京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻修士論文 平成 25 年 3 月 1 日



Master's Thesis Department of Urban Management Graduate School of Engineering Kyoto University March 1, 2013

グラウンドアンカーエの経年劣化および斜面の安定性を

考慮した維持補修計画に関する研究

京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 ジオマネジメント工学講座 土木施工システム工学分野 木許 翔

論文要旨

本研究では、斜面対策工の一つであるグラウンドアンカー工のアセットマネジメントを対象と して、既存の点検結果に基づきグラウンドアンカー工の経年劣化をモデル化し、それに伴う斜面 の安定性の変化を考慮した、マクロ的な観点からの維持補修計画を立案する手法を提案するもの である.その際、目視点検結果に加えリフトオフ試験結果を用いてグラウンドアンカーの経年劣 化をモデル化することで、グラウンドアンカーの経時的な緊張力変化、斜面の安定性、および斜 面が崩壊した際の社会的経済損失を考慮した維持補修の優先順位付けを行う.

具体的には、まずリフトオフ試験結果により得られるグラウンドアンカー内部の緊張力の性能 比の区分分けを行うとともに、非破壊検査結果を用いて、目視点検結果およびリフトオフ試験結 果の精度を検証する.また、グラウンドアンカーが打設されている斜面の地質条件に着目し、目 視点検結果およびリフトオフ試験結果を地質条件毎に分類する.次に、これらの点検結果に確率 過程としてマルコフ過程およびワイブルハザード関数を適用し、 グラウンドアンカーの経時的な 性能低下過程をモデル化するとともに、将来状態を予測する. その際、目視点検結果に基づくマ ルコフ過程モデルに関しては、指数ハザードモデルを適用する.また、この予測結果に対してグ ラウンドアンカー内部の緊張力のモデル化手法を適用し、グラウンドアンカーの経時的な内部緊 張力の変化をモデル化する. さらに, 斜面の安定性評価に関しては, 3 次元の斜面安定解析を行 うことで、より実斜面の状態に近い条件下で斜面の安定性を検討する.斜面の崩壊形態としては、 円弧すべりモデルを適用する.また、グラウンドアンカーの残存緊張力を正規分布を有する確率 変数として,性能関数および斜面の破壊確率を算定する.そして,予測されたグラウンドアンカ ーおよび斜面の将来状態に基づき複数の維持補修計画を立案した中から、ライフサイクルコスト を判断指標として、地質条件毎の最適な補修計画の選択および維持補修の優先順位付けを行い、 点検間隔および斜面毎の補修の有用性に関する検討を行う. その際, グラウンドアンカーおよび 斜面の将来予測結果はマルコフ過程モデルに基づく結果とワイブルハザードモデルに基づく結 果の2通りとなるため、それぞれに異なる維持補修計画を立案し、そのライフサイクルコスト算 定結果の比較検討を行う.

本研究で得られた成果として、本研究で提案する手法によって、グラウンドアンカーの経年劣 化および斜面の安定性を考慮した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り、ま た地質条件毎に補修の優先順位付けが可能となった.また、旧タイプ鋼棒タイプのグラウンドア ンカーに関して、グラウンドアンカー頭部の損傷(浮き・クラック)、グラウンドアンカー本体の 断面欠損、および内部緊張力の低下にある程度の相関性が確認された.ただし、あくまで点検員 の主観量である目視点検結果は、客観量であるリフトオフ試験結果での数値と比較して、性能低 下速度を過小評価している可能性が指摘された.さらに、既往の研究で用いられてきたマルコフ 過程モデルは、グラウンドアンカーの性能低下および斜面の破壊確率を過小評価している危険性 があることが示唆され、本研究ではワイブルハザードモデルを適用することで、これらの危険性 を評価できたものと推察される.

i

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	5
1.3	既往の研究	6
1.4	本論文の構成	8

2.1	アンカーの種類	. 9
2.2	目視点検結果	10
2.3	リフトオフ試験結果	12
2.3.1	リフトオフ試験結果の概要	13
2.3.2	アンカーのプレストレスカ	15
2.3.3	アンカー緊張力の健全度ランクの設定	16
2.4	点検結果の分析	18
2.4.1	アンカー緊張力の健全度ランクの検証	18
2.4.2	目視点検結果の検証	19
2.4.3	目視点検結果とリフトオフ試験結果の比較	21

	3.1	統計化手法の基本概念に関する比較	23
;	3.2	マルコフ過程を用いた性能低下モデルの概要	24
	3.2.1	健全度と定期検査スキーム	24
	3.2.2	2 マルコフ過程モデルの概要	25
	3.2.3	3 指数ハザードモデル	26
	3.2.4	推移確率の導出	28
	3.2.5	5 推移確率の推定方法	30
	3.2.6	筋 簡易モデルによる性能低下のモデル化	32
	3.3	ワイブルハザードモデルを用いた性能低下モデルの概要	34
	3.3.1	モニタリング情報の不完全性	34
	3.3.2	2 ワイブルハザードモデルの概要	36
	3.3.3	パラメータの導出	36
	3.3.4	損傷/健全の判定区分	38

3.4	性能低下過程の異質性	9
-----	------------	---

第 4	章	斜面の安定性評価手法	
4.	1	アンカーの緊張力変化のモデル化	40
	4.1.1	マルコフ解析結果に基づくアンカーの緊張力変化のモデル化	41
	4.1.2	ワイブル解析結果に基づくアンカーの緊張力変化のモデル化	42
4.	2	斜面安定解析	43
	4.2.1	2 次元斜面安定解析手法	43
	4.2.2	3 次元斜面安定解析手法	44
4.	3	斜面の破壊確率算定手法	45

第5章	維持補修計画の最適化手法	47
5.1	維持補修計画の立案	47
5.1.1	マルコフ解析結果に基づく維持補修計画の立案	
5.1.2	ワイブル解析結果に基づく維持補修計画の立案	49
5.2	維持補修計画の LCC 評価手法	50
5.2.1	LCC の定式化	50
5.2.2	崩壊時損失額の算定手法	

第6章	アンカーの維持補修計画の適用事例	54
6.1 マ	ルコフ解析結果	54
6.1.1	目視点検結果に基づくマルコフ解析結果	54
6.1.2	リフトオフ試験結果に基づくマルコフ解析結果	58
6.1.3	マルコフ解析結果に関する考察	61
6.2 ワ	イブル解析結果	63
6.2.1	目視点検結果およびリフトオフ試験結果に基づくワイブル解析結果	63
6.2.2	ワイブル解析結果とリフトオフ試験結果の比較	64
6.2.3	ワイブル解析結果に関する考察	66
6.3 点	検結果および性能低下モデルによる解析結果の比較	67
6.3.1	解析結果の比較	67
6.3.2	解析結果の比較に関する考察	69
6.4 斜	面の破壊確率	70
6.4.1	解析条件	70
6.4.2	斜面の破壊確率算定結果	71
6.4.3	斜面の破壊確率算定結果に関する考察	74

6.5	LCO	C 算定結果	77
6.5.1	1	各種費用の設定	77
6.5.2	2	LCC 算定結果	78
6.5.3	3	LCC 算定結果に関する考察	82
6.6	地質	賃条件がアンカーの性能低下に及ぼす影響に関する考察	86

参考文献	92
謝辞	94

第1章 序論

1.1 本研究の背景

我が国の道路・港湾・橋梁に代表される社会資本の多くは,図 1-1 に示すように 1960 年~1970年の高度経済成長期以降に急速かつ大量に整備され,そのストック額は 2009年 時点で 785兆円に達している¹⁾.そして,同時期に建設された社会資本はすでに供用開始 から 30~40年以上の期間を経過しており,経年劣化が顕在化しつつある.表 1-1に示すよ うに,建設後 50年以上経過する社会資本の割合は今後 20年間で急増し,これらの社会資 本は今後急速に老朽化が進行すると想定されている²⁾.このため,今後,老朽化した社会 資本の更新,維持管理費の増大が見込まれるが,現状ではこの維持管理が必ずしも十分に は実施されて来なかったと指摘されている.その一因として,予算構造に起因する課題が 挙げられる.

地方公共団体の経費は、その経済的な性質によって、表 1-2 に示すように、義務的経費、 投資的経費およびその他の経費に大別することができる³⁾. なお、その他の経費に分類さ れる「維持補修費」は、社会資本の維持管理ではなく、高熱水料費あるいは建物の維持修 繕費のように、事前に費用の発生が確定しているものが該当する. そして、舗装、橋梁、 トンネルの調査費、点検費、設計費、補修費などは、表 1-2 に示す予算構成で、投資的経 費に区分される. また、地盤構造物の代表である道路斜面の点検、調査・設計、事前対策 の費用は、舗装、橋梁、トンネル等の道路施設の道路補修費とは別に、災害防除として区 分される. 同表に示す通り、地方公共団体の予算の大部分は義務的経費として充当され、 社会資本の維持管理に係わる投資的経費は、予算全体の僅か 14.2%である. このような背 景から、社会資本全般に対して、新設と比較して維持管理には十分な予算が充当されて来 なかったといえる.

一方で,社会資本への投資額そのものに関しては,1990年代をピークに減少してきており,2009年時点ではピーク時の半分程度まで減少している.今後も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,社会資本への投資額が急激に増大することは期待できない.今後の投資総額の伸びが2010年度以降対前年度±0%で,維持管理・更新に従来どおりの費用の支出を継続すると仮定すると,2037年度には維持管理・更新費が投資総額を上回り,2011年度から2060年度までの50年間に必要な更新費(約190兆円)のうち,約30兆円(全体必要額の約16%)の更新ができないとみられている²⁾.



図 1-1 社会資本ストックの推移¹⁾

	2010年度	2020年度	2030年度
道路橋	約8%	約26%	約53%
排水機場,水門等	約23%	約37%	約60%
下水道管きょ	約2%	約7%	約19%
港湾岸壁	約5%	約25%	約53%

表 1-1 建設後 50年以上経過する社会資本の割合²⁾

表 1-2 地方公共団体の予算構成³⁾

区分	内訳	決算額(億円)	構成比
義務的経費	人件費, 扶助費, 公債費	477,233	50.4%
投資的経費	普通建設事業費, 災害復旧事 業費, 失業対策事業費	134,961	14.2%
その他の経費	物品費、維持補修費など	335,556	35.4%
合計		947,750	100.0%

このような背景の下,近年社会資本の維持管理・更新に関する戦略的な意思決定手法と して,アセットマネジメントという概念が導入されてきた⁴⁾.ここで,アセットマネジメ ントとは,単なる「維持管理の高度化」ではなく,アメリカ連邦道路局 Federal Highway Administrationの定義⁵⁾にあるように,構造物の中長期的な維持管理に関して,工学的知識 にビジネス・経済的感覚を加え、合理的に意思決定を行う方法論ととらえるべきである. 近年の厳しい予算制約の下では、このアセットマネジメントの観点から社会資本の維持管 理・更新を行い、ライフサイクルコスト(以下 LCC と称す)の縮減、社会資本の長寿命化を 行っていくことの重要性が唱えられている.

アセットマネジメントの概念は、近年主に道路舗装や橋梁等の分野において実際に導入・適用されて来ている.一方、地盤構造物の分野においては、アセットマネジメントという概念を適用することの必要性および有益性について、必ずしも統一した認識が共有されているとは言えない^{6),7)}.その一因としては、地盤構造物に関する経年劣化という現象について共通認識が得られていないことが挙げられる.例えば、地盤構造物の代表例である斜面において、長期的にその安定性を損なう要因は、地盤の劣化と斜面対策工の性能低下の2項目に分離される.この内、地盤の劣化は、主として風化に起因するものと解釈されるが、一般的には風化現象は数千年あるいは数万年という長期にわたる現象である.これに対して、斜面対策工の性能低下は、既往の研究⁸⁾⁻¹⁰⁾において示されているように、比較的短期間に生じるものであり、斜面の安定を阻害する要因となることが知られている.

このような状況を踏まえて、本研究では、道路構造物のうち斜面対策工の一つであるグ ラウンドアンカーエ(以下アンカーと称す)のアセットマネジメントを対象とする.

アンカーは,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 12 万本以上にのぼる. 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,アンカーの緊張力の低下,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. その中でも特に, 防食に関する基準¹¹⁾が定められる 1988 年以前のアンカー(以下旧タイプアンカーと称す) においては腐食に伴う激しい劣化が顕在化しており,早急な対応が求められている. その ため,前述の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.

前述の予算制約より、アンカーにおいて全本を対象として行われる点検調査は、アンカ ーヘッドの損傷を点検員が目視によって調査する目視点検である.したがって、アンカー を対象としたアセットマネジメントも、この目視点検結果に基づいて行う必要がある.し かし、健全度ランクのような離散量で表される目視点検においては、一般的に点検員によ る判定基準の違い、すなわちバイアスの影響が存在することが指摘されている^{12),13)}.さら に、アンカーで補強された斜面において、その性能低下に起因して発生する重大な事象に 結びつく要因とその影響は複雑に関連している¹⁴⁾.このため、目視点検結果あるいは力学 試験(非破壊検査、リフトオフ試験)結果より得られるアンカーの性能低下過程は、すべて が同一ではない可能性が高い.したがって、目視点検によりアンカーヘッドの損傷状態は 確認されるが、その力学的損傷状態を把握するためには、リフトオフ試験により測定され た残存緊張力および非破壊検査により判定される損傷状況を用いることが不可欠である.



図 1-2 技術者の観点に基づくアセットマネジメントのフロー



図 1-3 管理者の観点からのアセットマネジメントのフロー

ここで,次節以降での本研究の位置付けを明確にするため,既往のアセットマネジメントにおける LCC 評価手法に関する比較検討について述べる.

まず,図1-2に示すように,LCCは,技術者の観点からは,点検結果に基づくランク分けの後,性能低下過程のモデル化/予測,および性能照査に基づいて算定される.上記のフローでは,性能低下過程のモデル化ではモニタリング結果に基づく性能低下曲線を算定するとともに,その性能低下過程に基づいた性能照査として,劣化程度によりどの程度構造物の安全性が損なわれるかを評価することが必要となる(ミクロ的検討).

これに対して,既往の舗装・橋梁等を対象としたアセットマネジメントに関する研究報告においては,管理者の観点から,図1-3に示すように異なるフローに基づきLCCが評価されている.すなわち,同図に示すように,点検結果に基づくランク分けの後,統計的手法を用いて劣化過程のモデル化はなされるが,明示的には性能照査はなされていない.このため,統計モデルを用いて予測した劣化過程に基づき,必要となる点検費用および対策費用を合わせたものがLCCとなる(マクロ的検討).

このような違いが存在する理由の一つとしては、舗装の場合には、斜面問題と異なり劣 化程度によりどの程度構造物の安全性が損なわれるかの検討は不要であることが挙げられ る.加えて、舗装での点検結果に基づくランク分けは、実際には車両の走行性に関する基



図 1-4 マクロ的検討およびミクロ的検討におけるアセットマネジメントのフロー

準,例えば乗り心地指数 MCI あるいはラフネス指数 IRI が適用されることから,すでに性 能照査が実施されているとも解釈される.

一方,本研究で対象とするアンカーの性能低下を対象としたアセットマネジメントでは, 図 1-2 と図 1-3 のいずれのフローを適用すべきかは,新たな検討課題となる.ここで,ア ンカーは斜面を安定させる対策工であることから,舗装とは異なり,その性能低下は直接 斜面崩壊とリンクする要因となる.その反面,前述のように,アンカーの性能低下過程は, モニタリング結果より統一的な劣化曲線を算定するのは困難であることに加えて,モニタ リング結果より劣化曲線が算定しても,その結果は内挿結果を外挿することで将来状態を 予測することになるため不確実性を含むものとなる.

このような課題に対処するためには、アンカーの性能低下を対象としたアセットマネジ メントでは、図1-4に示すように、マクロ的検討およびミクロ的検討において、それぞれ 図1-2と図1-3のフローを使い分ける必要性がある.すなわち、アンカー全本を対象とし た、路線/区間単位の維持補修に関する検討(マクロ的検討)においては、図1-3の検討フロ ーに準じて、目視点検結果および力学試験結果での健全度ランクを用いた統計手法による 劣化過程の予測に基づき、維持補修計画を立案する.ただし、その過程においては、図1-2 の検討フローに準じて、力学試験結果により得られる力学的損傷状態を反映させた、斜面 の安定性に関する検討(ミクロ的検討)を加えることが必要であるといえる.

1.2 本研究の目的

本研究では,斜面対策工の一つであるアンカーのアセットマネジメントを対象として, 既存の点検結果に基づきアンカーの経年劣化をモデル化し,それに伴う斜面の安定性の変 化を考慮した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、まずリフトオフ試験結果により得られるアンカー内部の緊張力の性能比の

区分分けを行うとともに、非破壊検査結果を用いて、目視点検結果およびリフトオフ試験 結果の精度を検証する.次に、アンカーが打設されている斜面の地質条件毎に分類した目 視点検結果およびリフトオフ試験結果に、統計的手法としてマルコフ過程およびワイブル ハザードモデルを適用し、アンカーの経時的な性能低下過程をモデル化するとともに、将 来状態を予測する.また、この予測結果に対してアンカー内部の緊張力のモデル化手法を 適用し、さらに3次元の斜面安定解析を行うことで、より実斜面の状態に近い条件下で斜 面の安定性を検討し、斜面の破壊確率を算定する.そして、予測されたアンカーおよび斜 面の将来状態に基づき、複数の維持補修計画を立案した中から、LCC を判断指標として、 地質条件毎の最適な補修計画の選択および維持補修の優先順位付けを行い、点検間隔およ び斜面毎の補修の有用性に関する検討を行うものである.

なお、本研究でアセットマネジメントの対象とするアンカーは、旧タイプアンカーのう ち、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)である. ただし、リフトオフ試験結果に関しては、そのサンプル数の制約より、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)、および 防食に関する基準¹¹⁾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)のデータも使用する(第2章で詳説する).

1.3 既往の研究

本節では、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^{12),13}は,アンカーの維持補修に関するマクロ的視点からの検討として,目視点検 結果に基づくアンカーの健全度ランクに対してマルコフ過程を用いて,性能低下過程およ び補修過程を表現するモデル化手法を開発しそのモデル化手法の有効性について示すとと もに,LCC評価による路線/区間単位の補修優先順位付けに関する検討手法を示した.なお, ここではアンカーの性能低下過程をモデル化するにあたり,点検結果の制約条件から,複 数の過程条件を設けた簡易モデルを用いている.

