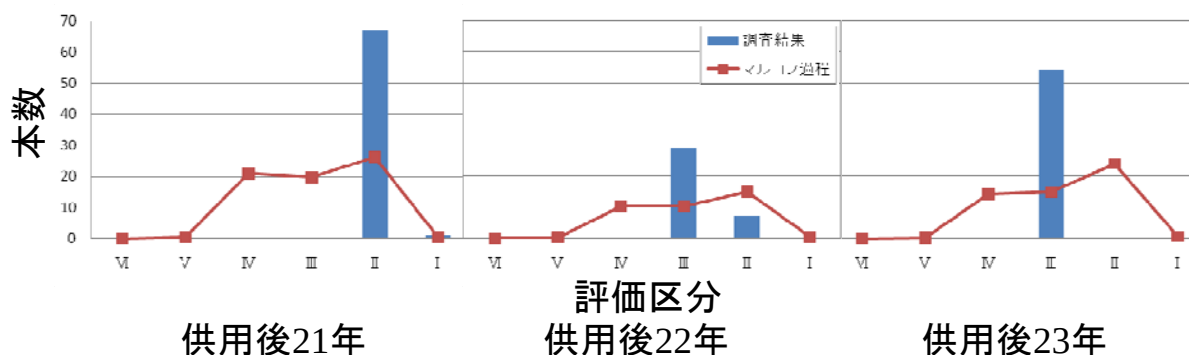
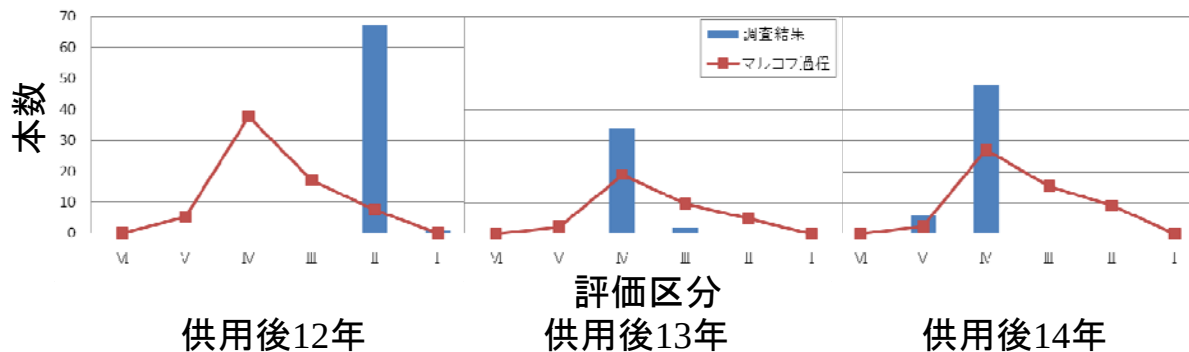


図4.1d 点検結果と解析結果の比較(砂岩)