一方,アンカーの維持補修に関するミクロ的視点からの検討として,大津ら¹⁰⁾は,アン カーの性能低下について,アンカー内部の緊張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,さらに,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.また大津ら¹⁵⁾は,アンカーの緊張力 低下の状況を反映したミクロ的視点からの補修の優先順位付けを行うための前段階の検討 として,目視点検結果に加えてリフトオフ試験結果で得られたアンカー緊張力の残存率を 用いて,マルコフ過程モデルおよびワイブルハザードモデルを適用し,アンカーの緊張力 低下に関するモデル化手法を示した.

6

構造物の性能低下過程のモデル化に関して,津田ら¹⁶は,橋梁部材の経時的な性能低下 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すマルコフ推 移確率を,指数ハザード関数を用いて推定した.また青木ら¹⁷⁾は,トンネル照明を対象と して,その施設寿命にワイブルハザードモデルを適用し,時間とともに構造物の劣化速度 が変化する過程を表現した.

以上により、本研究と既往の研究の相違点をまとめると、以下のようになる.

本研究では、あくまでアンカーに関する研究^{12),13)}を引き継ぎ、マクロ的な観点からアン カーの維持補修を検討するものであるが、これらの研究は主に目視点検結果に基づき維持 補修の検討を行っているものであり、本来考慮されることが望ましい斜面の安定性を考慮 していない.一方、本研究は文献¹⁵⁾のように、目視点検結果に加えてリフトオフ試験結果 を利用しアンカーの性能低下のモデル化を行うことで、アンカー内部の力学的損傷状態を モデル化し、文献¹⁰⁾のように斜面の破壊確率を算定することでその安定性を考慮している. また、文献¹⁰⁾では斜面の安定性解析において2次元の斜面安定解析手法を適用しているが、 本研究では3次元の斜面安定解析を行うことで、より実斜面の状態に近い条件下で斜面の 安定性を検討する.以上をまとめると、本研究はアンカーのアセットマネジメントに関し て、図1-4に示したように、マクロ的視点からの検討にミクロ的視点からの検討を組み込 んだ内容となっている.すなわち、目視点検結果に加えて力学試験(リフトオフ試験、非破 壊検査)結果を用いてアンカーの経年劣化をモデル化することで、アンカーの経時的な緊張 力変化、斜面の安定性、および斜面が崩壊した際の社会的経済損失を考慮した地質条件毎 の維持補修の優先順位付けが可能となる.

ただし、本研究では実務において補修を施す場合の状況を考慮し、マクロ的な観点から あくまで目視点検結果に基づき維持補修計画を立案するものとし、リフトオフ試験結果に 基づく各解析結果は、目視点検結果に基づく各解析結果と比較することで、アンカーの現 状での内部性能の低下状況を把握するために利用する.

また本研究においては、アンカーの性能低下のモデル化に関しては、アンカーが打設さ れている斜面の地質条件毎に分類した点検結果を使用し、文献^{12),13),16)}で用いられるマル コフ過程モデルに加えて、文献^{15),17)}で用いられるワイブルハザードモデルを適用する. したがって、アンカーおよび斜面の将来予測結果も、マルコフ過程モデルに基づく結果と ワイブルハザードモデルに基づく結果の2通りとなるため、それぞれに異なる維持補修計 画を立案し、その LCC 算定結果の比較検討を行う.また、目視点検結果に基づくマルコフ 過程モデルに関しては文献¹⁶⁾の指数ハザードモデルを適用するが、リフトオフ試験結果に 基づくマルコフ過程モデルに関しては、点検データ数の不足によりハザードモデルが適用 できないため、文献^{12),13),15)}の簡易モデルを適用する.

7



図 1-5 本研究の流れ

1.4 本論文の構成

本論文の構成は図1-5に示すように全7章からなる.

第1章では、本研究の背景、目的、および既往の研究との関連について述べた.

第2章では、本研究で対象とするアンカーの種類、本研究で主に用いる目視点検結果お よびリフトオフ試験結果を示し、それとともに非破壊試験結果を用いて、目視点検結果お よびリフトオフ試験結果の精度検証を行う.

第3章では,統計学的手法としてマルコフ過程モデルおよびワイブルハザードモデルを 用いた,アンカーの性能低下過程のモデル化手法の説明をする.

第4章では,第3章で説明した性能低下モデルに対してアンカー内部の緊張力のモデル 化手法を適用し、ミクロ的観点からの斜面の安定性評価手法について説明する.

第5章では,第3章および第4章で得られたアンカー・斜面の将来予測に基づいた,維持補修計画の立案手法および LCC 算定手法の説明をする.

第6章では,前章までに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,その結果に対して考察を行う.

第7章では、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 アンカーの点検結果の概要および分析

本章では、本研究で対象とするアンカーの種類および既存の点検結果の概要を示し、そ れとともに非破壊試験結果を用いて、本研究で主に用いる目視点検結果およびリフトオフ 試験結果の精度検証を行う.

2.1 アンカーの種類

アンカーの防食に関する基準¹¹に関してはすでに述べたように、基準制定前に打設され たアンカーを旧タイプアンカー、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 ーを新タイプアンカーと呼び、特に旧タイプアンカーにおいては腐食に伴う激しい劣化が 指摘されている.またアンカーは、アンカー体の構造により、図 2-1、2-2のように鋼棒タ イプとより線タイプに分けられる.鋼棒タイプとはアンカー体が一本の鋼棒からなるアン カーで、より線タイプとは複数の鋼より線に緊張力を分散させる方式のアンカーである. 旧タイプアンカーにおいては、鋼棒、より線両タイプともに、腐食による激しい鋼材の断 面欠損やアンカーの破断が確認されている.また、鋼棒タイプアンカーはアンカー破断時 にアンカー体が飛び出す危険性があり、第三者被害の観点から近年では全く使用されてい ないため、新タイプアンカーはほとんどがより線タイプとなっている.

また,アンカーは期待する抑止効果により,施工時に導入される緊張力およびアンカーの打設角度が異なる.アンカーに期待する抑止効果としては,図2-3に示すように,アンカーを打設することによる待ち受け効果(Pocosβ)と,プレストレス力を与えることですべり面の応力が増加し摩擦抵抗が増加する締め付け効果(Posinβtanφ)(φ:内部摩擦角)の2つがある.同図からも分かるように,打設角度βが大きいと締め付け効果が大きくなり,逆に, 打設角度βが小さいと待ち受け効果が大きくなる.現在の地すべり抑止対策では,その形



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 アンカーに期待する効果

態やすべり機構・特性が複雑で、しかも長期的にアンカーの緊張力を維持することが困難 なため、一般的に待ち受け効果を重視した設計が採用されている. つまり、現在のアンカ ーは、供用開始時に大きな緊張力を与えず、すべりが生じたときにそのすべりを受け止め るような待ち受け型機能が付与されたもの(以下待ち受けタイプと称す)が一般的である. しかし、旧タイプアンカーにおいては、締め付け効果に期待し、供用開始時に大きな緊張 力を与えることで斜面の変形や崩壊そのものを抑止しようとするもの(以下締め付けタイ プと称す)がほとんどである.

本研究では、上述のように腐食による激しい劣化が報告されている旧タイプアンカーに 着目し、その中でも旧タイプアンカーで主に採用されていた鋼棒タイプアンカーを対象と する.ただし、リフトオフ試験結果を用いたアンカー緊張力の性能低下過程のモデル化に おいては、そのサンプル数の制約から、旧タイプのより線タイプおよび新タイプアンカー の試験結果も用いる(2.3.1 で詳説する).

2.2 目視点検結果

本研究で用いる目視点検結果は,旧JHの健全度ランク¹⁸⁾に準じ,表 2-1 に示す 6 区分(表中では I~VI)に判定されている.同表において,ランク VI が最も状態がよく,ランク I にゆくほど状態が悪いことを意味する.このように目視点検結果は具体的な数値の連続量によって判定されるわけではなく,アンカーキャップの損傷状態を相対的にランク分けした離散量の形で表される.

また本研究においては、アンカーの性能低下をモデル化する上で、6つの高速道路にお

アンカーの タイプ	評価	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. 引き抜けたり, 定着具がはずれたりしている.
	Ш	コンクリートキャップが浮いている. 著しい錆,腐食がある. 錆がひどい,オイルが無い. 著しく異物が混入しているもの.もしくはクサビのばらつき等がある. 適切な角度で設置されていない.十分にかみ合っていない. 水もれ,遊離石灰,錆がある.
二重防食前 (~1988年)	III	コンクリートキャップにクラックが入っている.水がもれている. 引張材のすべりが認められるもの. 設置角度などの問題から、今後かみ合わなくなる可能性がある. 鋼製キャップの錆、オイル漏れが著しい.
	IV	コンクリートキャップ表面の風化,劣化. 鋼製キャップに軽微な錆,腐食がある. 遊離石灰またはオイルが僅かに漏れている. 多少異物が混入している.
	V	特に変状無し
	V VI	多少異物が混入している。 特に変状無し。 旧タイプアンカーに該当なし。

表 2-1 アンカーの健全度ランクと損傷例

けるアンカーの目視点検結果およびリフトオフ試験結果を,アンカーが打設されている地 質条件により①泥岩・砂岩・礫岩互層,②流紋岩,③花崗岩の3種類に区分する.ここで, ①泥岩・砂岩・礫岩互層は,地層としての生成は同時期であり,アンカーの打設箇所によ っては泥岩,砂岩あるいは礫岩のいずれかの岩種が優勢な個所もあるが,本研究では定着 部の岩種の判定が困難なため,これ以上の細分化をせず,以下泥岩・砂岩・礫岩互層と標 記する.なお,山地地形を形成する地質は主に基盤岩で構成され,アンカーが打設されて いる切土のり面はその大部分が基盤岩から構成されており,本研究で分類した地質とは, 地質図に基づいたこの基盤岩の地質であることに留意されたい.

そして,実際の目視点検結果を表 2-2(a)~(c)に示す.同表中同じ色で塗られた箇所は各 地質条件における同一斜面群のアンカーであり,過去2回目視点検が行われていることを 表す.また,一部のアンカーで総数の変動がみられるのは,1回目と2回目の点検の間に アンカーの増し打ち(総数が増えている場合)が行われたか,アンカーが土砂に埋もれ確認 できなくなっていること(総数が減っている場合)を意味する.

表 2-2 目視点検結果

地塔 伊田在粉				健全度	ランク	-	-	≞∔
	供用牛奴	VI	V	IV	III	II	Ι	ΡI
	12	0	102	40	0	67	1	210
	13	0	20	543	6	26	3	598
	14	0	6	48	0	0	0	54
泥岩・砂	15	0	366	216	0	4	5	591
石「味石彑」	21	0	101	40	1	67	1	210
	22	0	0	401	87	85	26	599
	23	0	0	0	54	0	0	54
	24	0	295	233	17	24	24	593

(a) 泥岩·砂岩·礫岩互層

(b) 流紋岩

地質	伊田左粉		≣∔					
	供用牛奴	VI	V	IV	III	II	Ι	Ē
	14	0	261	0	0	2	0	263
法经出	19	0	0	223	76	0	0	299
元 权石	23	0	158	74	5	5	0	242
	28	0	0	221	77	0	1	299

(c) 花崗岩

基明	伊田左粉		-	健全度	ランク	-	_	÷⊥
吧貝	田田中致	VI	V	IV	III	II	Ι	ĒI
龙出出	12	0	695	2	0	0	0	697
111尚石	21	0	375	120	202	0	0	697

2.3 リフトオフ試験結果

リフトオフ試験とは、アンカー頭部にジャッキを取り付けて引張力を与え、アンカーが 急激に伸び始める時点(リフトオフ)の荷重を残存緊張力と特定する試験である.すなわち、 正常なアンカーであれば荷重が残存緊張力の範囲内にあるときは変位が生じないため、伸 び始めた時点での荷重がアンカーの残存緊張力と判断できる.本節では、このリフトオフ 試験の結果を示すとともに、アンカーのプレストレス力に関する検討を加え、リフトオフ 試験結果に対して6段階の健全度ランクを設定する.



図 2-4 アンカーの緊張力と各種アンカー力

2.3.1 リフトオフ試験結果の概要

リフトオフ試験結果を示すにあたり、まず、各種アンカー力について説明する. 図 2-4 に、アンカーの緊張力と各種アンカー力の関係を示す.まず、同図中の極限アンカー力と は、アンカーに終局限界状態の破壊が生じる力をいい、許容アンカー力とは、極限アンカ ー力を安全率で除したものをいう.次に、設計アンカー力とは、許容アンカー力を超えな い設計に用いるアンカー力である.また、初期緊張力とは、アンカー頭部の緊張・定着作 業を行う時にアンカー体に与える引張力の最大値であり、定着時緊張力とは、アンカー頭 部の緊張・定着作業が終了した時にアンカー体に作用している引張力をいう.初期緊張力 と定着時緊張力のように、アンカー定着時にあらかじめアンカー体に与える力を総称して プレストレス力という¹⁹⁾.

上述のアンカーカのうち,極限アンカーカおよび許容アンカーカの値は,アンカーの規 格から判断することが可能であるが,設計アンカーカおよびプレストレス力は同タイプの アンカーでも実施工状況によって異なる値をとる.しかし,20年以上前に施工された旧タ イプアンカーにおいては,維持補修等の概念が希薄であったことなどから,施工時の詳細 なデータはほとんど残されていない.このため本研究では,リフトオフ試験結果により得 られた残存緊張力を許容アンカー力で除したものを性能比(%)として定義し,以下この性能 比を用いてリフトオフ試験結果を表す.

ここで、リフトオフ試験は高コストかつ試験時間が長いことから一部のアンカーにのみ にしか実施されず、データ数が非常に限られている.このため、旧タイプの鋼棒タイプア ンカーの試験結果のみを利用しても、統計的手法を用いて性能低下をモデル化することが



図 2-5 リフトオフ試験結果

困難である.この課題に対処するため、本研究ではリフトオフ試験結果に基づくアンカー 緊張力低下のモデル化においては、旧タイプより線タイプおよび新タイプアンカーのリフ トオフ試験結果も併せて利用する.実際はアンカーのタイプによって性能低下のメカニズ ムが異なる可能性が考えられるが、現状ではその違いの検討が困難であるため、これを許 容する.また、図 2-5 に、実際のリフトオフ試験結果を示す.

図 2-5 に示す結果では、旧タイプアンカーにおいて、同一地質の鋼棒タイプとより線タ イプの間では性能比の分布の傾向に大きな違いはみられない.このことは、サンプル数が 少ないながらも、新タイプアンカーにおいても同様である.しかしながら、旧タイプアン カーと新タイプアンカーの間では明らかに分布に違う傾向がある.新タイプアンカーの方 が旧タイプアンカーよりも明らかに低い性能比を示す傾向があることから、この分布の違 いの支配的要因は、二重防食の有無ではなく、前述した締め付けタイプと待ち受けタイプ の施工形態の違いであると推察される.すなわち、旧タイプアンカーは締め付けタイプと して施工されたため与えられたプレストレス力大きく、新タイプアンカーは待ち受けタイ プとして施工されたため与えられたプレストレス力が小さかったものと推察される.この ことを踏まえ、以下本研究で対象とするアンカーは、旧タイプアンカーは締め付けタイプ として、新タイプアンカーは待ち受けタイプとして施工されたものとして議論を進める. また、アンカー施工時のプレストレス力については、次項で考察を加える.

14

2.3.2 アンカーのプレストレスカ

まず、アンカーの緊張力変化過程に関して説明する。アンカーは通常、長期にわたって 供用される中で緊張力が低下していく.実際に著しく緊張力の低下したアンカーは数多く 確認されており、緊張力の低下によりアンカーが破断するという事例も数多く報告されて いる.しかし,一部では施工時より緊張力が増加している(以下過緊張と称す)アンカーも 確認されている.このアンカーの過緊張に関しては,緊張力の低下とは異なるメカニズム で発生すると考えられる.すなわち,緊張力の低下は,アンカーの長期供用に伴うアンカ 一体の腐食・断面欠損等に起因するが、過緊張は地山のクリープなどの斜面の微小な変形 により、アンカーに想定外の外力が加わることで発生すると推察される、このため、アン カーの緊張力変化をモデル化する際には、緊張力低下過程と過緊張過程を分けて議論しな ければならない.ここで、本研究は長期の供用によって劣化したアンカーの維持補修につ いて検討を加えるものであるため、アンカーの長期供用による経時的劣化に着目する.し たがって、アンカーの緊張力変化のモデル化に関しては緊張力低下過程のみを考慮し、過 緊張のアンカーについては検討対象外とする.このため,アンカーの過緊張過程のモデル 化は、今後の課題である、また、実際の斜面では、緊張力が増加した後に減少に転じる、 もしくはその逆の場合も考えられるが、本研究では過緊張過程を検討対象外としたため、 アンカー緊張力低下過程のモデル化においては、アンカーの緊張力は単調減少であると仮 定する.

ここで、構造物の性能低下過程をモデル化するには、構造物の初期状態を定義すること が必要である.しかし、前項で述べたように、本研究で対象とするアンカーにおいては施 工時の詳細なデータがほとんど残されていないため、施工時に与えられたプレストレス力 が不明であり、初期状態の性能比が判断できないケースが多い.そのため本研究では、ア ンカーの設計・施工に関する資料^{19),20)}を参考に、施工時の性能比(初期状態)を一意的に定 義する.

資料¹⁹⁾によれば、図 2-4 に示すアンカー力のうち,設計アンカー力は許容アンカー力の 70%~80%とされることが多く、また、プレストレス力に関しては、締め付けタイプアン カーでは設計アンカー力の 40%~80%程度、待ち受けタイプアンカーでは設計アンカー力 の 20%~30%程度が与えられる.すなわち、施工完了時の性能比は、締め付けタイプアン カーで 28%~64%程度、待ち受けタイプアンカーで 14%~24%程度であると解釈される. ここで、資料²⁰⁾によれば、待ち受け効果を期待した設計の場合は、本来はアンカーに初期 緊張力を与える必要性は認められない.しかし、初期緊張力が小さい状態ですべりが発生 すると、各段のアンカーの荷重発生状況が不均一になり、反面、あらかじめ安定を確保す るために必要な初期緊張力を導入した場合では、荷重変動の少ないことが示されている. このため、アンカー緊張荷重の均一化のため、待ち受けタイプアンカーでもプレストレス

15



図 2-6 リフトオフ試験結果(初期性能比考慮)

力は設計アンカー力の30%以上とすることが望ましいとされている.

以上の内容と、少数ではあるが施工実績のデータを考慮し、本研究ではアンカーのプレ ストレス力を、締め付けタイプアンカーにおいては許容アンカー力の 60%、待ち受けタイ プアンカーにおいては許容アンカー力の 30%と仮定する. すなわち、締め付けタイプアン カーにおいては性能比 60%を、待ち受けタイプアンカーにおいては性能比 30%を初期状態 として定義し、それ以上の性能比を持つアンカーは過緊張状態にあるとしてサンプルから 除外する.また、この初期性能比に基づき、図 2-5 に示す結果のうち緊張力が低下したア ンカーのみを抽出した結果を図 2-6 に示す. 同図に示すように、初期性能比を考慮し緊張 力低下過程のみに着目した結果、旧タイプアンカーと新タイプアンカーの間に分布の傾向 の大きな違いはなく、地質条件毎にある程度同じ傾向の分布を示している.

2.3.3 アンカー緊張力の健全度ランクの設定

本研究では、リフトオフ試験結果で得られたアンカー緊張力の性能比に対し、目視点検 結果の6段階の健全度ランクに合わせ,表2-3のように健全度をランクLF-VI~ランクLF-I の6段階に区分する.そして,この健全度ランクに対してマルコフ過程を適用することで、 アンカーの劣化過程をモデル化する.また、図2-6に示すリフトオフ試験結果を表2-3に 示す健全度ランクに分配した結果を、表2-4(a)~(c)に示す.なお、リフトオフ試験に関し ては目視点検と異なり、同一のアンカーを対象として複数回の試験の実施はなされていな いことに留意されたい.

表 2-3 リフトオフ試験結果で得られたアンカー緊張力の性能比に基づく健全度区分

区分	性能比 (旧タイプアンカー)	性能比 (新タイプアンカー)	備考
-	60%以上	30%以上	過緊張
LF-VI	50-60%	25-30%	健全
LF-V	40-50%	20-25%	Λ
LF-IV	30-40%	15-20%	
LF-III	20-30%	10-15%	ļļļ
LF-II	10-20%	5-10%	
LF-I	0-10%	0-5%	損陽

表 2-4 リフトオフ試験結果

(a) 泥岩・砂岩・礫岩互層

地質供	伊田左粉	健全度ランク							
	供用牛奴	LF-VI	LF-V	LF-IV	LF-III	LF-II	LF-I	Ē	
	17	0	1	6	4	4	6	21	
	19	1	0	1	0	0	3	5	
泥岩・砂	21	1	0	2	1	3	0	7	
岩·礫岩互	22	1	1	4	3	2	2	13	
層	23	4	2	3	1	3	9	22	
	24	2	5	3	5	3	0	18	
	25	0	2	1	0	0	1	4	

(b) 流紋岩

を	伊田左粉	健全度ランク						
地具	供用牛奴	LF-VI	LF-V	LF-IV	LF-III	LF-II	LF-I	
	16	1	2	1	0	0	0	4
	21	0	0	3	1	1	0	5
	23	0	1	0	2	1	0	4
流紋岩	25	3	0	0	0	0	0	3
	26	0	3	0	1	0	0	4
	28	0	1	0	0	0	0	1
	29	1	2	0	0	0	1	4

(c) 花崗岩

专用	伊田左粉			健全度	ランク			÷⊥
吧貝	供用牛奴	LF-VI	LF-V	LF-IV	LF-III	LF-II	LF-I	ĒI
龙岩鸟	21	0	2	3	5	4	0	14
111 岡石	22	2	1	2	6	1	7	19

表 2-5 非破壊試験結果とリフトオフ試験結果および目視点検結果の健全度ランクの比較 (a)目視点検結果と非破壊試験結果 (b)リフトオフ試験結果と非破壊試験結果

目視点検	非破壊試	検結果(本)
結果	健全	損傷
VI	0	0
V	2	10
IV	3	3
III	6	6
II	2	19
Ι	0	0
計	13	38

リフトオフ	非破壊試馴	険結果(本)
試験結果	健全	損傷
過緊張	3	6
LF-VI	0	3
LF-V	2	5
LF-IV	2	4
LF-III	2	4
LF-II	3	8
LF-I	0	3
計	12	33

2.4 点検結果の分析

本節では、旧タイプ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を用い て、リフトオフ試験結果の健全度ランクの妥当性および目視点検結果の精度を検証し、目 視点検結果とリフトオフ試験結果の相関性を照査する.

2.4.1 アンカー緊張力の健全度ランクの検証

本項では,表 2-2, 2-4 に示すように 6 段階に区分された目視点検結果およびリフトオフ 試験結果と非破壊試験結果を比較することで,前節で設定したアンカー緊張力に関する健 全度ランクに関して検討を加える.ここで,本研究で利用する非破壊試験とは,衝撃弾性 波試験と超音波探傷法の併用によりアンカーの長さ,断面欠損(破断)等を確認することで, アンカー体の欠損の有無が判定されるものである.

表 2-5(a),(b)はそれぞれ,旧タイプ鋼棒タイプアンカーを対象として実施された非破壊 試験結果と目視点検結果に基づく健全度ランク,非破壊試験結果とリフトオフ試験結果に 基づく健全度ランクの比較である.また,図 2-7(a),(b)は,目視点検結果およびリフトオ フ試験結果の各健全度ランクにおける非破壊試験での欠損の発生頻度を示す.

表 2-5(a),(b)に示す結果において,対象とするアンカーのうち 51 本を選定して非破壊 試験を実施した.このうち,同時にリフトオフ試験も実施されたアンカーは 45 本である. 図 2-7(a),(b)に示す結果より,リフトオフ試験結果の各健全度ランクにおける非破壊試験 での欠損の発生頻度は,目視点検結果の各健全度ランクにおける非破壊試験での欠損の発 生頻度と分布が相似しており,特に低ランク(ランク II・ランク LF-II)で卓越していること が分かる.このことより,前節で設定したアンカー緊張力に関する各健全度ランクにおけ るアンカー体の損傷度は,目視点検結果の各健全度ランクと同程度であると推察され,表



(a) 目視点検結果と非破壊試験結果
 (b) リフトオフ試験結果と非破壊試験結果
 図 2-7 各健全度ランクにおける非破壊試験での欠損の発生頻度

2-3 に示すリフトオフ試験結果に基づく健全度ランク分けにある程度妥当性があることが 確認された.ただし,同図においては高ランク(ランク V・ランク LF-V)においても欠損の 発生頻度が比較的大きい結果となっている.このことについては,今後健全度ランクと内 部の損傷状況をより照査し,現状では不明である健全度ランクと非破壊試験結果との相関 性の物理的意味を検証していく必要性がある.

2.4.2 目視点検結果の検証

本項では非破壊試験結果およびリフトオフ試験結果と目視点検によるアンカーヘッドの 損傷状況を比較することで、マクロ的観点からのアセットマネジメントにおいて目視点検 結果を用いてアンカーの性能低下過程をモデル化することの妥当性に関して検討を加える.

表 2-6(a)は、旧タイプ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およ びリフトオフ試験結果と目視点検によるアンカーヘッドの損傷状況の比較である.なお、 実際の目視点検においては、アンカーキャップの浮き、錆・腐食、遊離石灰、クラック等 が重複して発生したアンカーが認められた.このアンカーに関しては、表 2-6(a)に示す結 果では、表 2-6(b)に示すランク付けにおいて順位が上位に相当するものとして分類した.

ここに,表2-6(a)中の<>内の数字は非破壊試験においてアンカーの欠損が確認された本数を,()内の数字はリフトオフ試験結果の性能比が40%以下の本数を,[]内の数字はリフ トオフ試験結果の性能比が60%以上の本数を表す.

表 2-6(a)に示す結果において,対象とするアンカーでは,目視点検の結果,全体の 65.4%(1,770本/2,706本)のアンカーで損傷が確認された.そして,全体の約 2.8%(75本/2,706 本)のアンカーを選定して非破壊試験(衝撃弾性波試験・超音波探傷法)を実施した.その内 表 2-6 アンカーの損傷・欠損・内部緊張力の性能状況および点検結果のランク付け (a) アンカーの損傷・欠損・内部緊張力の性能状況 (b) 点検結果のランク付け

検査項目		目視点検	非破壊試験	リフトオフ試験
アンカー破断		6	-	-
キャップの崩落		16	-	4 (1) [1]
キャップの浮き		109	20 <18>	26 (19) [4]
4	多	104	7 <6>	9 (7) [0]
蛃 ,	少	158	-	-
	多	3	-	-
迎離口火	少	233	2 <1>	1 (1) [0]
キャップにクラック		280	15 <8>	12 (8) [3]
オイル漏れ		479	5 <2>	26 (2) [18]
キャップの表面劣	化	382	2 <2>	5 (4) [0]
損傷本数		1,770	51 <37>	83 (42) [26]
健全本数		936	24 <18>	13 (4) [3]
全体本数		2,706	75 <55>	96 (46) [29]
損傷率 <欠損率> (リフトオフ試験409 [リフトオフ試験609	%以下) %以上]	65.4%	68.0% <73.3%>	86.5% (47.9%) [30.2%]



訳は、目視点検で損傷が認められたものが 51 本(68.0%), 健全と判定されたものが 24 本 (32.0%)である.同非破壊試験では、73.3%(55 本/75 本)のアンカーにおいて、アンカーの先端より浅い箇所で断面欠損の生じている可能性がある結果が得られた.同表における目視点検での検査項目と非破壊試験結果の関係から、アンカーヘッドでのキャップの浮き・クラックが、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る.

また,全体の約 3.5%(96 本/2,706 本)のアンカーを選定してリフトオフ試験を実施した. その内訳は,目視点検で損傷が認められたものが 83 本(86.5%),健全と判定されたものが 13 本(13.5%)である.リフトオフ試験では,47.9%(46 本/96 本)のアンカーにおいて内部緊 張力の性能比が 40%以下に低下している結果が,30.2%(29 本/96 本)のアンカーにおいて内 部緊張力の性能比が 60%以上に増加している結果が得られた.また,性能比が 40%以下に 低下しているアンカーの損傷状況としては,キャップの浮き・クラックが多く,性能比が 60%以上に増加しているアンカーの損傷状況としては,キャップの浮き・クラックは少な い結果となった.

以上に示す結果より,アンカーヘッドでキャップの浮き・クラックがみられるアンカー は,内部でも性能が低下している可能性が高く,また緊張力が低下しているアンカーは,

目視点検結果	V	IV	III	II	Ι
性能比平均值µ(%)	38.5	38.0	30.5	27.2	0.0
標準偏差 <i>o</i> (%)	11.2	17.8	19.2	20.9	0.0
サンプル数N	9	9	15	22	6

表 2-7 リフトオフ試験結果(目視点検ランク別,旧タイプ鋼棒タイプアンカー)



図 2-8 目視点検結果とリフトオフ試験結果の比較

アンカー本体でも断面欠損が生じている可能性が高いといえる.これらをまとめると,ア ンカーヘッドの損傷(浮き・クラック),アンカー本体の断面欠損,および内部緊張力の低 下には相関性があると解釈される.

以上の検討により、旧タイプ鋼棒タイプアンカーに関しては、アンカー内部の欠損/破断 および緊張力の低下が、直接アンカーヘッドの損傷として確認される可能性が高いことが 確認された.一方、より線タイプアンカーにおいては、アンカー体が多数のより線で構成 されているため、そのうちの数本が欠損/破断しても、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ものと推察される.このことから、旧タイプ鋼棒タイプアンカーを 対象にマクロ的観点からのアセットマネジメントを検討するにあたって、目視点検結果を 用いてアンカーの性能低下過程をモデル化することの妥当性が検証された.

2.4.3 目視点検結果とリフトオフ試験結果の比較

リフトオフ試験結果を性能比の平均値,標準偏差,およびサンプル数を目視点検による 健全度ランク(ランク V~ランク I)別に区分したものを表 2-7 に示す.また,目視点検によ る健全度ランクと,リフトオフ試験結果で得られたアンカー緊張力の性能比の相関を図 2-8 に示す.表 2-7 および図 2-8 に示すように,旧タイプ鋼棒タイプアンカーにおいて初 期状態における性能比を 60%として緊張力低下過程に着目した場合,目視点検結果の健全 度ランクが下がっていくにつれアンカーの緊張力も低下していくことが確認でき,目視点 検結果とリフトオフ試験結果の間にある程度の相関性が認められる.前述したように,締 め付け型の旧タイプ鋼棒タイプアンカーでは腐食等の要因によって性能が低下することで プレストレス力を維持できず,緊張力が低下していくため,目視点検が斜面内部の状況(こ の場合はアンカーの緊張力)をある程度精度よく検知できるものと推察される.

しかし、目視点検では損傷が確認されない健全度ランク V においても、健全度ランク IV と同程度の緊張力の低下が確認できる.このような結果が得られた一因として、対象とし た健全度ランク V のアンカーのリフトオフ試験結果のサンプル数が9と非常に限られてい ることから、統計誤差による影響が挙げられる.この統計誤差の観点では、健全度ランク IV のアンカーにおいても同様のことがいえる.したがって、健全度ランク V や IV におけ る目視点検の精度に関しては、今後も各種点検結果を蓄積して検証していくことが重要で あるものと推察される.

また,目視点検で激しい損傷が確認されたランク II においても,緊張力があまり低下し ていないアンカーがみられる.このような結果が得られた一因として,前述の過緊張のメ カニズムが挙げられる.すなわち,緊張力が増加した後に減少に転じた,もしくはその逆 の現象が起こった結果,腐食等の要因によって性能は低下しているにもかかわらず,大き い緊張力を有するアンカーが生じたものと推察される.このことに対応するためには,今 後アンカーの過緊張過程のメカニズムを解明し対応していくことが必要となる.

第3章 アンカーの性能低下のモデル化手法

本章から第5章にかけては、本研究におけるアンカーの維持補修計画の概要について説明する.ここで,社会基盤構造物のアセットマネジメントにおいて必要となる検討項目は、 以下の4つに要約される⁷⁾.

構造物の性能,機能水準の現在状態の規定

② 構造物の性能低下に対する将来状態の予測

③ 構造物の性能低下過程のモニタリング

④ 費用対効果の評価を含めた適切な箇所・タイミングでの維持・補修・更新のルール化以上の要件は、①~③の構造物の性能低下過程のモデル化に関する項目と、④の社会経済的観点を考慮した維持補修計画の立案に関する項目に分けられる.前章では、アンカーの現在状態を定義するものとして目視点検結果およびリフトオフ試験結果を示した.これを受けて本章では、前章で検証した目視点検結果およびリフトオフ試験結果を用いて、アンカーの性能低下過程をモデル化し、アンカーの将来状態を予測する手法について説明する.また、アンカーの性能低下に伴う斜面の安定性評価手法に関しては次章で、具体的な維持補修計画および社会経済的観点を考慮した LCC 評価に関しては第5章で説明する.

3.1 統計化手法の基本概念に関する比較

図 1-4 で示したアセットマネジメントのフローで適用される,点検結果を用いた代表的 な統計的劣化推定手法としては,点検の評価法によって以下のようなモデルが挙げられる. ① 点検の評価法が多段階

② 点検の評価法が二値(損傷/健全)

まず,表 2-1, 2-3 のようなアンカーの健全度評価区分に示すように,点検の評価法が多 段階である場合には,マルコフ過程モデルを適用することで,図 3-1 の模式図に示すよう に,性能低下に相当する健全度評価区分の相対頻度の経時的な変化が算定される.

次に,点検の評価法が損傷/健全といった二値である場合には,ワイブルハザードモデル 等の極値分布モデルを適用することで,図3-2の模式図に示すように,損傷の発生に対す る生存確率の経時的な変化が算定される.ここで,アンカーの点検結果は,前述のように 多段階にランク分けされることが一般的であり,損傷/健全という二値では評価されないこ とが一般的である.この課題に対処するため,本研究では,表2-1,2-3のような多段階ラ ンク区分に対して,あるランクに関する閾値を設けて,そのランク以上の場合には健全, それ以下の場合には損傷という二値の評価方法を適用する.



図 3-1 マルコフ過程モデルの適用結果 図 3-2 ワイブルハザードモデルの適用結果

なお、マルコフ過程モデルおよびワイブルハザードモデルの基本概念、および具体的な 性能手化のモデル化については、次節以降において示す.

3.2 マルコフ過程を用いた性能低下モデルの概要

本節では、マルコフ過程を用いてアンカーの性能低下をモデル化する手法について、その概要を述べる.

3.2.1 健全度と定期検査スキーム

アンカーの性能低下モデルを推定するためには、アンカーの健全度に関する時系列デー タを蓄積することが必要である. いま, アンカーの性能低下に関する時系列データが図 3-3 に示すように与えられたとする.同図中の時刻 r はカレンダー上の実時刻を表す.時刻 ro にアンカーの供用が開始され、以後性能低下が進行していく.ここで、アンカーの健全度 ランクは健全な方から VI~I(LF-VI~LF-I)の 6 ランクであるが,本手法の理論の説明にお いては、その説明のしやすさから健全な方から 1~6 とし、状態変数 i(=1,...,6)を用いて表 現する.図 3-3 では、時刻 T_i(i=1,…,6)において、それぞれ健全度ランクが i から i+1 へ推 移している.次に,図 3-4 のように 2 つの時刻 τ_A, τ_Bにおいて点検が実施された場合を考 える. 時刻 τ_Aの点検において, あるアンカーの健全度ランクが i (=1,…,6)に判定されたと する. このアンカーは,時刻 τ₄において,将来どのように性能低下が進行するかは不確実 である.性能低下過程としては無限に多くのシナリオが考えられるが、現実にはその中か ら1つのパスが実現する.ここで、同図に示すような4つのサンプルパスを考える.パス 1は2つの点検時刻 TA, TBの間で健全度ランク i が変化しなかった場合を表している.パ ス 2 およびパス 3 では,それぞれ時刻 τ_i^2 , τ_i^3 において,健全度ランクが i から i+1 へと推 移している.これら2つのパスに従った場合,時刻 τβにおける点検では,当該アンカーの 健全度ランクは i+1 となるが, 定期点検スキームでは健全度ランクが i から i+1 へ推移し た時刻 τ_{i}^{2} , τ_{i}^{3} は分からない.また,パス4では時刻 τ_{i}^{4} , τ_{i+1}^{4} において健全度ランクがそれ



ぞれ i から i+1, i+1 から i+2 へ推移しているが,このような場合においても,定期点検で は健全度ランクが変化した時刻に関する情報を獲得することは不可能である.