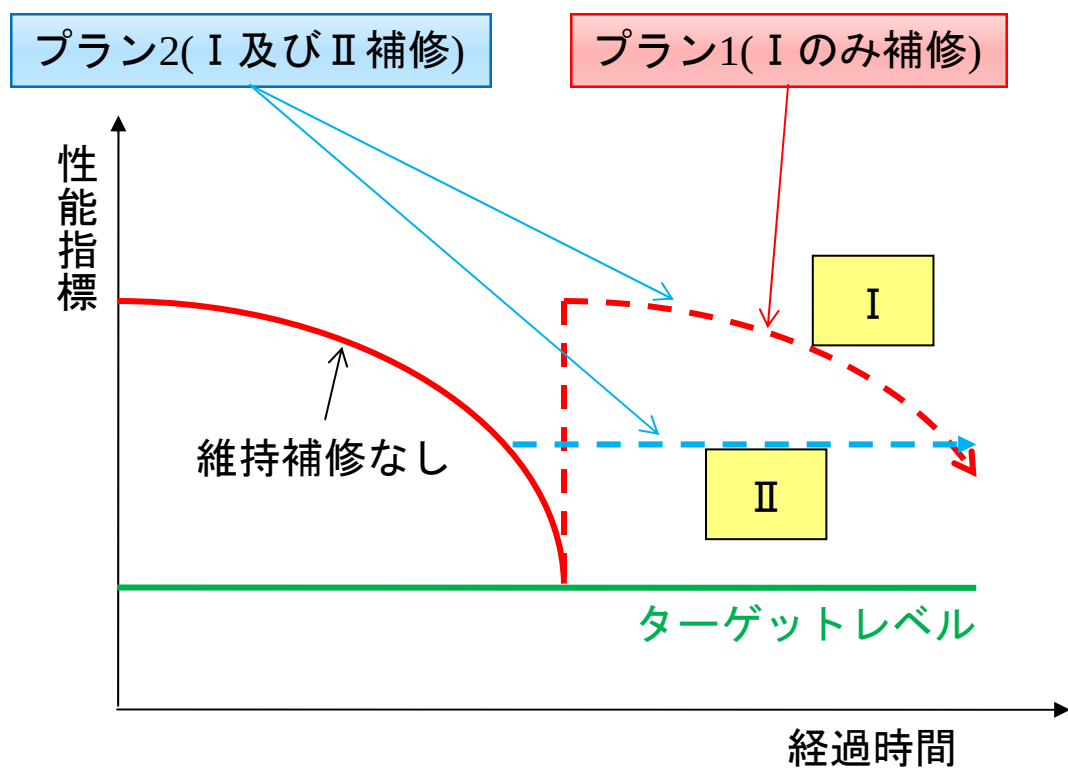


図4.2 維持補修戦略の概要図

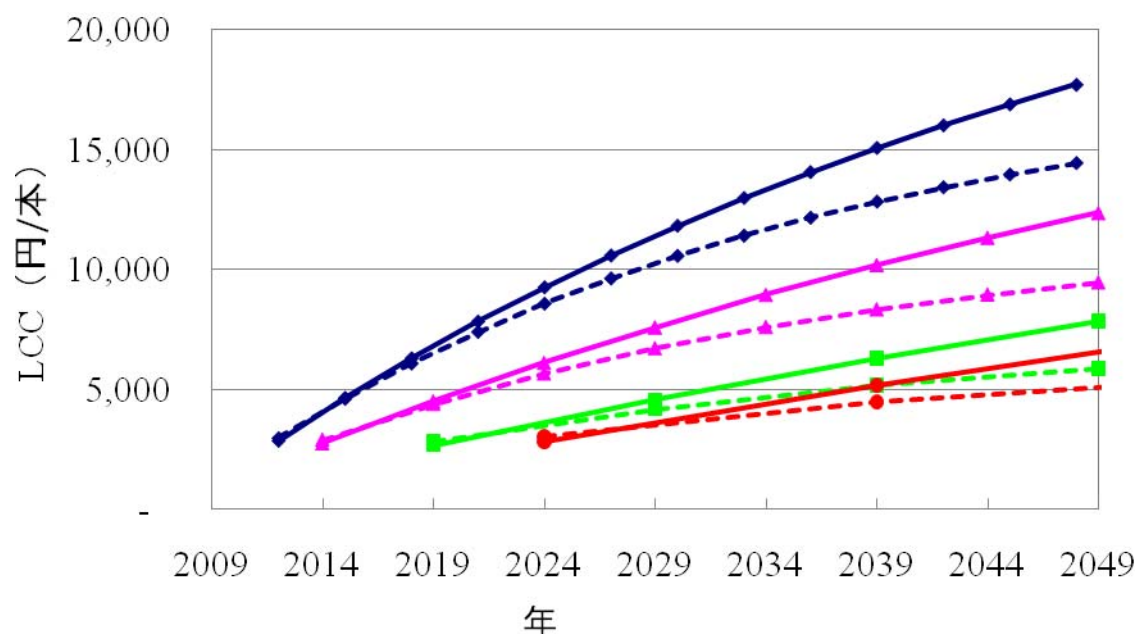


図4.3a 2009年以降40年間のLCC算定結果(流紋岩)

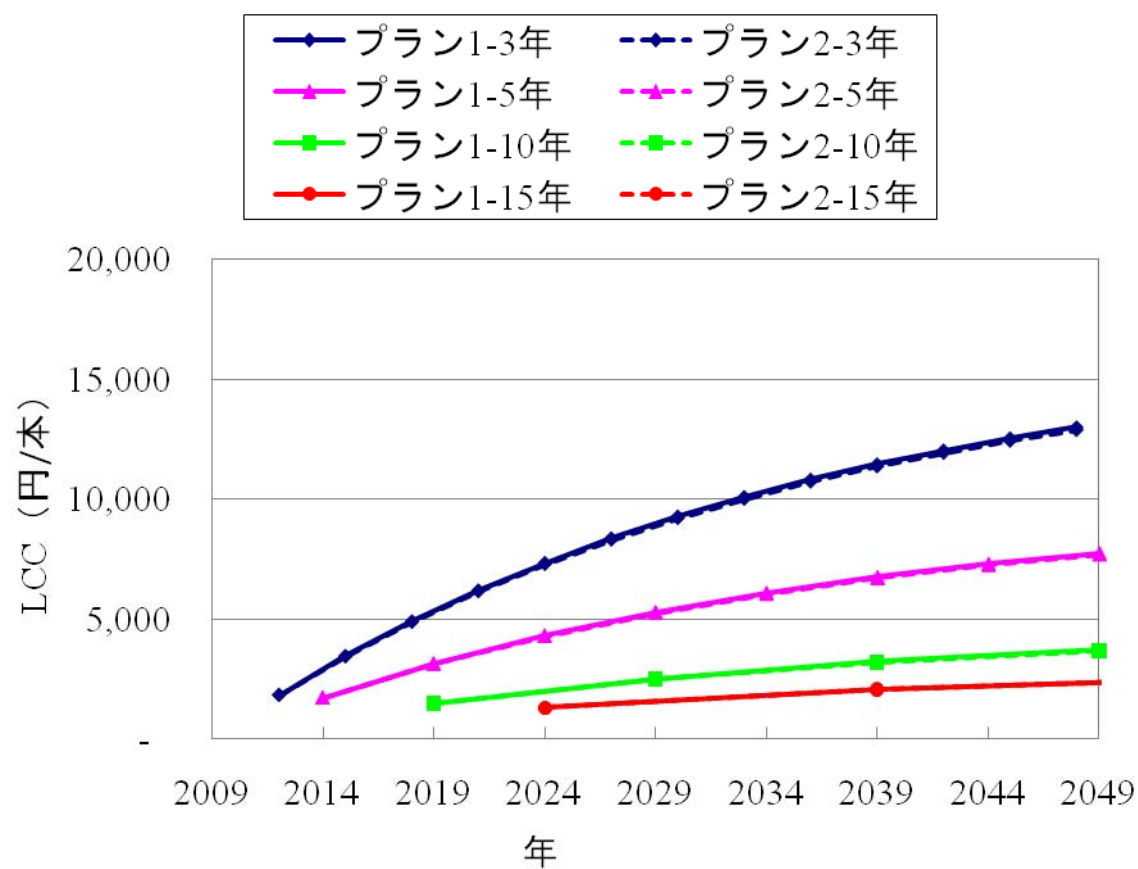


図4.3b 2009年以降40年間のLCC算定結果(花崗岩)

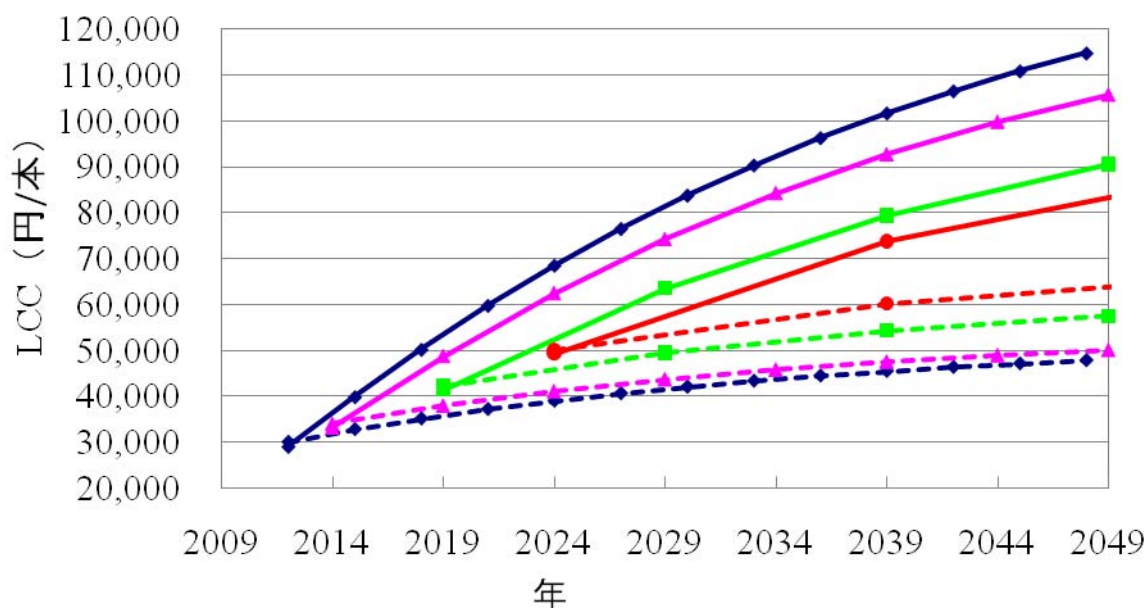


図4.3c 2009年以降40年間のLCC算定結果(頁岩)

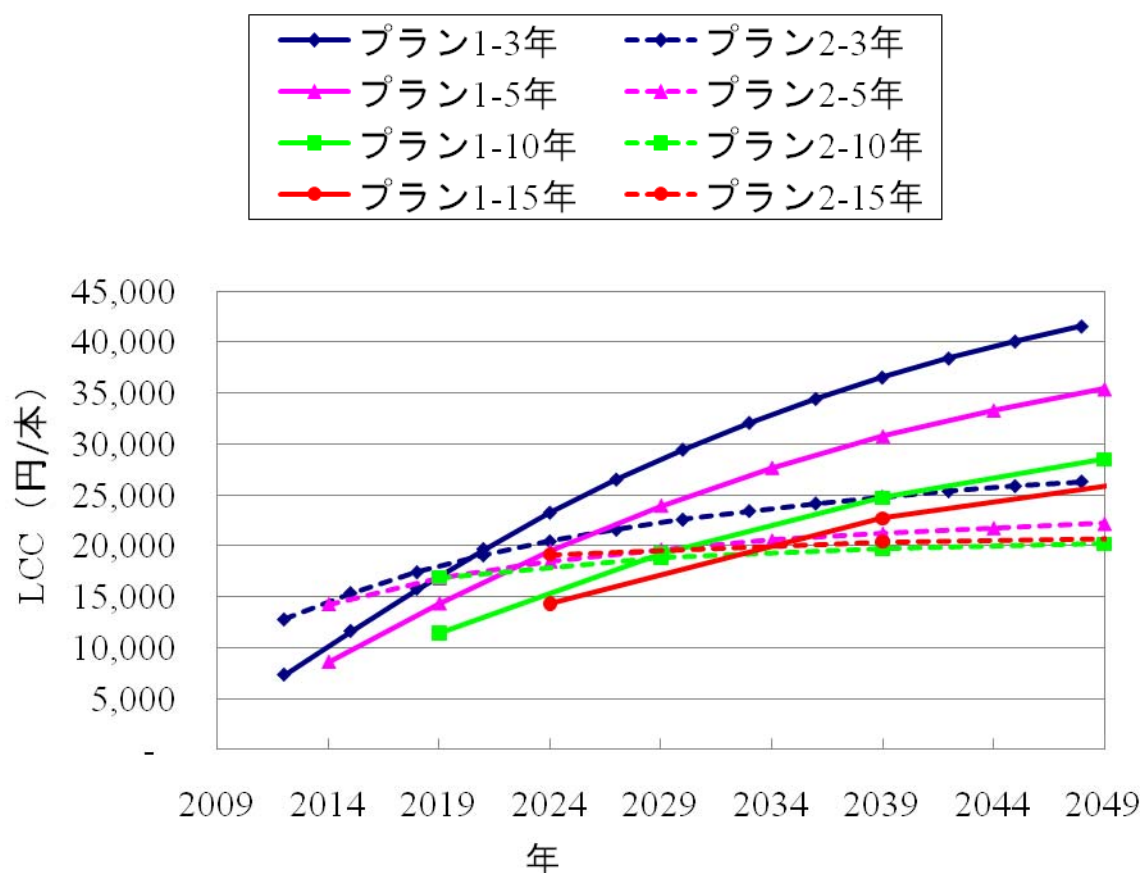


図4.3d 2009年以降40年間のLCC算定結果(砂岩)