3.2.2 マルコフ過程モデルの概要

本研究では,前項で説明したような定期点検スキームのアンカーの目視点検結果および リフトオフ試験結果に確率統計学手法としてマルコフ過程を適用することでアンカーの性 能低下過程をモデル化する.具体的には,2つの時刻間におけるアンカーの健全度ランクの 不確実な推移状態を,マルコフ推移確率(以下推移確率と称す)で表現する.

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.

マルコフ過程は前述のように、構造物の性能を表す状態量が健全度ランクのように離散 量で表される場合に非常に操作性が高く、舗装や橋梁分野においてマクロ的なアセットマ ネジメントを検討する場合に用いられてきた¹⁶⁾.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²¹⁾.

一般的に、マルコフ過程は次式によって表される.

 $\Pr(X_{t+1} = i_{t+1} \mid X_0 = i_0, X_1 = i_1, \cdots, X_t = i_t) = \Pr(X_{t+1} = i_{t+1} \mid X_t = i_t)$ (3.1)

ここに、Pr 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す.ここで、時刻 τ_A で観測したアンカーの健全度ランクを、状態変数 $s(\tau_A)$ を用いて表す.時刻 τ_A で観測された健全度ランクが i であれば、 $s(\tau_A)=i$ と表すことができる.このとき推移確率は、時刻 τ_A で観測された健全度 $s(\tau_A)=i$ に対して、将来時点、例えば時刻 τ_B において健全度 $s(\tau_B)=j$ が観測される確率として、次式で定義される.

$$\Pr[s(\tau_B) = j \mid s(\tau_A) = i] = T_{ij}$$
(3.2)

このような推移確率を健全度ペア(*i*, *j*)に対して求めれば,次式のマルコフ推移確率行列 (以下推移確率行列と称す)を得る.

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & \cdots & T_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & T_{JJ} \end{bmatrix}$$
(3.3)

推移確率(式(3.2))は所与の 2 つの点検時刻 τ_A , τ_B の間に生じる健全度ランクの推移確率 であり,時刻 τ_A , τ_B の時間間隔が異なれば,推移確率の値も異なる.また,補修を行わな い限り常に性能低下は進行するため, $T_{ij}=0(i>j)$ が成立する(構造物の性能低下の不可逆性). さらに,推移確率の定義より,推移確率行列の行要素の和は1となる.すなわち,推移確 率に関して次式が成立しなければならない.

$$T_{ij} \ge 0 \quad (i \le j)$$

$$T_{ij} = 0 \quad (i > j)$$

$$\sum_{j=1}^{J} T_{ij} = 1$$
(3.4)

健全度 J は最も劣化が進行した状態を表し、アンカーにおいては健全度ランク I(LF-I)に 相当する.また、補修等が実施されない限りマルコフ連鎖の吸収状態となり、T_{JJ}=1 が成立 する.なお、推移確率は式(3.1)のようなマルコフ性を満たすと仮定し、アンカーの性能低 下は過去の性能低下履歴とは独立して定義する.

3.2.3 指数ハザードモデル

ハザードモデルの詳細については文献²²⁾に譲ることとし、本項では、本研究で用いる指数ハザードモデルについて説明する.

まず、ハザードモデルを定式化する.種別iに分類されるアンカーの損傷寿命を確率変数 ζ_i で表し、確率密度関数 $f_i(\zeta_i)$ 、分布関数 $F_i(\zeta_i)$ に従って分布すると仮定すると、初期時点か ら任意の時間 ζ_i まで損傷が発生しない確率は、全事象確率1から時点 ζ_i までに損傷が発生す る確率 $F_i(\zeta_i)$ を差し引いた値

$$\widetilde{F}_i(\zeta_i) = 1 - F_i(\zeta_i) \tag{3.5}$$

で表される.ここで,アンカーが時点 ζ_i まで損傷を受けず,かつ期間[$\zeta_i, \zeta_i + \Delta \zeta_i$]中に初めて損傷を受ける確率は次式で表される.

$$\lambda_i(\zeta_i)\Delta\zeta_i = \frac{f_i(\zeta_i)\Delta\zeta_i}{\widetilde{F}_i(\zeta_i)}$$
(3.6)

ここで、 $\lambda_i(\zeta_i)$ はアンカーが時点 ζ_i まで損傷を受けず、かつ当該時点で損傷を受ける確率 密度で、ハザード率と呼ぶ.ここで、式(3.5)を微分すれば



図 3-5 性能低下過程のモデル化

$$\frac{d\tilde{F}_i(\zeta_i)}{d\zeta_i} = -f_i(\zeta_i) \tag{3.7}$$

を得る.この時,式(3.6)は次式のように変形できる.

$$\lambda_{i}(\zeta_{i}) = \frac{f_{i}(\zeta_{i})}{\widetilde{F}_{i}(\zeta_{i})} = -\frac{\frac{dF_{i}(\zeta_{i})}{d\zeta_{i}}}{\widetilde{F}_{i}(\zeta_{i})}$$

$$= \frac{d}{d\zeta_{i}} \left(-\log \widetilde{F}_{i}(\zeta_{i})\right)$$
(3.8)

また、式(3.8)を積分し、未損傷確率 $\widetilde{F}_{i}(\zeta_{i})$ に関して変形し直すと

~.

$$\widetilde{F}_{i}(\zeta_{i}) = \exp\left[-\int_{0}^{\zeta_{i}} \lambda_{i}(u) du\right]$$
(3.9)

を得る.

ここで,アンカーの健全度ランクが *i*から *i*+1 へ推移する時間間隔を,健全度ランク *i*のアンカーの損傷寿命ととらえることにより,上記で定式化したハザードモデルをマルコフ過程を用いた性能低下モデルに適用することが可能となる.

いま,アンカーの性能低下過程を図 3-5 に示すようにモデル化する. カレンダー時刻 τ_{i-1} において,健全度が i-1 から i に推移したと考える. ここで,カレンダー時刻 τ_{i-1} を初期時 点とする時間軸(以下サンプル時間軸と称す)を導入する.以後,このサンプル時間軸上の 時刻を「時点」と称し,カレンダー時間軸上の「時刻」と区別する. 点検時刻 τ_A , τ_B は時 点 y_A , y_B に一致し, $y_A=\tau_A-\tau_{i-1}$, $y_B=\tau_B-\tau_{i-1}$ が成立する. なお,前述の通り,定期検査スキー ムでは健全度ランク i が始まったカレンダー時刻 τ_{i-1} に関する情報を獲得できないが,当面 サンプルの時点情報が既知であると仮定して指数ハザードモデルの説明を行う.

ここで、アンカーの健全度ランクがサンプル時点 y_i まで i で推移し、かつ時点 y_i で i+1 に推移する確率密度 $\lambda_i(y_i)$ を

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i > 0 \quad (- \varepsilon i) \tag{3.10}$$

とすると,指数ハザードモデルが成立する.式(3.10)は指数ハザード関数であり,この指数 ハザード関数を用いることによって,アンカーの性能低下過程が過去の履歴に依存しない というマルコフ性を表現することが可能となる.式(3.9)を用いれば,健全度ランク *i* の寿 命が *y_i*以上となる確率は

$$\widetilde{F}_{i}(y_{i}) = \exp\left[-\theta_{i}y_{i}\right]$$
(3.11)

と表され,指数ハザードモデルが得られる.また,健全度ランク i の寿命分布を表す確率 密度関数は次式で示される.

$$f_i(\zeta_i) = \theta_i \exp\left[-\theta_i \zeta_i\right]$$
(3.12)

また、当該健全度ランクに初めて到達した時点から、性能低下が進行して次の健全度ランクに到達するまでの期待期間長(以下期待寿命と称す) RMD_i は,生存関数 $\widetilde{F}_i(y_i)$ を用いて、

$$RMD_{i} = \int_{0}^{\infty} \widetilde{F}_{i}(y_{i}) dy_{i} = \int_{0}^{\infty} \exp\left[-\theta_{i} y_{i}\right] dy_{i} = \frac{1}{\theta_{i}}$$
(3.13)

と表される.

いま,カレンダー時刻 τ_{i-1} に健全度が*i*に推移し,点検時刻 τ_A まで健全度*i*が継続した場合を考える.この時,サンプル時点 y_A から,追加的に z_i 以上にわたって健全度*i*が継続する確率 $\tilde{F}_i(y_A + z_i | \zeta_i \ge y_A)$ は,

$$\widetilde{F}_{i}(y_{A} + z_{i} \mid \zeta_{i} \ge y_{A}) = \Pr[\zeta_{i} \ge y_{A} + z_{i} \mid \zeta_{i} \ge y_{A}]$$

$$(3.14)$$

と定義される. 確率 $F_i(y_i)$ の定義および式(3.11)より,式(3.14)は

$$\frac{\Pr[\zeta_i \ge y_A + z_i]}{\Pr[\zeta_i \ge y_A]} = \frac{F_i(y_A + z_i)}{\widetilde{F}_i(y_A)} = \frac{\exp[-\theta_i(y_A + z_i)]}{\exp[-\theta_i y_A]} = \exp[-\theta_i z_i]$$
(3.15)

と変形できる. すなわち, 点検時点 y_A において健全度ランクがiに判定され, 次の点検時 $y_B = y_A + Z$ においても健全度ランクがiに判定される確率は

$$\Pr[s(y_B) = i \mid s(y_A) = i] = \exp[-\theta_i Z]$$
(3.16)

と表される.ただし,Zは点検時点の間隔を表す.式(3.16)はマルコフ推移確率 T_{ii}に他ならない.すなわち,指数ハザード関数を用いた場合,推移確率 T_{ii}はハザード率 θ_iと点検間隔 Z にのみ依存し,時点 y_A, y_Bの正確な情報を用いなくとも推移確率を推定することが可能となる.

3.2.4 推移確率の導出

前項では指数ハザードモデルを定式化し,指数ハザード関数を用いて点検間隔 Z の推移 確率行列の対角要素を求めた.本項では推移確率の対角要素以外の要素の導出を行う.

まずは点検時点 $y_A \ge y_B$ の間に健全度ランクが i から i+1 へ推移する推移確率を求める. 2つの点検時点に挟まれた期間[y_A , y_B)の間に健全度ランクが i から i+1 へ推移するためには, 1)時点 y_A から時点 $y_A + z_i (z_i \in [0, Z))$ まで健全度ランクが i のまま推移し, 2)時点 $y_A + z_i$ で健 全度ランクが*i*から*i*+1 へ推移し,3)時点 y_A+z_i から時点 y_B まで健全度ランクが*i*+1 のまま 推移しなければならない. 定期点検スキームでは健全度ランクが*i*から*i*+1 へ推移する正 確な時点は把握できないが,健全度ランクの推移が時点 $(y_A + z_i) \in [y_A, y_B)$ で生起したと仮 定する. すると,時点 y_A から時点 $y_A + z_i(z_i \in [0, Z))$ まで健全度ランクが*i*のまま推移し, 時点 $y_A + z_i$ で健全度ランクが*i*から*i*+1 へ推移する(上記 1), 2)が同時に生起する)条件付き 確率密度関数 $g_i(z_i | \zeta_i \ge y_A)$ は

$$g_i(z_i \mid \zeta_i \ge y_A) = \frac{f_i(z_i + y_A)}{\widetilde{F}_i(y_A)} = \frac{\theta_i \exp\left[-\theta_i(z_i + y_A)\right]}{\exp\left[-\theta_i y_A\right]} = \theta_i \exp\left[-\theta_i z_i\right]$$
(3.17)

と表すことができる.したがって,時点 y_A において健全度ランクが i であり,かつ時点 y_A+z_i で健全度ランクが i から i+1 へ推移し,かつ時点 y_B において健全度ランクが i+1 と判定される(上記 1), 2), 3)が同時に生起する)条件付き確率密度 $q_{i+1}(z_i | \zeta_i \ge y_A)$ は

$$q_{i+1}(z_i \mid \zeta_i \ge y_A) = g_i(z_i \mid \zeta_i \ge y_A) \cdot \widetilde{F}_{i+1}(y_B - z_i - y_A)$$

= $\theta_i \exp\left[-\theta_i z_i\right] \exp\left[-\theta_{i+1}(Z - z_i)\right]$
= $\theta_i \exp\left[-\theta_{i+1}Z\right] \exp\left[-(\theta_i - \theta_{i+1})z_i\right]$ (3.18)

と表すことができる.以上の議論では,健全度ランクが *i* から *i*+1 へ推移する時点 $(y_A + z_i) \in [y_A, y_B)$ を固定していたが,健全度ランク *i*の寿命 ζ_i は確率変数であり, z_i は範囲[0, Z)の間で変化し得る.したがって,点検時点 y_A と y_B の間に健全度ランクが *i* から *i*+1 へ推移する推移確率 T_{ii+1} は,次式で表される.

$$T_{ii+1} = \Pr[s(y_B) = i+1 | s(y_A) = i] = \int_0^Z q_{i+1}(z_i | \zeta_i \ge y_A) dz_i$$

$$= \int_0^Z \theta_i \exp[-\theta_{i+1}Z] \exp[-(\theta_i - \theta_{i+1})z_i] dz_i$$

$$= \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} (-\exp[-\theta_i Z] + \exp[-\theta_{i+1}Z])$$
(3.19)

ただし、上式において $\theta_i \ge \theta_j$ の大小関係に関わらず $T_{ii+1}>0$ が成立する.また、 $\theta_i \neq \theta_{i+1}$ の仮定より $T_{ii+1}<1$ が成立する.以上の性質は式(3.19)の導出過程から自明であり、証明は省略する.

次に、2つの点検時点の間に健全度ランクが *i* から *j*(*j*≥*i*+2)へ2ランク以上推移する推移 確率を求める.健全度ランクが *j* の状態が継続する期間の分布を表す確率密度関数を *f_j*(*y_j*), 分布関数を *F_j*(*y_j*)とし、健全度ランクが *j* の状態に関するハザード関数を $\lambda_j(y_j) = \theta_j$ と表す. 期間の間に健全度ランクが [*y_A*, *y_B*)の間に健全度ランクが *i* から *j* へ推移するためには、1) 時 点 *y_A* から時点 *y_A* + *z_i*(*z_i* ∈ [0,*Z*))まで健全度ランクが *i* のまま推移し、2) 時点 *y_A*+*z_i* で健全 度ランクが *i* から *i*+1 へ推移し、3) 時点 *y_A*+*z_i* から時点 *y_A*+*z_i*+*i*(<*y_B*)まで健全度ランク *i*+1 のまま推移し、時点 *y_A*+*z_i*+*i* において健全度ランクが *i*+2 に推移する. さらに、4) 時点 *y_A*+*z_j*-*i*(<*y_B*)に健全度ランクが *j* に推移し、時点 *y_B*まで健全度ランクが *j* のまま推移すると いう事象が同時に生起しなければならない.以上 1), 2), 3), 4)の事象が同時に生起する 条件付き確率密度 $q_j(z_i, z_{i+1}, \dots, z_{j-1} | \zeta_i \ge y_A)$ は

$$q_{j}(z_{i}, z_{i+1}, \dots, z_{j-1} | \zeta_{i} \ge y_{A}) = g_{j}(z_{i} | \zeta_{i} \ge y_{A}) \prod_{m=i+1}^{j-1} f_{m}(z_{m}) \widetilde{F}_{j}(Z - \sum_{m=1}^{j-1} z_{m})$$

$$= \prod_{m=i}^{j-1} \theta_{m} \cdot \exp\left[-\sum_{m=1}^{j-1} \theta_{m} z_{m} - \theta_{j}(Z - \sum_{m=1}^{j-1} z_{m})\right]$$

$$= \prod_{m=i}^{j-1} \theta_{m} \cdot \exp\left[-\theta_{j} Z - \sum_{m=1}^{j-1} (\theta_{m} - \theta_{j}) z_{m}\right]$$
(3.20)

と表すことができる.以上の議論では, $z_i, z_{i+1}, \dots, z_{j-1}$ を固定していたが,健全度ランク $i(i=1,\dots,J-1)$ の寿命 ζ_i は確率変数であり, $z_i \ge 0,\dots, z_{j-1} \ge 0$ ($j \le J$)は

$$0 \le z_i + z_{i+1} + \dots + z_{j-1} \le Z \tag{3.21}$$

を満足する範囲で自由な値をとる.したがって、点検時点 y_A と y_B の間に健全度ランクが iから $j(j \ge i+2) \sim 2$ ランク以上推移する推移確率 T_{ij} は、若干の計算¹⁶⁾により、

$$T_{ij} = \Pr[s(y_B) = j | s(y_A) = i]$$

= $\int_0^Z \int_0^{Z-z_i} \cdots \int_0^{Z-\sum_{m=1}^{j-2} z_m} q_j(z_i, \cdots, z_{j-1} | \zeta_i \ge y_A) dz_i \cdots dz_{j-1}$
= $\sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp[-\theta_k Z]$ (3.22)

となる.途中計算に関しては文献¹⁶⁾に詳しく説明されており、参照されたい.ただし、式 (3.22)より、 θ_m と θ_k 、 θ_{m+1} と θ_k の大小関係に関わらず $0 < T_{ij} < 1$ が成立する.また、表記上の 規則として、

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} = 1 & (k \le i + 1\mathcal{O} \succeq \mathfrak{E}) \\ \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} = 1 & (k \ge j\mathcal{O} \succeq \mathfrak{E}) \end{cases}$$
(3.23)

が成立すると考える.また推移確率 T_{iJ} に関しては式(3.4)より,

$$T_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} T_{ij}$$
(3.24)

と表すことができる.

3.2.5 推移確率の推定方法

本項では前項までに導出した推移確率行列の各要素を推定する方法について説明する.