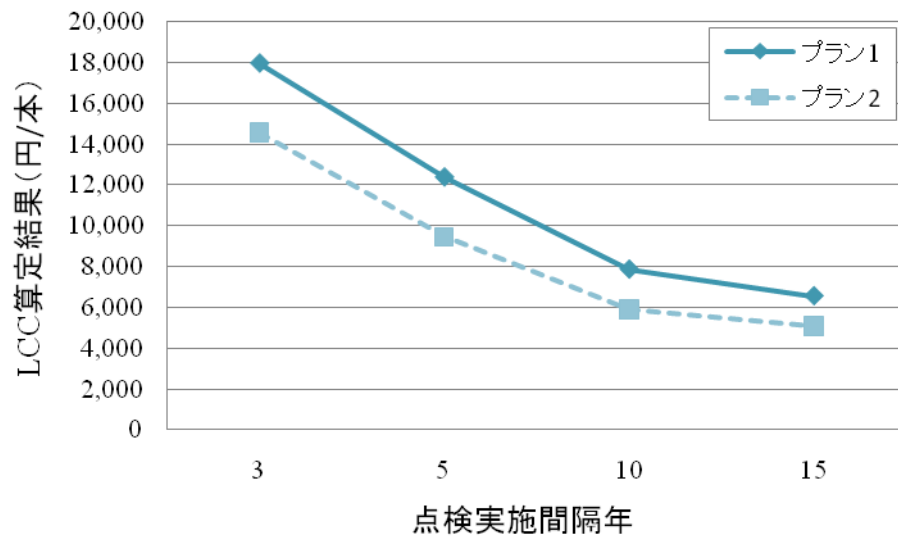


図4.4a 点検実施間隔年数をパラメータとした維持補修費用の比較(2049年・流紋岩)

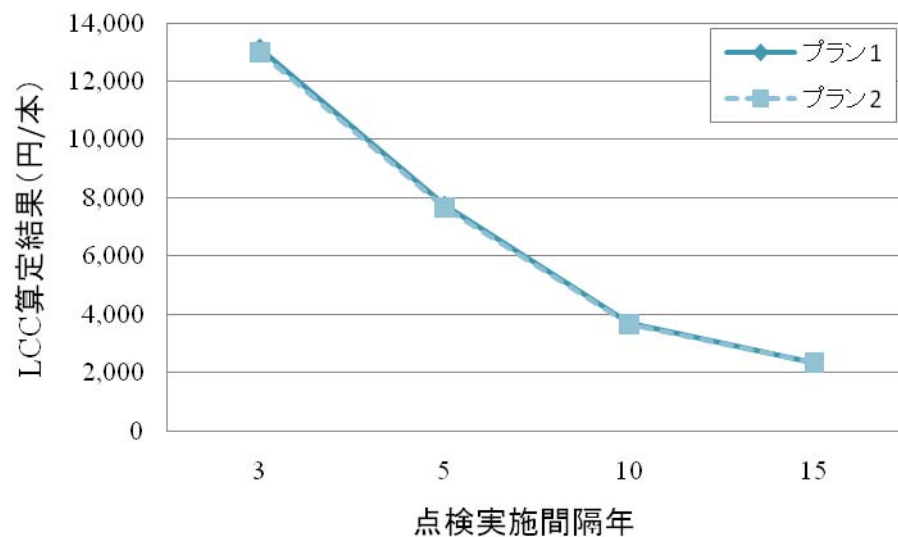


図4.4b 点検実施間隔年数をパラメータとした維持補修費用の比較(2049年・花崗岩)

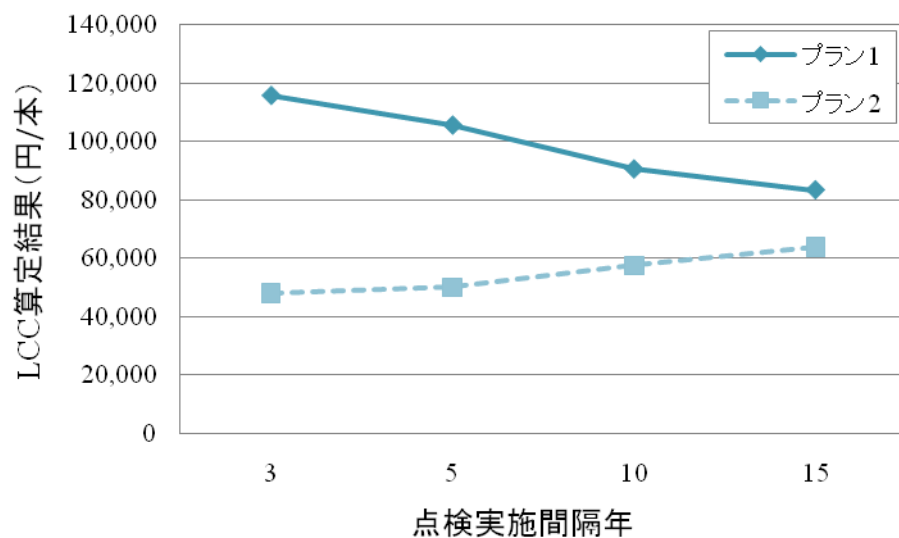


図4.4c 点検実施間隔年数をパラメータとした維持補修費用の比較(2049年・頁岩)

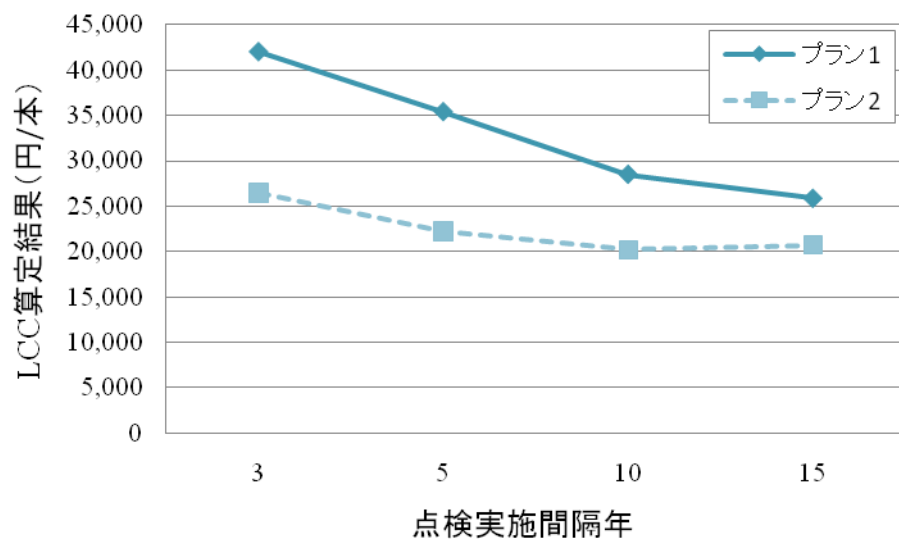


図4.4d 点検実施間隔年数をパラメータとした維持補修費用の比較(2049年・砂岩)