K本のアンカーに関して点検結果が得られたとし,各点検結果サンプルk(以下アンカーkと表記する)($k = 1, \dots, K$)には,それぞれ,2つの連続する定期検査が実施された時刻 $\tau^{k}_{A}, \tau^{k}_{B}$ と,その時刻での健全度ランク $s(\tau^{k}_{A}), s(\tau^{k}_{B})$ に関する情報が記録されている.点検サンプルによって点検間隔が異なっていても差し支えがない.以上の点検結果に基づいて,アン

カーkの点検間隔を $Z^{k}=\tau^{k}_{B}-\tau^{k}_{A}$ と定義する. さらに 2 つの点検時刻間の健全度ランクの推移 パターン情報に基づいて、ダミー変数 $\delta^{k}_{ij}(i, j=1, \cdots, J)$ を次式で定義する.

$$\delta_{ij}^{k} = \begin{cases} 1 & s(\tau_{A}^{k}) = i, s(\tau_{B}^{k}) = j \mathcal{O} \mathfrak{h} \\ 0 & \mathcal{E} \mathfrak{h} \mathfrak{U} \mathfrak{h} \mathcal{O} \mathfrak{h} \end{cases}$$
(3.25)

すると、定期点検スキームの下で得られるアンカーk が有する情報は $\Xi^{k} = (\delta^{k}, Z^{k})$ として整理される. アンカーk の性能低下過程は指数ハザード関数 $\lambda^{k}_{i}(y^{k}_{i}) = \theta^{k}_{i}$ で表されるが、本研究では同一地質条件下での同一健全度におけるアンカーのハザード率は、アンカーによらず等しいという仮定を設け、 $\theta^{k}_{i} = \theta_{i}(i = 1, ..., J, k = 1, ..., K)$ として推定する. また、本研究で提案する健全度ランク低下モデルにおいては、まず各健全度におけるハザード率 θ_{i} を推定し、次に推移確率 T_{ij} を推定することになる. 以下では推移確率の推定方法について説明を行う.

アンカーkに関して獲得できる情報は $\overline{\Xi}^{k} = (\overline{\delta}_{ij}^{k}, \overline{Z}^{k})$ として整理される.ここで,記号「」 は実測値であることを示す.このとき,推移確率 T_{ij} はデータが観測された点検間隔 \overline{Z}^{k} と 未知パラメータであるハザード率 $\theta = (\theta_{1}, \dots, \theta_{J-1})$ の関数として $T_{ij} = (\overline{Z}^{k}: \theta)$ と表すことが できる.また,K本のアンカーの性能低下過程が互いに独立であると仮定すれば,全点検 サンプルの性能低下パターンの同時生起確率密度を表す対数尤度関数は

$$\ln[L(\theta)] = \ln\left[\prod_{i=1}^{J-1}\prod_{j=i}^{J}\prod_{k=1}^{K} \{T_{ij}(\overline{Z}^{k}:\theta)\}^{\overline{\delta}_{ij}^{k}}\right]$$

= $\sum_{i=1}^{J-1}\sum_{j=i}^{J}\sum_{k=1}^{K}\overline{\delta}_{ij}^{k}\ln[T_{ij}(\overline{Z}^{k}:\theta)]$ (3.26)

と表すことができる ^{23),24)}. 点検データ $\bar{\delta}^{k}_{ij}, \bar{Z}^{k}$ は確定値であり, 対数尤度関数は未知パラメ ータ θ の関数である.ここで, 式(3.26)を最大にするようなパラメータ θ の最尤推定値は,

$$\frac{\partial \ln[L(\theta)]}{\partial \theta_i} = 0 \qquad (i = 1, \cdots, J - 1) \tag{3.27}$$

を同時に満足するような $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{J-1})$ で与えられる. これらの最適化条件は *J*-1 次の連立 非線形方程式であり, Newton 法を基本とする逐次反復法を用いて解くことが可能である²⁵⁾. また,繰り返し計算で得られた $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{J-1})$ に基づいて任意の期間 *Z* における推移確率 *T_{ij}*が算定される. ここで,本研究においては 1 年間の推移を表す推移確率行列(式(3.3))を 設定する.

また,以上の操作で推定した推移確率行列を用いてアンカーの将来状態を予測する場合, 時刻 t におけるアンカーの状態行列 S(t)を式(3.28)のように定義すると時刻 t+1, t+τ におけ るアンカーの状態行列 S(t+1), S(t+τ)の推定値はそれぞれ式(3.29), (3.30)で与えられる.

$$S(t) = \begin{bmatrix} S_{VI}(t) & S_{V}(t) & S_{IV}(t) & S_{III}(t) & S_{II}(t) & S_{I}(t) \end{bmatrix}$$
(3.28)

$$S(t+1) = S(t) \cdot T \tag{3.29}$$
$$S(t+\tau) = S(t) \cdot T^{\tau}$$

(3.30)

以上の手順でアンカーの将来状態の予測を行う.なお,本研究では推移確率行列はアン カーの供用期間を通じてただ1つに決まるとし,マルコフ過程を用いた性能低下のモデル 化ではアンカーの性能低下特性は一定であると仮定する.

3.2.6 簡易モデルによる性能低下のモデル化

前項までで、マルコフ過程に指数ハザードモデルを適用してアンカーの性能低下をモデ ル化する手法について説明したが、文献¹⁶⁾より、本手法では点検結果のサンプル数が 2000 を下回る場合に推定精度が悪くなるという報告がある.また、本手法では Newton 法によ る逐次反復法を用いてパラメータの最尤推定値を計算するが、サンプル数が少ない場合に は、計算が収束せず、解が得られない可能性がある.実際に本研究で用いるリフトオフ試 験結果のサンプル数は目視点検結果と比較しても遥かに少なく、リフトオフ試験結果に本 手法を適用しても解が得られない場合がある.このような場合に対処するために、本研究 においては文献^{12),13),15)}の簡易的に推移確率を推定するモデル(以下簡易モデルと称す)を 援用する.以下で、このモデルにおける推移確率を推定する手順を説明する.

まず,指数ハザードモデルによる推移確率の推定手法とは異なり,簡易モデルでは,1 年間の健全度ランク推移は現状維持,もしくは1ランクのみの推移とする仮定を設ける. この仮定の結果,式(3.3)は以下のように書き換えられる.

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、最低ランクでは吸収状態となり $T_{II} = 1$ が成立する.

表 2-2 および表 2-4 で示したような,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,推移行列の成分は図 3-5 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し,*i*<*j*,*k*<*l*,*j*<*l*の関係 が成り立つことに留意されたい.すなわち,前項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.



図 3-5 簡易モデルにおける最適推移確率行列同定手順

 $S_{VI}(t) = S_{VI}(t-1) \cdot T_{VIVI}$ $S_{V}(t) = S_{VI}(t-1) \cdot T_{VIV} + S_{V}(t-1) \cdot T_{VV}$ $S_{IV}(t) = S_{V}(t-1) \cdot T_{VIV} + S_{IV}(t-1) \cdot T_{IVIV}$ $S_{II}(t) = S_{IV}(t-1) \cdot T_{IVIII} + S_{II}(t-1) \cdot T_{IIIIII}$ $S_{II}(t) = S_{II}(t-1) \cdot T_{IIII} + S_{II}(t-1) \cdot T_{IIII}$ $S_{II}(t) = S_{II}(t-1) \cdot T_{IIII} + S_{II}(t-1) \cdot T_{IIII}$ (3.32)

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、推移確率行列のランク 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,同一斜面群のアンカーについて,施工~1回目の点検時点までの性 能低下過程と,1回目の点検時点~2回目の点検時点までの性能低下過程それぞれの推移確 率行列を算定する(図 3-5 中の T_{A1}, T_{A2}, T_{B1}, T_{B2}).次に,得られたこの二つの性能低下過 程を平均化し,同一斜面群のアンカー毎に一つの暫定推移確率行列を計算する(図 3-5 中の T_A, T_B). 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 ることで地質条件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 能低下過程を表す推移確率行列を最適推移確率行列とし,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,地質条件毎の最適推移確率行列を同定する.

ただし、この手法を用いても点検結果のサンプル数の制約から、厳密解を求めるのは困 難な場合がある.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.すなわ ち、それぞれの点検年次において、各ランクの残差の二乗和を最小化することで、誤差の 分散を最小化し、平均的にもっともらしい推移行列を求めるものとした.

3.3 ワイブルハザードモデルを用いた性能低下モデルの概要

本節では、ワイブルハザードモデルを用いてアンカーの性能低下をモデル化する手法について、その概要を述べる.

3.3.1 モニタリング情報の不完全性

ワイブルハザードモデルを推計するためには、施設の故障の有無に関する時系列データ の蓄積が必要となる.いま、あるアンカーの点検・補修に関する時系列データが図3-6に示 すように与えられたとする.同図において、時刻₁においてアンカーの供用が開始され、 時刻₁に故障が発生し、最初の寿命が終了している.次に、時刻₂においてアンカーが更新 され、時刻₁に故障が発生している.図3-6に示す例では、期間[1, τ_a]および[τ₂, τ_b]がそれ ぞれ1つのアンカーの寿命サイクルと対応している.ここで、時刻₃に更新されたアンカー の寿命サイクル[τ₃, τ_c]を考える.τ_cは現在時刻であり、当該アンカーは現在時刻において故 障が発生していないと考える.このような寿命サイクルは現在時刻で終了しておらず、不 完全サイクルを形成している.このように不完全サイクルを形成しているサンプルを不完 全サンプルと呼び、一方、供用(更新)された時刻から故障が発生するまでの完全なライフ サイクルが利用可能なサンプルを完全サイクルと呼ぶ.さらに、図3-6に示すように、モニ タリング期間中、施設の故障の有無に関するデータが常時得られるような理想的なモニタ リング情報であり、完全モニタリング情報と呼ぶ.このような完全モニタリング情報は、 例えばトンネル照明等においては、センサー等による連続モニタリングを実施することで 獲得することが可能である.

しかし、多くの土木施設の劣化状態を常時観測することは不可能である.現実には、時間軸上の限られた時刻において実施される点検業務を通じて施設の劣化状態をモニタリン グできることが少なくない.このようなモニタリングスキームとして、ある一定の時間間 隔を経て定期的に施設を点検するモニタリングスキームを考える.このような定期モニタ リングスキームで獲得できる情報を定期モニタリング情報と呼ぶ.図3-7に示すように、時



刻*τ*wと*τr*にすべてのアンカーの劣化状態を点検するようなスキームを考える.さらに、サ ンプル時点軸上における2つの連続する点検時点をそれぞれ*W_i*,*T_i*(*W_i*<*T_i*)と表す.同図中の アンカーAの場合,時点*W_A*では故障が発生していないが,時点*T_A*では故障が発生している. この場合,故障が発生した正確な時刻は観測できないが,期間(*W_A*,*T_A*]中のどこかで故障が 発生したという完全サンプルを獲得できる.一方,アンカーBの場合,いずれの点検時点 *W_B*,*T_B*においても,故障が発生していない.この場合,アンカーの寿命は点検期間長*T_B*よ りも長いという情報のみが獲得できる不完全サンプルとなる.さらに土木施設の中には, ある1つの特定時点において実施された点検結果のみが得られる場合があり,このようなモ ニタリングスキームの下で得られる情報を一斉モニタリング情報と呼ぶ.この場合,図3-8 に示すように,時刻*τ_T*に実施される一斉点検において,アンカーが故障している場合(アン カー*C*),あるいは故障していない場合(アンカー*D*)のいずれかのみが観測される.前章で示 した本研究で用いるアンカーの点検結果は,目視点検結果は図3-7に示すような定期モニタ リング情報、リフトオフ試験結果は図3-8に示すような一斉モニタリング情報にあたる.

3.3.2 ワイブルハザードモデルの概要

時間とともに故障率が変化するメカニズムを表現する代表的なハザードモデルとして, ワイブルハザードモデルが提案されており,故障解析の分野で適用されている.また,ワ イブルハザードモデルは点検の評価法が損傷/健全といった二値である場合に適用される が,アンカーの点検結果をこのような二値問題として扱うことで,目視点検結果に含まれ るランク間の点検員のバイアスの影響を少なくすることができると期待される.このこと を踏まえ本研究でも,アンカーの故障率を評価するにあたりワイブルハザードモデルを用 いる.

式(3.9)で定式化したハザードモデルにおいて,ハザード率 $\lambda_i(t)$ をワイブルハザード関数に特定する.ここで,ワイブルハザード関数は次式で表される.

$$\lambda_i(t) = \theta_i m t^{m-1} \tag{3.33}$$

この時,アンカーの寿命の確率密度関数 $f_i(t)$,および生存確率 $\widetilde{F}_i(t)$ は,それぞれ次式で表される.

$$f_i(t) = \theta_i m t^{m-1} \exp\left[-\theta_i t^m\right]$$
(3.34)

$$\widetilde{F}_{i}(t) = \exp\left[-\theta_{i}t^{m}\right]$$
(3.35)

ここで, m>1の場合は, 供用年数が増加するにつれて加速度的に劣化が進行することを 表す. 逆に, m<1の場合は, 初期劣化は進むが, 供用年数の増加により劣化の進行の程度 が小さくなる. m=1の場合は, 劣化の進行速度が使用時間に依存しないことを表す.

3.3.3 パラメータの導出

一般にワイブル解析を行う場合,点検データの形式が,故障した時点が得られている完 全モニタリング情報であり,かつすべての施設が故障するまで観測されている完全サンプ ルであることが望ましい.しかし,前述の通り本研究で用いるデータは,ある時点での一 斉点検のみに基づき,点検時点での損傷/健全のみを判断しているものである.文献¹⁷⁾では, 図3-7,3-8のような定期モニタリング情報および一斉モニタリング情報への対応として, 前節で指数ハザードモデルを解く際に行ったように,ダミー変数を用いて最尤推計法を行 っている.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,また,定期モニタリング情報における点検回数は僅か2回であり,点検期間長も非常 に長いものとなっている.そのため,文献¹⁷⁾のように最尤推計法を用いてパラメータを推 計することは困難である.そこで本研究では,ワイブルハザードモデルのパラメータ推計 に関して,故障間隔データの他に保全による打ち切りデータも含まれている場合に用いら れる手法の一つである累積ハザード法^{15),26)}を適用する.

具体的には、まず各点検結果に対して前述のマルコフ簡易モデルを適用し、観測時点に おいて故障していたアンカーに関して、その故障した年(以下故障年と称す)tを推定する.



図3-9 ワイブルハザードモデルのパラメータ同定手法の概念図

そして,推定された故障年と最終観測時点で健全であったデータの観測打ち切り年を合わ せて昇順に並べ,それらの逆順位の逆数をとったものを,それぞれのアンカーのハザード 率とする.このハザード率を故障データのみで累積したものを,累積ハザード率Hとする. ただし,累積ハザード率Hは,

$$H = \int_0^t \lambda_i(u) du \tag{3.36}$$

と表される.

ここで,表記の都合上,

$$m = \beta$$

$$\theta = \frac{1}{\alpha^{\beta}}$$
(3.37)

とおく.このとき,累積ハザード率Hは以下のように表される.

$$H = \int_0^t \lambda_i(u) du = \theta_i t^m = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$
(3.38)

ここで、両辺の自然対数をとると、式(3.38)は以下のように変形できる.

$$\ln[H] = \beta \ln\left[\frac{t}{\alpha}\right]$$

$$= \beta \ln[t] - \beta \ln[\alpha]$$
(3.39)

このとき、図3-9に示すように、式(3.39)の左辺ln[H]をy軸に、右辺第一項のうちのln[t] をx軸にとって散布図を作成し近似直線を引くことで、直線の傾きからβの値を、傾きおよ びy切片からαの値を得ることができる.ただし、図3-9はパラメータ同定手法の概念図であ り、散布図は実際の点検結果とは異なる.また本研究では、ワイブルハザードモデルのパ

区分	損傷	健全
WB-A	目視点検 ランクI~II	目視点検 ランクIII~VI
WB-B	目視点検 ランクI~III	目視点検 ランクIV~VI
WB-10	リフトオフ試験 ランクLF-I	リフトオフ試験 ランクLF-II~LF-VI
WB-20	リフトオフ試験 ランクLF-I~LF-II	リフトオフ試験 ランクLF-III~LF-VI
WB-30	リフトオフ試験 ランクLF-I~LF-III	リフトオフ試験 ランクLF-IV~LF-VI

表 3-1 ワイブルハザードモデルにおける損傷/健全の判定区分

ラメータ推定において、同一地質条件下でのアンカーの性能低下過程は、アンカーによら ず等しいという仮定を設ける.

以上の手法により同定されたパラメータ α , β を用いて, ワイブルハザードモデルにおけるアンカーの寿命の確率密度関数 $f(t, \alpha, \beta)$, および生存確率 $\tilde{F}(t, \alpha, \beta)$ は, それぞれ次式で表される.

$$f(t,\alpha,\beta) = \frac{\beta}{\alpha^{\beta}} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$$
(3.40)

$$\widetilde{F}(t,\alpha,\beta) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$$
(3.41)

以上の手順でアンカーの将来状態の予測を行う.なお,今回適用した累積ハザード法は, 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のものである.このため,今後 戦略的にデータを蓄積することで,性能低下モデルの精度を向上させる必要があることに 留意されたい.

3.3.4 損傷/健全の判定区分

アンカーを損傷あるいは健全の2種類に区分する二値問題として取り扱うためには、その閾値を設定することが必要となる.このため、本研究では、アンカーの損傷あるいは健 全に対して、表2-1に示す目視点検結果での健全度ランク、および表2-3に示すリフトオ フ試験結果で得られたアンカー緊張力の性能比に基づく健全度ランクを用いて、表3-1に 示すように、5種類の判定区分方法を適用する.すなわち、損傷/健全の判定区分WB-Aの 場合には、目視点検結果でランクII以下のアンカーを損傷、ランクIII以上のアンカーを 健全とする二値に、判定区分WB-Bの場合には、目視点検結果でランクIII以下のアンカ ーを損傷、ランク IV 以上のアンカーを健全とする二値に区分するものである.同様に、 損傷/健全の判定区分WB-10の場合には、リフトオフ試験結果でランクLF-Iのアンカーを 損傷, LF-II 以上のアンカーを健全とする二値に、判定区分 WB-20 の場合には、リフトオ フ試験結果でランク LF-II 以下のアンカーを損傷, LF-III 以上のアンカーを健全とする二 値に、判定区分 WB-30 の場合には、リフトオフ試験結果でランク LF-III 以下のアンカーを 損傷, LF-IV 以上のアンカーを健全とする二値に区分するものである. なお、目視点検結 果でランク I 以下のアンカーを損傷、ランク II 以上のアンカーを健全とする判定区分を設 定していないのは、表 2-2 に示すように、本研究で対象とするアンカーの目視点検結果に おいては、ランク I に判定されたものがほとんどないためである.