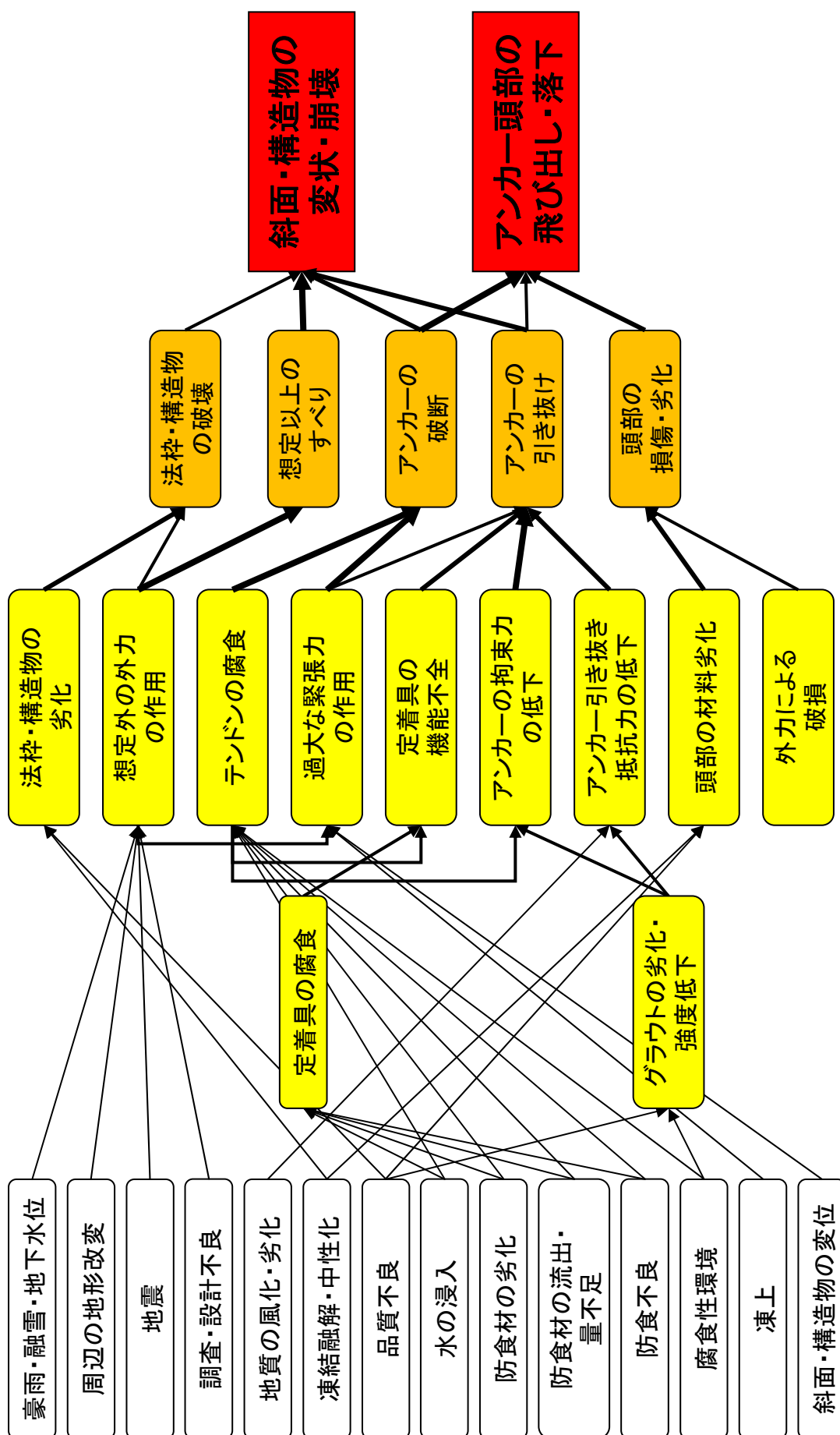


図4.5 グラウンドアンカーの変状の要因と関連図

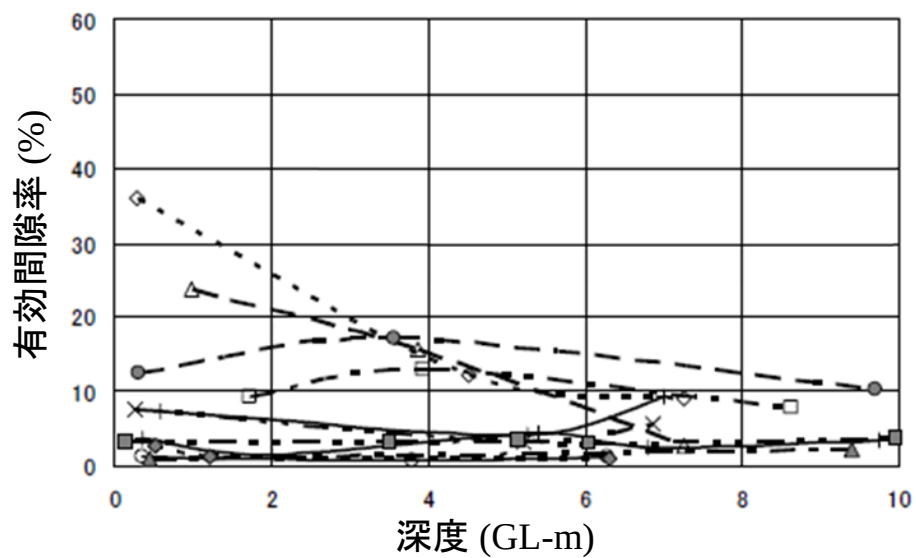


図4.6a 有効間隙率と深度の相関図(中古生代堆積岩)

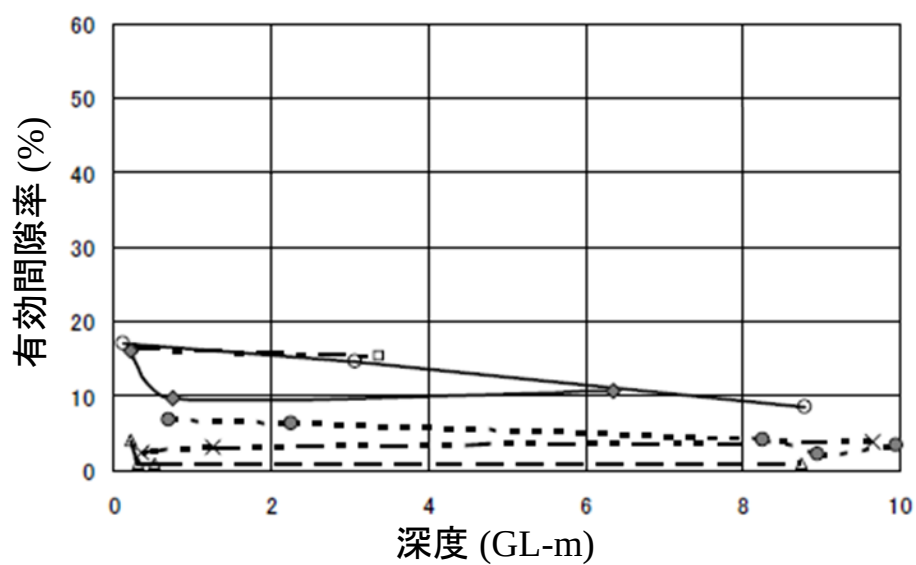


図4.6b 有効間隙率と深度の相関図(火成岩・変成岩類)