3.4 性能低下過程の異質性

本研究におけるハザードモデルを適用した性能低下モデルにおいては,前述のように同 ーの地質条件に打設されたアンカーの性能低下過程は等しいという仮定の下,マルコフ過 程モデルにおける推移確率およびワイブルハザードモデルにおけるパラメータを推定した. しかし,実際のアンカーの性能低下過程は個々のアンカーのタイプや材質はもちろんのこ と,施工条件や打設斜面の地盤条件,および降雨や温度といった暴露条件に依存し,これ らの相違によってアンカーの性能低下過程には異質性が存在するものと推察される.全て のアンカーの平均的な性能低下を予測するようなマクロ的観点からの性能低下予測の場合, 統計的性質上,上記の異質性が及ぼす影響は小さいと考えられるが,斜面単位でアンカー の性能低下を予測するようなミクロ的な性能低下予測の場合は,異質性の影響は大きくな るものと推察される.後述するように本研究では、アンカーの性能低下に関して斜面の安 定性を評価するために斜面単位でアンカーの性能低下を予測する必要があり、アンカーの 斜面単位での異質性を評価する必要性がある.

ここで、文献¹⁰のように舗装や道路床版の性能低下を対象とした場合、その性能低下過 程が交通量等に依存することが明確であると同時に、データとして得られやすく、性能低 下過程のモデル化においてこれを考慮している.一方、アンカーの場合は、前述の通り性 能低下の要因と性能低下による影響は複雑に関連しており、また施工から長時間が経過し た旧タイプアンカーにおいては、設計時に実施された地盤特性の調査結果や施工条件等の データが残されていない場合が多い.実際に本研究で対象とするアンカーにおいても、全 てのアンカーのデータとして利用できる情報量は少なく、性能低下の異質性を定量的に評 価することは困難である.

このような事情を踏まえ、本研究ではアンカーの性能低下の主要因を腐食によるアンカーの断面欠損と捉え、その誘因が透水性などの斜面の地盤条件に依存するものと仮定する. この観点から本研究では目視点検結果およびリフトオフ試験結果を地質条件で分類し、地 質条件毎に本章で提案したアンカーの性能低下モデル適用することで、アンカーの性能低 下過程の異質性を考慮することとする.

第4章 斜面の安定性評価手法

本研究では、斜面の安定性を考慮した補修優先順位付けや予算管理に関する一検討手法 を提案するに当たって、斜面の安定性評価を行う必要がある.第3章では、アンカーの性 能過程をマルコフ過程モデルおよびワイブルハザードモデルを用いてモデル化した.そこ で本章では、将来状態におけるアンカーの緊張力のモデル化を行い、斜面の安定性を評価 する手法について概要を説明する.

4.1 アンカーの緊張力変化のモデル化

ミクロ的観点からのアセットマネジメントの検討では,設計的/力学的な検討手法の適用 が必要となる.このような劣化を対象とした検討においては,目視点検に加えて,非破壊 試験およびリフトオフ試験等の精度の高いモニタリング技術を適用し,図4-1に示すよう な劣化曲線を算定することが必要となる.ただし,前述のようにアンカーの性能低下過程 は全てが同一ではないため,モニタリング結果より統一的な劣化曲線を算定するは困難で あり,劣化曲線を一意的に定められない可能性が高い.加えて,仮にモニタリング結果よ り劣化曲線が算定されたとしても,その結果は図4-1に示すように内挿結果に基づき,外 挿により将来状態を予測することになるため,不確実性を含むものである.このことを踏 まえ,本研究ではアンカーの緊張力変化のモデル化において,前章で算定した性能低下モ デルに基づき,統計手法により算定される劣化特性を反映させたモデル化手法を適用する.



図 4-1 計測結果に基づく性能低下曲線の模式図

4.1.1 マルコフ解析結果に基づくアンカーの緊張力変化のモデル化

本項ではマルコフ過程モデルを用いた将来予測結果に基づきアンカーの緊張力をモデル 化する手法について説明する.具体的には,目視点検結果における健全度ランクiのアン カーの性能比を,最高ランク VI においては 60%,ランク V~ランク I においては表 2-7 に 示すリフトオフ試験結果より得られた健全度ランクiの標本平均 $\mu_{k,i}$ を平均値,および変動 係数 COV_{MC} を用いて設定した分散 $\sigma_{k,i}$ を分散に持つ正規分布に依存すると仮定し,次式で 定義する.

$$f_{k}(x_{k,i}) = \frac{1}{\sigma_{k,i}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_{k,i} - \mu_{k,i}}{\sigma_{k,i}}\right)^{2}\right]$$
(4.1)

ここで、変動係数 COV_{MC} は次式で定義される.

$$\sigma_{k,i} = COV_{MC} \cdot (0.6 - \mu_{k,i}) \tag{4.2}$$

上式により、アンカーの劣化が進行するにつれて、アンカーの性能低下のばらつきが大きくなる様子を表現する.ただし本研究では、変動係数 COV_{MC}はすべての健全度ランクで 一定とし、リフトオフ試験結果のサンプル数の少なさ、および標本標準偏差を考慮して COV_{MC}=0.5 と設定した.このとき、ランクiのアンカーの緊張力 T_iは、許容アンカー力 T_a を用いて次式で表される.

$$T_i = T_a \cdot x_{k,i} \tag{4.3}$$

緊張力 *T_i*において,アンカーの性能比 *x_{k,i}*は前述したように正規分布を持つ確率変数であり,緊張力 *T_i*もまた,正規分布を有する確率変数となる.

いま,本研究におけるマルコフ過程を用いた性能低下モデルで推定されたある斜面にお ける,目視点検結果の健全度ランクの状態行列*S*が次式で定義されるとする.

 $S(t) = \begin{bmatrix} S_{\mathrm{VI}} & S_{\mathrm{V}} & S_{\mathrm{IV}} & S_{\mathrm{II}} & S_{\mathrm{II}} & S_{\mathrm{I}} \end{bmatrix}$ (4.4)

このとき、この斜面におけるアンカーの緊張力の合力 Tは確率変数 T_i ($i = VI, \dots, I$)の線形結合式として、次式で表される.

$$T = S_{\rm VI}T_{\rm VI} + S_{\rm V}T_{\rm V} + S_{\rm IV}T_{\rm IV} + S_{\rm III}T_{\rm III} + S_{\rm I}T_{\rm II} + S_{\rm I}T_{\rm I}$$
(4.5)

したがって,確率変数 $T_i(i = VI, \dots, I)$ が互いに独立であると仮定すると,合力Tは次式で示される μ_T , σ_T をそれぞれ平均値,分散に持つ正規分布で表現される確率変数になる.

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T - \mu_T}{\sigma_T}\right)^2\right]$$
(4.6)

$$\mu_{T} = S_{\rm VI} \mu_{\rm T, VI} + S_{\rm V} \mu_{\rm T, V} + S_{\rm IV} \mu_{\rm T, IV} + S_{\rm III} \mu_{\rm T, III} + S_{\rm II} \mu_{\rm T, II} + S_{\rm I} \mu_{\rm T, I}$$
(4.7)

$$\sigma_T^2 = S_{\rm VI}^2 \sigma_{\rm T, VI}^2 + S_{\rm V}^2 \sigma_{\rm T, V}^2 + S_{\rm IV}^2 \sigma_{\rm T, IV}^2 + S_{\rm III}^2 \sigma_{\rm T, III}^2 + S_{\rm II}^2 \sigma_{\rm T, II}^2 + S_{\rm I}^2 \sigma_{\rm T, II}^2$$
(4.8)

以上の流れで、マルコフ過程モデルで予測した将来状態におけるアンカーの緊張力、お

よびその合力を,確率モデルを用いて表現する.

4.1.2 ワイブル解析結果に基づくアンカーの緊張力変化のモデル化

本項ではワイブルハザードモデルを用いた将来予測結果に基づきアンカーの緊張力をモ デル化する手法について説明する.具体的には、アンカーの性能低下率を、目視点検結果 に基づくワイブル解析結果である生存確率 \tilde{F} を用いて設定した平均値 μ_f を平均値、および 変動係数 COV_{WB} を用いて設定した分散 σ_f を分散に持つ正規分布に依存すると仮定し、次式 で定義する.

$$f(x_f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_f - \mu_f}{\sigma_f}\right)^2\right]$$
(4.9)

$$\mu_f = 1 - \tilde{F} \tag{4.10}$$

すなわち、本研究においてはアンカー寿命の累積分布関数が、アンカー内部の性能低下率に相当すると仮定する.ここで、変動係数 COV_{WB}は次式で定義される.

$$\sigma_f = COV_{WB} \cdot \mu_f \tag{4.11}$$

上式により、アンカーの劣化が進行するにつれて、アンカーの性能低下のばらつきが大きくなる様子を表現する.ただし本研究では、変動係数 COV_{WB}はマルコフ過程モデルに基づく場合と同様に COV_{WB}=0.5 と設定した.また、アンカーの緊張力 T は、初期緊張力 T₀を用いて次式で表される.

$$T = T_0 \cdot (1 - x_f) \tag{4.12}$$

緊張力 T において,性能低下率 x_fは前述したように正規分布を持つ確率変数であり,緊張力 T は次式で示される µ_T, σ_T をそれぞれ平均値,分散に持つ正規分布で表現される確率 変数になる.

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T - \mu_T}{\sigma_T}\right)^2\right]$$
(4.13)

$$\mu_T = T_0 \cdot (1 - \mu_f) \tag{4.14}$$

$$\sigma_T^2 = T_0^2 \sigma_f^2 \tag{4.15}$$

以上の流れで,ワイブルハザードモデルで予測した将来状態におけるアンカーの緊張力 を,確率モデルを用いて表現する.

すなわち,本研究における斜面安定性の検討では,実務において補修を施す場合の状況 を考慮し,目視点家結果に基づく解析結果を用いてアンカーの緊張力を評価する.そして, 以上により予測した将来状態におけるアンカーの緊張力を,後述する斜面安定性評価手法 で応用する.



図 4-2 2 次元斜面崩壊モデル

4.2 斜面安定解析

本研究においては、3 次元の斜面安定解析を行うことで、より実斜面の状態に近い条件 下で斜面の安定性を検討し、斜面の破壊確率を算定する.ただし、本研究で対象とするア ンカーは前述のように施工時の詳細なデータがなく、斜面の地盤定数等が不明である場合 が多い.このため、本研究では、アンカー施工完了時の斜面の安全率が 1.20 となるように 逆算することにより、地盤の内部摩擦角 Ø を求めるものとする.その際、アンカーの設計 には 2 次元の斜面安定解析が用いられることから、本研究においても 2 次元の斜面安定解 析を援用する.

4.2.1 2次元斜面安定解析手法

本研究においては、2次元の斜面安定解析において、アンカー斜面の崩壊モデルとして 図 4-2 に示す 2次元円弧すべりモデルを適用する.このとき、アンカー斜面の安全率は次 式で定義される.

$$Fs(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[c'\beta_i + \left(w_i \cos \theta_i - u_i \beta_i \right) \tan \phi' \right] + \sum_{j=1}^{l} T_j \left(\sin \theta_j + \cos \theta_j \tan \phi' \right)}{\sum_{i=1}^{n} \left(w_i \sin \theta_i \right)}$$

$$\beta_i = b_i \sec \theta_i$$
(4.16)

ここに、c'は地山の粘着力(kN/m^2)、 ϕ' は地山の内部摩擦角(rad)、 w_i はスライス i の自重 (kN)、 b_i はスライス i の幅(m)、 θ_i はスライス i の水平軸からの傾角(rad)、 u_i はスライス iの間隙水圧(kN/m^2)を表す.また、 T_j はアンカーjの緊張力(kN)、 θ_j はアンカーjの打設角度 (rad)、nはスライス総数、lはアンカーの総本数を表す.前述のように、2次元斜面安定解



図 4-3 3 次元斜面崩壊モデル

析において, Fs=1.20 となるように式(4.16)を逆算することで, アンカー斜面の地山の内部 摩擦角 & を求める.

4.2.2 3次元斜面安定解析手法

本研究においては、アンカー斜面の崩壊モデルとして図 4-3 に示す 3 次元円弧すべりモ デルを適用する.また、斜面の安定性は次式に示す性能関数 Q を用いて定義する.

$$Q(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n} [c'A_i + (w_i \cos \gamma_{zi} - u_i A_i) \tan \phi'] + \sum_{j=1}^{l} T_j (\sin \theta_j + \cos \theta_j \tan \phi')}{\sum_{i=1}^{n} (w_i \sin \gamma_{zi})} - 1$$

$$\cos \gamma_{zi} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \alpha_{xi} + \tan^2 \alpha_{yi} + 1}}, \quad A_i = dx_i dy_i \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{xi} \sin^2 \alpha_{yi}}}{\cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi}}$$
(4.17)

ここに、
$$c'$$
は地山の粘着力(kN/m^2)、 ϕ' は地山の内部摩擦角(rad)、 w_i はブロック i の自重
(kN)、 dx_i および dy_i はブロック i の幅(m)、 a_{xi} および a_{yi} はブロック i の x 軸および y 軸から
の傾角(rad)、 u_i はブロック i の間隙水圧(kN/m^2)を表す.また、 T_j はアンカー j の緊張力(kN)、
 θ_j はアンカー j の打設角度(rad)、 n はブロック総数、 l はアンカーの総本数を表す.また、
性能関数 O に基づく斜面の安定条件は次式で表される

$$Q > 0$$
 (4.18)

性能関数 Q において, アンカーの緊張力 T_jは前述したように正規分布を持つ確率変数で あり,性能関数 Q もまた,正規分布を有する確率変数となる.ただし,本研究で提案する 斜面安定性評価においては,地山の粘着力 c',および地山の内部摩擦角 ø'は性能低下せず, 定数と仮定していることに留意されたい.また,実際の斜面ではアンカー1本1本が異な



図 4-4 破壊確率算定手法の概念図

る性能低下を示す可能性が考えられる.しかし、本研究はあくまでマクロ的な観点から多 くの斜面を対象としてアンカーの維持補修を検討するものであるため、1 つの斜面に打設 されているアンカーは全て同様の性能低下過程に従うものとし、斜面内での局所的な変動 に関しては考慮しない.

4.3 斜面の破壊確率算定手法

本節ではこれまで説明したアンカーの緊張力 *T_j*を用いて,斜面の年間破壊確率を算定す る方法²⁷⁾について述べる.前述の通り,本研究では,アンカー斜面におけるアンカー緊張 力を確率変数として扱っているため,性能関数 *Q*も確率変数となる.また,性能関数 *Q*が 線形関数であることから,アンカーの緊張力が正規分布に従う場合,性能関数 *Q*も正規分 布に従う.以下に具体的な算定手順を示すとともに,図 4-4 にその概念図を示す.

いま,時刻 t_i での性能関数 $Q(t_i)$ の平均値,および標準偏差をそれぞれ $\mu_{Q(ti)}$, $\sigma_{Q(ti)}$ とすると,その確率密度関数 $f_{Q(ti)}(x)$ は次式で表される.

$$f_{Q(t_i)}(x) = \frac{1}{\sigma_{Q(t_i)}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_{Q(t_i)}}{\sigma_{Q(t_i)}}\right)^2\right]$$
(4.19)

したがって、性能関数 Q が 0 未満となる確率 P(0)は、次式により算定される.

$$P(0) = \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\sigma_{Q(t_i)} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_{Q(t_i)}}{\sigma_{Q(t_i)}}\right)^2\right] dx$$
(4.20)

次に,式(4.21)に示す変数変換を行うことで,P(0)は式(4.22)に変換される.

$$s = \frac{x - \mu_{\mathcal{Q}(t_i)}}{\sigma_{\mathcal{Q}(t_i)}} \tag{4.21}$$

$$P(0) = \int_{-\infty}^{\left(\frac{\mu_{\mathcal{Q}(t_i)}}{\sigma_{\mathcal{Q}(t_i)}}\right)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}s^2\right] ds = \Phi\left(-\frac{\mu_{\mathcal{Q}(t_i)}}{\sigma_{\mathcal{Q}(t_i)}}\right) = \Phi(-\beta) \quad \left(\beta = \frac{\mu_{\mathcal{Q}(t_i)}}{\sigma_{\mathcal{Q}(t_i)}}\right) \tag{4.22}$$

ただし、 $\Phi(x)$ は標準正規確率変数 x に対する累積確率を表し、 β は信頼性指標である. また、 $\Phi(x)$ は標準正規分布関数であるため、次式の関係が成り立つ.

$$\Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \tag{4.23}$$

上式により算定された確率は図 4-4(a)の赤色部分の面積を表し、これは時刻 t_i 時点のア ンカーの緊張力に対する条件付き破壊確率 $P(t_i)$ に相当し、時間空間において離散量として 算定された条件付き確率である.本研究においては、条件付き破壊確率 $P(t_i)$ は t_i 年目の年 間破壊確率と定義することができる(図 4-4(b)).以下では、 t_i 年目の年間破壊確率を $\Delta p_f(t_i)$ と表記し、実際に t_i 年目に破壊する確率を $p_f(t_i)$ と表記して単純に破壊確率と呼び、年間破 壊確率と区別する.ここで、 t_i 年目の破壊確率は過去の破壊の履歴を考慮する必要があり、 次式で計算される.

$$p_{f}(t_{i}) = \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \Delta p_{f}(t_{j})) \Delta p_{f}(t_{i})$$
(4.1)

以上の手順により,アンカーの性能低下に伴う将来状態の斜面の安定性を評価する.次 章以降でアンカーの補修計画について詳説するが,本研究における斜面の安定性評価手法 を用いることで,斜面の安定性を考慮した維持補修計画の立案が可能になる.

第5章 維持補修計画の最適化手法

本章では,第3章および第4章で得られたアンカーおよび斜面の将来予測に基づいた, 維持補修計画の立案手法および LCC 算定手法の説明をする.

5.1 維持補修計画の立案

本節では、マルコフ過程モデルおよびワイブルハザードモデルにより予測されたアンカ ーおよび斜面の将来状態にそれぞれに対して、具体的な補修計画を立案する.

5.1.1 マルコフ解析結果に基づく維持補修計画の立案

マルコフ過程モデルにより予測されたアンカーおよび斜面の将来状態に対して維持補修 計画を立案するためには,具体的に,点検間隔,補修対象とする構造物の性能レベル,(以 下ターゲットレベルと称す),補修を行う際の補修方法といった要素を考慮する必要がある. 点検間隔は各時点において予測される構造物の性能状態,あるいは専門家の判断によって 決定され,補修方法は割り当てられる予算の制約,ターゲットレベルおよび補修後に期待 する構造物の性能レベルに依存する.