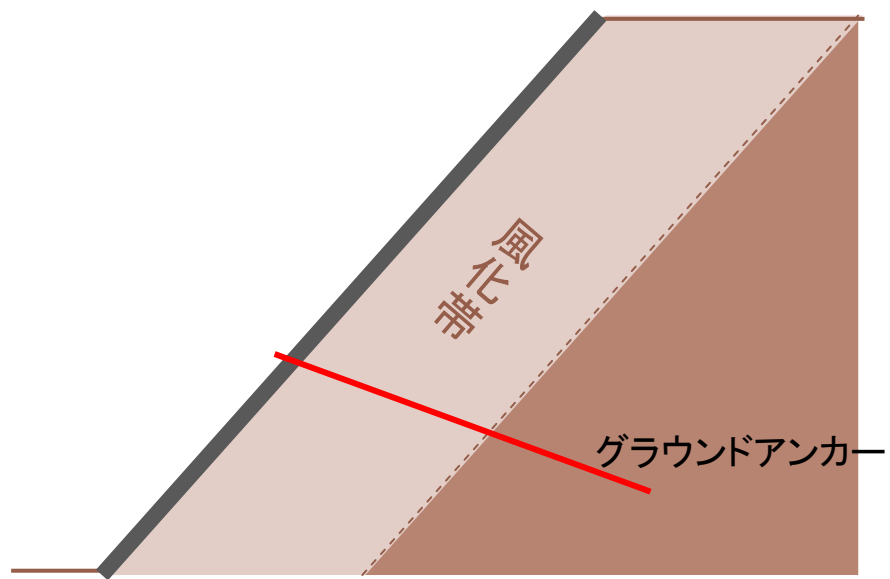


図4.7a 堆積岩の風化帯厚さ

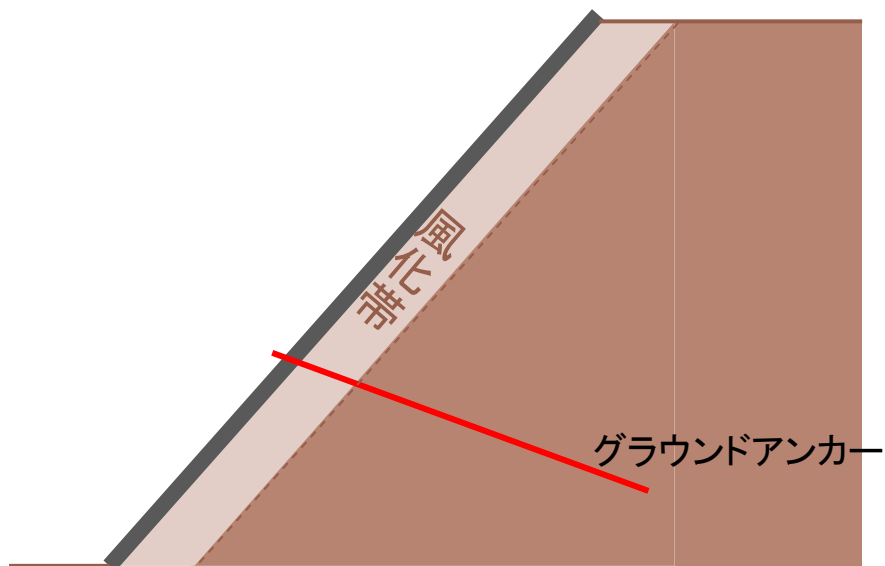


図4.7b 火成岩の風化帯厚さ

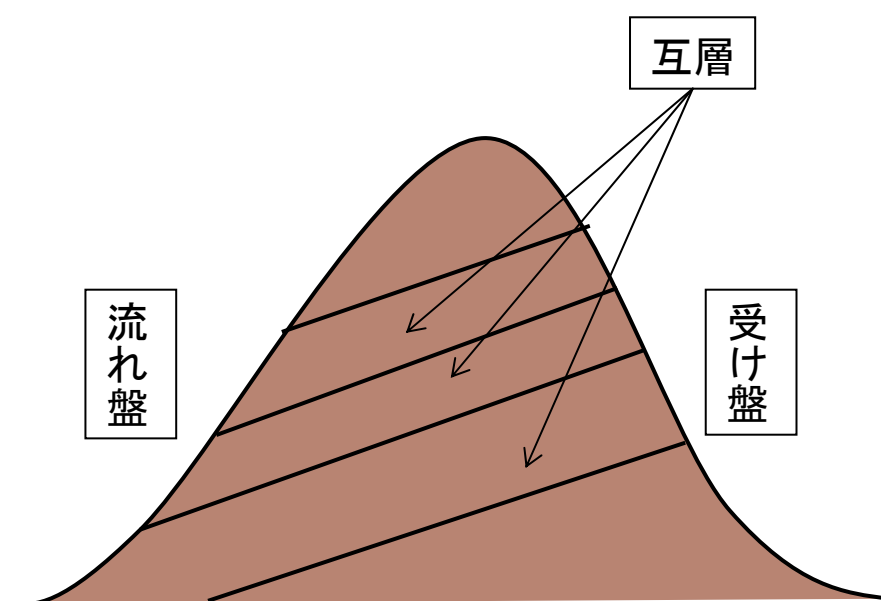


図4.8 流れ盤と受け盤

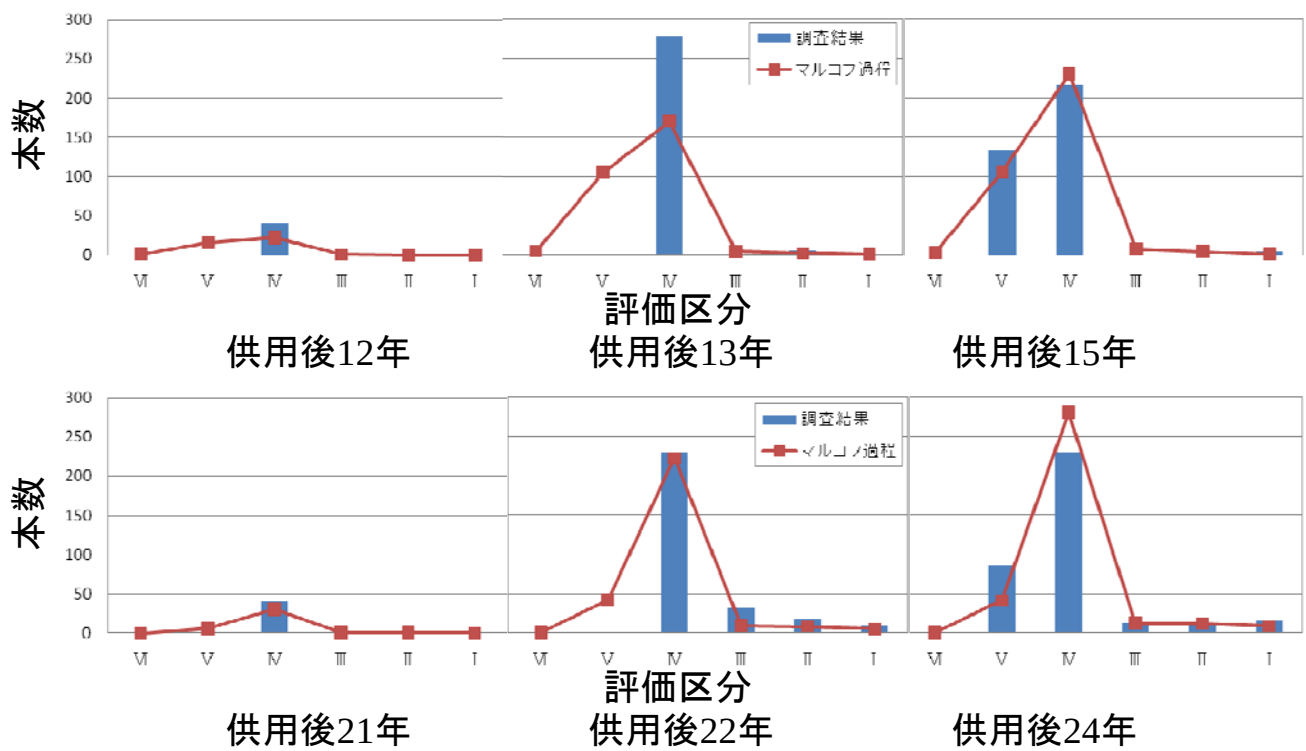


図4.9 点検結果と解析結果の比較(流れ盤頁岩)

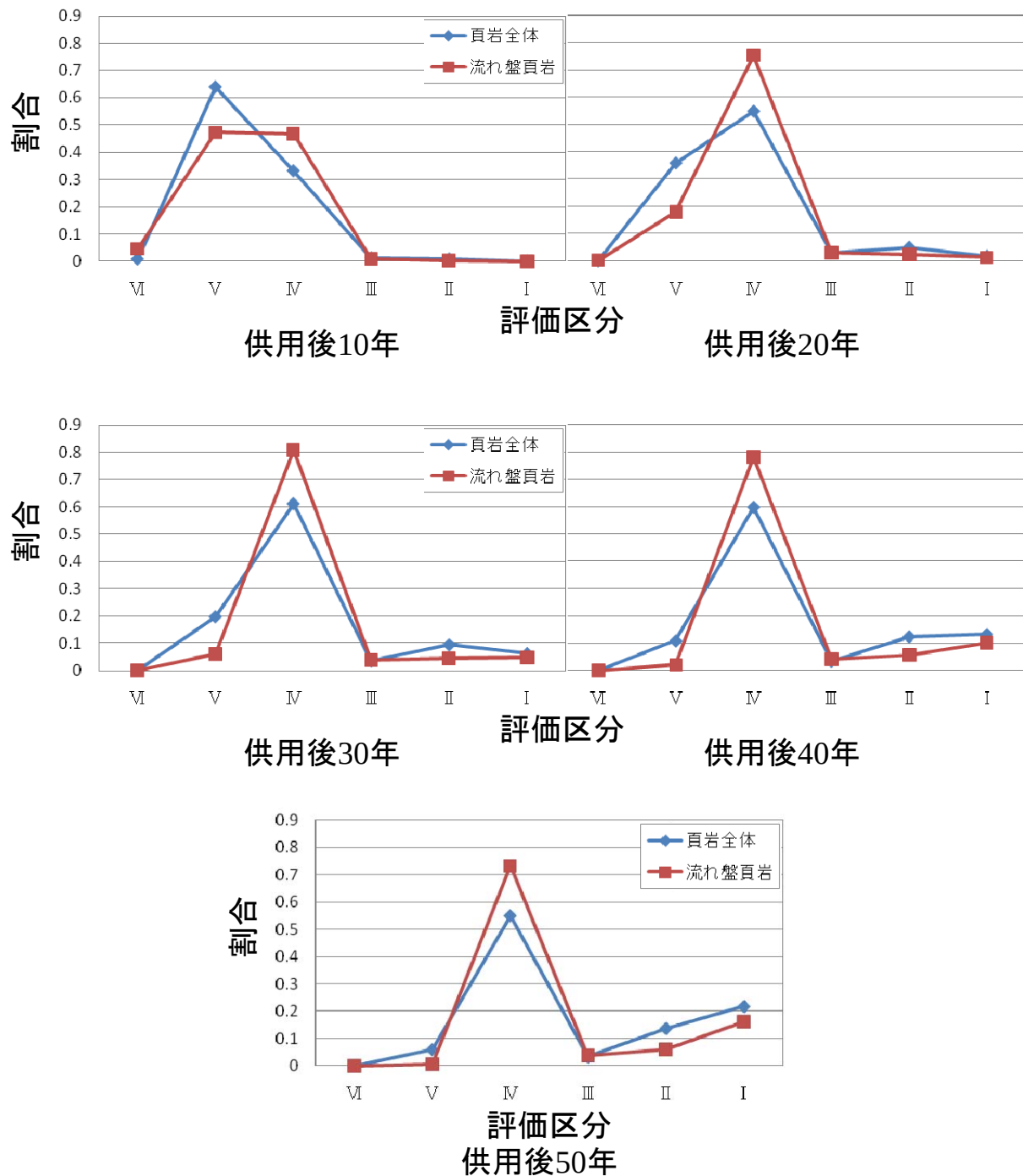


図4.10 頁岩全体と流れ盤頁岩の性能低下過程の比較