ここで,時刻 τ における健全度ランクの状態行列 S(τ)に基づき,何らかの補修作業が実施された後の状態は,補修行列 R を用いて,次式によって定義することができる.

$$S^*(\tau) = S(\tau) \cdot R \tag{5.1}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{\rm VI \, VI} & \cdots & R_{\rm VI \, I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{\rm I \, VI} & \cdots & R_{\rm I \, I} \end{bmatrix}$$
(5.2)

ここで、 $S^*(\tau)$ は補修後の状態行列,および $S(\tau)$ は補修前の状態行列を表し、補修行列 Rの要素 R_{ij} は、補修によって健全度ランクが i から j に推移する確率を表す.ただし、本研究では実務的観点から、上記の状態行列 $S(\tau)$ は目視点検結果による健全度ランクを用い、補修するアンカーを選定する.

また、本研究では図 5-1 に示すような以下の 3 つの補修プランをアンカーの維持補修計 画として設定する.

- 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.
- 2) プラン 2: 健全度ランクが I まで低下したアンカーに加え, 健全度ランク II のアンカ ーも打ち替える.
- プラン 3:健全度ランクが I および II まで低下したアンカーに加え、健全度ランクが III まで低下したアンカーも打ち替える.



図 5-1 マルコフ過程モデルに基づく維持補修計画の概要図

ただし、すべてのプランにおいて、打ち替えたアンカーの健全度ランクはランク VI に 戻り、その後の性能低下特性は補修前のアンカーのものと同様であると仮定する.この仮 定条件は、更新後のアンカーは二重防食が施された新タイプアンカーであることが予想さ れるが、本研究は旧タイプアンカーのみに着目しており新タイプアンカーについては検討 対象外としているため、実際の更新後のアンカーの性能低下過程をモデル化することが困 難であることから設定した仮想的な条件であることに留意されたい.そのため、今後補修 実績を積み、補修後のアンカーの性能低下過程のモデル化を検討する必要性がある.

また、それぞれの補修プランに対する補修行列 R は以下のように表される.

	1	0	0	0	0	0		[1	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	
	0	1	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	
D _	0	0	1	0	0	0	D _	0	0	1	0	0	0	D _	0	0	1	0	0	0	(5.2)
$\boldsymbol{\Lambda}_1 =$	0	0	0	1	0	0	$\mathbf{K}_2 =$	0	0	0	1	0	0	$\mathbf{\Lambda}_3 =$	1	0	0	0	0	0	(5.3)
	0	0	0	0	1	0	- -	1	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0	
	1	0	0	0	0	0		1	0	0	0	0	0		_1	0	0	0	0	0	

ここに, *R*₁, *R*₂および *R*₃はそれぞれ補修プラン 1, 2 および 3 の補修行列に該当する. さらに,本研究では点検実施間隔を 3 年,5 年,10 年,および 15 年の 4 種類を想定し,補 修プランを合わせて合計 12 種類の維持補修計画に関して議論する.



図 5-2 ワイブルハザードモデルに基づく維持補修計画の概要図

5.1.2 ワイブル解析結果に基づく維持補修計画の立案

本研究ではワイブルハザードモデルを適用するにあたり、アンカーの状態を損傷および 健全の二値で評価しており、アンカーの将来状態も損傷および健全のみが判定される.し たがって、ワイブルハザードモデルに基づく補修プランの内容は、損傷に判定されたアン カーのみを対象として実施するものとなる.具体的には、本研究では図 5-2 に示すように、 損傷に判定されたアンカーの全本打ち替えを行うものとする.このとき、時刻 τ において 補修が実施された後の生存確率 $\tilde{F}^{*}(\tau)$ は、次式によって定義される.

$$\widetilde{F}^*(\tau) = 1.0$$

(5.4)

図 5-2 および式(5.4)に示すように、点検実施後のアンカーの生存確率は、点検時のアン カーの状態にかかわらず 1.0 となる.ただし、点検時点で健全であったアンカーの劣化速 度は点検前から引き継がれるものとし、更新後のアンカーの性能低下特性は補修前のアン カーのものと同様と仮定する.ここで、本研究では実務的観点から、上記の生存確率は目 視点検結果に基づく解析結果を用い、表 3-1 に示す判定区分に従い補修するアンカーを選 定する.すなわち、本研究では実務において補修を施す場合の状況を考慮し、マクロ的な 観点からあくまで目視点検結果に基づき維持補修計画を立案する.

また、本研究では点検実施間隔を、マルコフ過程モデルに基づいた場合と同様に3年、5年、10年、および15年の4種類を想定し、これらの4種類の維持補修計画に関して議論する.

5.2 維持補修計画の LCC 評価手法

本節では,第3章および第4章で得られたアンカー・斜面の将来予測結果,および前節 で立案した維持補修計画に基づき,LCCを算定する手法について説明する.ここで,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を判断指標として,前節で立案した維持補修計画の中から,地質条件毎の 最適な補修計画の選択および維持補修の優先順位付けを行う.

5.2.1 LCC の定式化

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ができる計画であり, 具体的にはある一定期間において考えられうる全ての計画のうち,点検費用あるいは補修 費用等の各費用の合計額が最も小さい計画を意味する.

LCC は一般的に次式で定義される⁹⁾.

$$LCC = C_C + C_{MT} + C \tag{5.5}$$

ここで *C_c*, *C_{MT}*, *C_o*はそれぞれ建設費用,維持補修費用,およびオペレーション費用を 表す.ただし,式(5.5)に示す LCC は,対象とする構造物の種類に応じた不確実性要素によ ってその算定額が変動することが予想されるため,将来の不確実性要素を考慮して LCC の 評価式は以下のように書き換えられる⁹⁾.

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_O + \Delta R$$

$$\Delta R = \Delta R_C + \Delta R_{MT} + \Delta R_O$$
(5.6)

ここで、 ΔR_{c} 、 ΔR_{MT} 、 ΔR_{o} はそれぞれ建設費用に関するリスクコスト、維持補修費用に 関するリスクコスト、およびオペレーション費用に関するリスクコストを表す.現状での 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、既存構造物を対象として いる場合が多く、主に維持補修費用 C_{MT} および維持補修費用に関するリスクコスト ΔR_{MT} のみが検討対象とされている場合が多い.このため、本研究でも維持補修費用および維持 補修費用に関するリスクコストについてのみ考え、評価式は次式のように定義する.

$$LCC = C_{MT} + \Delta R_{MT} \tag{5.7}$$

また,本研究のおけるリスクの定義は一般の工学分野で用いられている次式を採用する.

$$R = p \times C_R \tag{5.8}$$

ここで、式(5.8)の $p \ge C_R$ はそれぞれ破壊確率と損失額を示しており、Rは期待損失を意味する. t_i 年目における斜面の破壊リスクコストを $R_f(i)$ とすると、前章で算定した斜面の破壊確率を用いて、 $R_f(i)$ は次式で表される.

$$R_f(i) = p_f(i) \times C_h \tag{5.9}$$

ここで、*C*_hは斜面の崩壊によって生じる復旧費用と、走行費用損失、時間損失による利用者損失額を合計した損失額として、崩壊時損失額と呼ぶ.崩壊時損失額は評価する斜面

の大きさ,斜面が存在する道路や迂回路,およびその道路の交通量データによって決定される.また,斜面が崩壊した後はアンカー斜面は存在せず,アンカーの性能低下は考慮せ ず点検も行わないという仮定を設ける.具体的な崩壊時損失額の算定手法については次項 で詳説する.

一方,維持補修費用 C_{MT}に関して,アンカーでは定期的な点検によって,性能低下レベ ルがターゲットレベルに達することが確認された場合に,アンカーの更新という補修が施 される.一方,性能低下が確認されたアンカーにおいても,そのレベルがターゲットレベ ルに達していなければ,対策不要として定期的な点検のみ実施される.つまり,ある一定 期間において必要になると想定される維持補修費用 C_{MT}は点検費用,および補修費用の2 種類からなり,それらの合計額は設定するターゲットレベルに依存する.

まず,点検費用はすべての立案計画において計上される費用であり,点検方法によって その費用は決定されるが,点検実施間隔に関わらず一定値をとる.また,点検費用行列 C_{ins} は,次式によって表される.

$$C_{ins} = \begin{bmatrix} c_i \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

ここに, *c*_i は点検費用を表す.次に,点検が実施された際に補修が必要であると判断された場合に補修が実施され,同時に補修費用が計上される.アンカーの将来予測結果に基づく補修費用行列 *C*_{rep} は,マルコフ過程モデルに基づく場合は *C*^{MC}_{rep},ワイブルハザードモデルに基づく場合は *C*^{WB}_{rep}を用いて,それぞれ次式によって表される.

$$C_{rep} = S(k \cdot t_m) \cdot C_{rep}^{MC}$$
(5.11)

$$C_{rep} = \left\{ 1 - \widetilde{F}(k \cdot t_m) \right\} \cdot C_{rep}^{WB}$$
(5.12)

ここに、 $S(k \cdot t_m)$ は補修が実施される前の状態行列を、 $\widetilde{F}(k \cdot t_m)$ は補修が実施される前の 生存確率を表す.ただし、前述の通り状態行列および生存確率は、目視点検結果に基づく 性能低下モデルによる将来予測結果である.また、 C_{rep}^{MC} および C_{rep}^{WB} は次式によって表される.

$$C_{rep}^{MC} = \begin{bmatrix} c_{\text{VI}} & c_{\text{V}} & c_{\text{IV}} & c_{\text{II}} & c_{\text{I}} \end{bmatrix}^{T}$$

$$C_{rep}^{WB} = \begin{bmatrix} c_{ref} \end{bmatrix}$$
(5.13)
(5.14)

ここに,式(5.13)における要素 c_iは各健全度ランクに対する補修費用を表す.また,上 付き添え字 T は転置を意味する.また,式(5.14)における c_{ref}はアンカー更新費用を表す. 以上において定義した各費用に基づき,本研究におけるアンカーの LCC 算定式は以下のよ うに表される.

期待LCC =
$$\sum_{k=1}^{x} \left[1 - \sum_{j=1}^{k \cdot t_m} p_f(j) \right] C_{ins} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{k \cdot t_m}$$

+ $\sum_{k=1}^{x} \left[1 - \sum_{j=1}^{k \cdot t_m} p_f(j) \right] C_{rep} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{k \cdot t_m}$ (5.15)
+ $\sum_{i=1}^{t} p_f(i) C_h \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^i$
 $x = t/t_m$ (5.16)

ここで、上式右辺第1項が点検費用、第2項が補修費用、第3項が斜面の破壊リスクコストを意味する.また、xはLCC評価期間 t における点検実施回数、tm は点検間隔を表す. なお、p は社会的割引率を表す.社会的割引率は想定される収入、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、実務においては対象国のマクロ経済の成長率もしくは 公定歩合等に連動して設定される.日本では4%を用いることが多く、本研究でも4%を採 用する²⁸⁾.

式(5.15)に関して,補修費用は点検が実施された時点と同時点で計上される.一方,崩壊 時損失額は点検の実施とは関係なく,斜面が崩壊した時点で計上される.前述したように, 斜面が崩壊した場合は以後のアンカーの性能低下は考慮せず,点検も実施しないという仮 定の下では,各費用が計上される確率は以下のように整理される.

式(5.15)右辺第1項,第2項において,ある点検時点で,点検費用,および補修費用が計 上される確率は,全確率1とその点検時点までの累積破壊確率の差となる.同式右辺第3 項において,崩壊時損失額が計上される確率は,単純に毎年の破壊確率と一致する.

ただし,式(5.15)は破壊確率 $p_f(i)$ に基づいて定式化されているが,前述のとおり,式(4.22) で算定される条件付き破壊確率は i年目の年間破壊確率 $\Delta p_f(i)$ であるため,式(5.15)はこれ を用いて以下のように書き換えられる.

期待LCC =
$$\sum_{k=1}^{x} \left[1 - \sum_{j=1}^{k \cdot t_m} \left[\prod_{l=0}^{j-1} \{1 - \Delta p_f(l)\} \right] \Delta p_f(j) \right] C_{ins} \left(\frac{1}{1 + \rho}\right)^{k \cdot t_m} + \sum_{k=1}^{x} \left[1 - \sum_{j=1}^{k \cdot t_m} \left[\prod_{l=0}^{j-1} \{1 - \Delta p_f(l)\} \right] \Delta p_f(j) \right] C_{rep} \left(\frac{1}{1 + \rho}\right)^{k \cdot t_m} + \sum_{i=1}^{t} \left[\prod_{j=0}^{i-1} \{1 - \Delta p_f(j)\} \right] \Delta p_f(i) C_h \left(\frac{1}{1 + \rho}\right)^i$$
(5.17)

ただし、上式において、 $\Delta p_f(0)=0$ となることに留意されたい.

5.2.2 崩壊時損失額の算定手法

本項では,LCC 算定に必要なリスクコストである斜面の崩壊時損失額の算定方法につい て述べる.

本研究における斜面崩壊時損失額 C_h は社会経済的な観点から堆積土砂の撤去および崩

壊斜面の復旧費用 c_rと迂回に伴う走行費用損失額 c^d_{ind}・時間損失額 c^t_{ind}の和として,次式のように定式化する.

$$C_h = c_r + c_{ind}^d + c_{ind}^t \tag{5.18}$$

 c_r は崩壊が生じた際に想定される土塊量から、土木工事積算マニュアルに基づき算定する.また、 c^{d}_{ind} と c^{t}_{ind} は次式で求めることができる.

$$c_{ind}^{d} = \sum n \times N_{m} (B_{m}^{L} \times l^{L} - B_{m}^{H} \times l^{H})$$

$$c_{ind}^{t} = \sum n \times N_{m} \times A_{m} \times \Delta t$$
(5.19)

ここで、nは通行規制日数を、 N_m は日交通量を表し、 B^L_m 、 B^H_m は車種毎の走行経費原単位(B^L_m が迂回時もしくは車線規制時、 B^H_m が現道走行時)を、 l^L 、 l^H はそれぞれ迂回時走行距離、現道走行距離を表す.また、 A_m は車種毎の時間価値原単位であり、 Δt は迂回や速度減少により余分にかかる時間を表す.これらの原単位は参考資料²⁹⁾を参照する.

なお、これらの利用者に関わる走行費用損失、時間損失はいずれも明確にキャッシュフ ローとして計上される財務便益ではなく、原単位を用いた貨幣価値換算で評価されること に留意されたい.

第6章 アンカーの維持補修計画の適用事例

本章では,前章までに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,その結果に対して考察を行う.

6.1 マルコフ解析結果

本節では、第2章で示した泥岩・砂岩・礫岩互層、流紋岩、花崗岩の3つの地質条件別 に分類した目視点検結果およびリフトオフ試験結果に対して、第3章で説明したマルコフ 過程を用いた性能低下モデルを適用して地質条件毎に推移確率行列を推定し、結果に対す る考察を行う.前述のように、目視点検結果に基づく場合は指数ハザードモデルを適用し、 リフトオフ試験結果に基づく場合はそのサンプル数の制約から簡易モデルを適用する.後 述する斜面の安定性評価および LCC 算定においては、目視点検結果に基づく指数ハザード モデルの結果を用いる.また、簡易モデルにより推移確率行列を推定した場合の推定精度 は文献¹³⁾においてある程度確認されているが、本研究でも指数ハザードモデルによる性能 低下モデルと簡易モデルによる性能低下モデルの推定精度の比較を行う.したがって、目 視点検結果に基づく場合にも、簡易モデルを適用した推移確率行列の推定を行う.

6.1.1 目視点検結果に基づくマルコフ解析結果

表 2-2 に示す目視点検結果に基づく,指数ハザードモデルによる推移確率行列の算定結 果と,簡易モデルによる最適推移確率行列の算定結果を,それぞれ表 6-1,表 6-2 に示す. また,これらの推移確率行列を用いて健全度ランクの性能低下の解析を行い,点検時の供 用年数毎に状態行列を算定する.この算定結果として,表 2-2 に示す目視点検結果と解析 結果の比較を図 6-1(a)~(c)に示す.同図によって,実際の点検結果と,マルコフ過程モデ ルを用いた場合のシミュレーション解析結果を比較し,それぞれのモデルにおける推定精 度とモデル化手法の妥当性を検証する.ただし,表 2-2 および図 6-1(a)~(c)中の点検結果 は同一地質条件の斜面のうち,供用年数が等しいアンカーの点検結果をひとまとめにした ものである.このため,各点検年次においてアンカーの総本数が極端に異なる場合や,例 えば図 6-1(a)中の供用 14 年ではランク V のアンカーがほとんど確認されないことに対し て,供用 15 年ではランク V のアンカーが多数確認されるといった事態が生じることに留 意する必要がある.

さらに,指数ハザードモデルを適用した場合は,式 3.13 によりアンカーの各健全度ランクの期待寿命を定量的に算定することが可能であるため,地質条件別に各健全度ランクの 期待寿命を算定する.また,この期待寿命の算定結果を図 6-2 に示す.

表 6-1 推移確率行列推定結果(目視点検結果・指数ハザードモデル)

(a) 泥岩・砂岩・礫岩互層

(b) 流紋岩

					-	
	VI	V	IV	III	II	Ι
VI	0.6380	0.3483	0.0136	0.0001	0	0
V	0	0.9300	0.0690	0.0010	0	0
IV	0	0	0.9703	0.0265	0.0032	0
III	0	0	0	0.7907	0.2057	0.0036
II	0	0	0	0	0.9669	0.0331
Ι	0	0	0	0	0	1.0000

	VI	V	IV	III	II	Ι
VI	0.6131	0.3751	0.0117	0.0001	0	0
V	0	0.9440	0.0555	0.0005	0	0
IV	0	0	0.9824	0.0176	0	0
III	0	0	0	0.9950	0.0049	0.0001
II	0	0	0	0	0.9703	0.0297
Ι	0	0	0	0	0	1.0000

(c) 花崗岩

	VI	V	IV	III	II	Ι
VI	0.7252	0.2709	0.0036	0.0003	0	0
V	0	0.9728	0.0240	0.0032	0	0
IV	0	0	0.7724	0.2273	0.0003	0
III	0	0	0	0.9973	0.0024	0.0003
II	0	0	0	0	0.7902	0.2098
Ι	0	0	0	0	0	1.0000

表 6-2 推移確率行列推定結果(目視点検結果・簡易モデル)

(a) 泥岩·砂岩·礫岩互層

(b) 流紋岩

	VI	V	IV	III	II	Ι
VI	0.7396	0.2604	0	0	0	0
V	0	0.9304	0.0696	0	0	0
IV	0	0	0.9689	0.0311	0	0
III	0	0	0	0.7441	0.2559	0
II	0	0	0	0	0.9550	0.0450
Ι	0	0	0	0	0	1.0000

	VI	V	IV	III	II	Ι
VI	0.6879	0.3121	0	0	0	0
V	0	0.9582	0.0418	0	0	0
IV	0	0	0.9742	0.0258	0	0
III	0	0	0	0.9916	0.0084	0
II	0	0	0	0	0.9889	0.0111
Ι	0	0	0	0	0	1.0000

(c) 花崗岩

	VI	V	IV	III	II	Ι
VI	0.4769	0.5231	0	0	0	0
V	0	0.9861	0.0139	0	0	0
IV	0	0	0.8804	0.1196	0	0
III	0	0	0	0.9999	0.0001	0
II	0	0	0	0	0.9999	0.0001
Ι	0	0	0	0	0	1.0000







(a-3) 供用 14 年









(a-2) 供用 13 年



(a-4) 供用 15 年



(a-6) 供用 22 年



(a-7) 供用 23 年



図 6-1(a) 目視点検結果とマルコフ解析結果の比較(泥岩・砂岩・礫岩互層)



(b-3) 供用 23 年

(b-4) 供用 28 年

図 6-1(b) 目視点検結果とマルコフ解析結果の比較(流紋岩)



(c-1) 供用 12 年



図 6-1(c) 目視点検結果とマルコフ解析結果の比較(花崗岩)



図 6-2 地質条件別期待寿命(指数ハザードモデル)

(a) 泥岩・砂岩・礫岩互層

(b) 流紋岩

	LF-VI	LF-V	LF-IV	LF-III	LF-II	LF-I
LF-VI	0.9036	0.0964	0	0	0	0
LF-V	0	0.8441	0.1559	0	0	0
LF-IV	0	0	0.8408	0.1592	0	0
LF-III	0	0	0	0.7702	0.2298	0
LF-II	0	0	0	0	0.8149	0.1851
LF-I	0	0	0	0	0	1.0000

	LF-VI	LF-V	LF-IV	LF-III	LF-II	LF-I
LF-VI	0.9409	0.0591	0	0	0	0
LF-V	0	0.9434	0.0566	0	0	0
LF-IV	0	0	0.8953	0.1047	0	0
LF-III	0	0	0	0.9090	0.0910	0
LF-II	0	0	0	0	0.9595	0.0405
LF-I	0	0	0	0	0	1.0000

(c) 花崗岩

	LF-VI	LF-V	LF-IV	LF-III	LF-II	LF-I
LF-VI	0.8804	0.1196	0	0	0	0
LF-V	0	0.8071	0.1929	0	0	0
LF-IV	0	0	0.8075	0.1925	0	0
LF-III	0	0	0	0.9019	0.0981	0
LF-II	0	0	0	0	0.8294	0.1706
LF-I	0	0	0	0	0	1.0000

6.1.2 リフトオフ試験結果に基づくマルコフ解析結果

本研究ではリフトオフ試験結果に基づいた性能低下過程の解析結果を,本章第3節において目視点検結果に基づく性能低下過程の解析結果と比較することで,アンカーの現状での内部性能の低下状況を把握する.

表 2-4 に示す 6 段階に区分したリフトオフ試験結果に基づく, 簡易モデルによる最適推 移確率行列の算定結果を表 6-3 に示す.また,前項と同様に,これらの推移確率行列を用 いて健全度ランクの性能低下の解析を行い,点検時の供用年数毎に状態行列を算定する. この算定結果として,表 2-4 に示すリフトオフ試験結果と解析結果の比較を図 6-3(a)~(c) に示す.ただし,前項でも述べた通り,本研究における点検結果のまとめ方により,各点 検年次においてアンカーの総本数が極端に異なる場合や,点検結果が構造物の性能低下の 不可逆性を満足しないといった事態が生じることに留意する必要がある.

ここで、すでに述べた通り、リフトオフ試験結果のサンプル数は目視点検結果のサンプ ル数と比較して、遥かに少ないものである.このため、本研究におけるリフトオフ試験結 果に基づく性能低下モデルにおいては、その推定精度には課題が残る.しかし、本研究は 限られた点検結果の有効利用によりアンカーの戦略的な維持補修計画を検討するものであ るため、これを許容する.また、前述の通り、リフトオフ試験結果に基づくマルコフ解析 では指数ハザードモデルは適用していないため、各健全度ランクの期待寿命は算定してい ないことに留意されたい.















(a-2) 供用 19 年



(a-4) 供用 22 年



(a-6) 供用 24 年



(a-7) 供用 25 年

図 6-3(a) リフトオフ試験結果とマルコフ解析結果の比較(泥岩・砂岩・礫岩互層)



(b-7) 供用 29 年

図 6-3(b) リフトオフ試験結果とマルコフ解析結果の比較(流紋岩)



図 6-3(c) リフトオフ試験結果とマルコフ解析結果の比較(花崗岩)

6.1.3 マルコフ解析結果に関する考察

表 6-1,表 6-2 および表 6-3 と図 6-2 に示す結果より、本適用事例においては地質条件 によってアンカーの性能低下速度が異なることが確認される.また、図 6-1 に示す結果よ り、本研究で提案した指数ハザードモデルを適用したマルコフ過程モデル、および簡易モ デルを適用したマルコフ過程モデルによるシミュレーション推定結果は、概ね目視点検結 果と整合性がとれている結果が多い.同様に、図 6-3 に示す結果からも、簡易モデルを適 用したマルコフ過程モデルによるシミュレーション推定結果は、概ねリフトオフ試験結果 と整合性がとれている結果が多いといえる.以上のことから、本研究でアンカーの性能低 下過程に寄与する異質性として地質条件に着目し、地質条件毎にアンカーの性能低下をモ デル化することに、ある程度の妥当性が確認されたものと推察される.

また、図 6-1 に示すように、指数ハザードモデルによるシミュレーション結果と簡易モ デルによるシミュレーション結果の間には、大きな差異は認められない.このことは、表 6-1 および表 6-2 に示す推移確率行列の比較からも確認される.表 6-1 および表 6-2 にお いて、対角項成分の推移確率の差異が小さいことから、本研究で推定した簡易モデルにお いても、ある程度指数ハザードモデルに近い推定精度が得られていることが分かる.しか しながら、図 6-1 および図 6-3 においては、一部の年次でマルコフ過程モデルによるシミ ュレーション結果が点検結果から外れている場合がみられる.以下では、このような結果 が得られた要因に関する考察を行う.

まず,指数ハザードモデルによるシミュレーション結果と簡易モデルによるシミュレー ション結果に大きな差異が認められなかった要因については,以下のように推察される. すなわち,本研究では推移確率行列が対象とする推移期間を1年と短く設定したため,簡 易モデルにおいて1年間の健全度ランク推移は現状維持,もしくは1ランクのみの推移と する仮定による制約の影響が小さかったものと推察される.表 6-1 においても全地質条件 において健全度ランクが2ランク以上推移する確率は非常に小さい値となっており,この 仮定条件が有効であったことが確認される.

次に、一部の比較結果においてシミュレーション結果が点検結果から外れる結果となっ た要因については、以下のように推察される.まず、本研究で用いた点検結果は同一地質 条件の斜面のうち、供用年数が等しいアンカーの点検結果をひとまとめにしたものである ため、各点検年次においてアンカーの総本数が極端に異なる場合や、点検結果が構造物の 性能低下の不可逆性を満足しないといった事態が生じる.ここで、本研究では地質条件毎 に推移確率行列をただ1つに決まると仮定し、地質条件全体の性能低下特性を平均的に求 めている.このため、性能低下過程のモデル化においてはアンカーの本数が多い年次の点 検結果の影響が大きくなるという傾向がある. したがって, 例えば図 6-1(a-7)に示すよう にアンカーの総本数が他の供用年の結果と比較して少ない年次に関しては、整合性が低く なったものと推察される.また,例えば図 6-1(a)において供用 23 年ではランク III が卓越 しているが、供用 24 年ではランク V およびランク IV が卓越するなどの点検結果が得られ ていることから、同一地質条件下でも斜面によりアンカーの性能低下過程に異質性が存在 するものと解釈される.このため、本研究における点検結果の利用法では、一部で構造物 の性能低下の不可逆性を満足しない点検結果となり,図 6-1 および図 6-3 において,一部 の点検年次で整合性が低い結果がみられたものと推察される.この問題に対しては、文献 16)で橋梁劣化予測に適用されているように、構造物の性能低下に寄与する構造特性や使用 環境をパラメータで表し、ハザード率に反映させることで異質性を考慮する手法が有効で あると推察される.したがって、今後アンカーのタイプや材質、および施工条件や打設斜 面の地盤条件といった暴露条件の相違による、性能低下過程の異質性に関する検討を行う ことで,性能低下モデルの高度化を図る必要性がある.

また,表 2-1 に示すような健全度ランクに基づき点検が実施される場合,個々の点検員の判断基準の違い,すなわちバイアスの影響が大きいことが一般的に指摘されている.このため,目視点検結果における1ランク程度の健全度ランクの差はそれほど有益ではない場合があり,図6-1において目視点検結果とシミュレーションの間に多少のばらつきがみられる結果が得られたものと推察される.また,同図において指数ハザードモデルと簡易モデルのシミュレーション結果の差異が少ないことから,マルコフ過程モデルを高度化しても目視点検結果に内包される点検員のバイアスを除去することは困難であると推察される.この問題に関しては,今後健全度ランクの判定基準をより明確化するとともに,点検員のバイアスの影響を考慮した性能低下モデルを定式化し対応していく必要がある.さらに,リフトオフ試験結果について,その健全度ランクの妥当性は2.4.1で検討を加えたが,本研究で単調減少に従うと仮定したアンカーの緊張力変化について,実際の斜面では緊張力が増加した後に減少に転じる,もしくはその逆の現象が起こる可能性が考えられる.したがって,本研究で用いたリフトオフ試験結果は構造物の劣化の不可逆性を満足していない可能性があり,図6-3において一部でリフトオフ試験結果とシミュレーション結果の整

62

α	WB-10	WB-20	WB-30	WB-A	WB-B
泥岩·砂岩· 礫岩互層	30.64	26.41	22.33	46.30	33.78
流紋岩	-	34.07	51.35	489.37	54.61
花崗岩	33.32	27.18	18.72	-	22.62
β	WB-10	WB-20	WB-30	WB-A	WB-B
<i>β</i> 泥岩・砂岩・ 礫岩互層	WB-10 3.28	WB-20 2.81	WB-30 2.32	WB-A 2.07	WB-B 2.23
β 泥岩・砂岩・ 礫岩互層 流紋岩	WB-10 3.28	WB-20 2.81 6.04	WB-30 2.32 1.55	WB-A 2.07 1.56	WB-B 2.23 1.62

表 6-4 ワイブルハザードモデルにおけるパラメータ算定結果

合性が低い結果が得られたものと推察される.このことに対応するためには,今後アンカ ーの過緊張過程のメカニズムを解明し対応していくことが必要となる.

ただし、本研究で対象としたリフトオフ試験結果のサンプル数は、目視点検結果のサン プル数と比較して遥かに少ないものであり、本研究におけるリフトオフ試験結果に基づく 性能低下モデルにおいては、その推定精度には課題が残る.また、目視点検結果のサンプ ル数についても、文献¹⁶⁾と比較すると、精度のよいハザードモデルを推計するには不足し ているといえる.このため、今後これらのデータを蓄積することで、性能低下モデルの精 度を向上させる必要性があることに留意されたい.

6.2 ワイブル解析結果

本節では,前述の3つの地質条件別に分類した目視点検結果およびリフトオフ試験結果 に対して,第3章で説明したワイブルハザードモデルを用いた性能低下モデルを適用し, 地質条件毎にワイブルハザードモデルのパラメータを推定する.また,この性能低下モデ ルにより算定される生存確率と,リフトオフ試験結果を残存緊張力比(%)に補正したものを 比較し,損傷/健全の各判定区分における生存確率の標準偏差を算定するとともに,これら の解析結果に対する考察を行う.

6.2.1 目視点検結果およびリフトオフ試験結果に基づくワイブル解析結果

表 2-2 および表 2-4 に示す目視点検結果およびリフトオフ試験結果に対して,表 3-1 に示す損傷/健全の判定区分に基づき,第3章に示した手順でワイブルハザードモデルにおける式(3.40)および式(3.41)に示すパラメータ α および β を算定した結果を表 6-4 に示す.ただし,流紋岩に打設されたアンカーの WB-10 の区分,および花崗岩に打設されたアンカーの WB-A の区分においては,本研究で用いたデータには損傷(WB-10 の区分においてはリフトオフ試験結果がランク LF-I,WB-A の区分においては目視点検結果がランク I およびランク II)に判定されたアンカーがなかったため,ワイブル解析は行っていない.



図 6-4 ワイブルハザードモデルを用いたアンカーの生存確率の算定結果

また,前述の3種類の地質条件に打設されたアンカーに対して,表 3-1 に示す損傷/健全の判定区分に基づくワイブルハザードモデルを用いたアンカーの生存確率とアンカー供用後の経過年数に関する解析結果を図 6-4 に示す.

6.2.2 ワイブル解析結果とリフトオフ試験結果の比較

ワイブルハザードモデルを用いた解析結果に基づいてアンカーおよび斜面の将来状態を 予測するにあたり,表 3-1 に示す判定区分のうち,アンカーの性能低下過程を表す際に適 しているものを一意的に決定する必要がある.そこで,本項では前項で算定したアンカー の生存確率と,アンカーの内部性能を表す指標としてのリフトオフ試験結果を比較し,ア ンカーの生存確率の標準偏差を算定することで,アンカーの性能低下過程を表す曲線を選 定する.ただし,本研究では前述の通り,アンカーの緊張力のモデル化および LCC 算定に おいては,実務的な観点から目視点検結果に基づく解析結果(WB-A もしくは WB-B の判定 区分に基づくもの)を用いる.

図 6-4 に示すアンカーの生存確率と、実際のリフトオフ試験結果により得られたアンカーの残存緊張力比の各点検年次の平均値との比較を図 6-5 に示す.また、併せて表 6-5 に 各損傷/健全の判定区分におけるアンカーの生存確率の標準偏差を示す.ここで、2.3.2 で 述べた性能比の定義により、旧タイプアンカーに関しては性能比に 100/60 を乗じたものを、



図 6-5 アンカーの生存確率とリフトオフ試験結果の比較

	WB-A	WB-B	WB-10	WB-20	WB-30
泥岩·砂岩· 礫岩互層	0.499	0.420	0.448	0.372	0.342
流紋岩	0.423	0.293	-	0.358	0.283
花崗岩	-	0.281	0.463	0.347	0.292

表 6-5 アンカーの生存確率の標準偏差

新タイプアンカーに関しては性能比に 100/30 を乗じたものを,本研究ではアンカーの残存 緊張力比と定義する.

表 6-5 に示す結果より,WB-A およびWB-B の判定区分に基づく解析結果のうち,標準 偏差が小さい値, すなわちリフトオフ試験結果とのばらつきが小さい曲線であるWB-Bの 判定区分に基づく解析結果を,アンカーの性能低下過程を表す際に適しているとして,後 述する斜面の安定性評価およびLCC 算定において利用する.しかしながら,表 6-5 に示す 結果では目視点検結果に基づく解析結果は,リフトオフ試験結果に基づく解析結果と比較 しても標準偏差が大きく,実際の内部性能の状況とは異なる可能性が指摘される.しかし, すでに述べた通り本研究は実務において補修を施す場合の状況を考慮し,あくまで目視点 検結果に基づき維持補修計画を立案するものであるため,これを許容する.

6.2.3 ワイブル解析結果に関する考察

表 6-4 に示すように、ワイブルハザードモデルを適用した解析結果においても、地質条 件毎に異なるパラメータ算定結果が得られた.同表に示すように、劣化の加速度パラメー タβにおいては全地質条件で1以上の値となっていることから、アンカーの性能低下が地 質条件によらず、供用年数の増加につれて加速度的に劣化が進行する摩耗型故障の形を取 ることが示唆される.また、図 6-4 に示す生存確率の算定結果より、アンカーの劣化が加 速度的に進行し始める時期は供用後 20 年~30 年が経過した時期であると解釈される.こ こで、本研究で対象とした旧タイプアンカーも供用 20 年~30 年程度であることから、図 6-4 に示すように性能低下が加速度的に進行し始めている時期にあるものと推察される. このため、現在劣化が顕在化していないアンカーに関しても、本結果に示されたように、 今後劣化が急激に進行する危険性があると推察される.

また,図 6-4 に示す結果において,目視点検結果に基づく WB-A の区分の生存確率は, リフトオフ試験結果に基づく WB-10,WB-20 および WB-30 の区分の生存確率と比較して 大きい結果となっている.一方で,WB-B に示す生存確率は,特に供用早期においてはリ フトオフ試験結果に基づく生存確率と同程度の変化を示している.このような結果が得ら れた要因については,以下のように推察される.

本研究で対象とするアンカーの目視点検結果においては,表2-2に示すように、ランク II以下に判定されたアンカーが非常に少ない結果となっている.前述のように、一般に目 視点検結果はバイアスが含まれることが指摘されており、目視によりアンカーの性能低下 がある程度認められても、その程度に確信が得られない場合、そのアンカーは健全と判断 される可能性がある.このため、ランクIおよびランクIIのように激しい損傷状態にある と判定されたアンカーは少数となり、その結果WB-Aの区分の生存確率は大きくなったも のと推察される.このことより、WB-Aの判定区分、すなわち目視点検結果の健全度ラン クIおよびランクIIのみを損傷と判断する判定区分は、内部の性能低下状況と比較して劣 化を過小評価している可能性が高いものと指摘される.一方、ランク III以下のアンカー を全て損傷と判断したWB-Bの区分では、このようなバイアスの影響を小さくすることが でき、アンカーの状態を損傷/健全の二値で評価する手法の有用性が確認されたものと推察 される.しかしながら、このWB-Bの結果についても、一部ではリフトオフ試験結果に基 づくWB-10、WB-20およびWB-30の区分の生存確率と比較して大きい結果となっており、 目視点検結果に基づく解析では劣化を過小評価している可能性があることに留意されたい.

さらに、図 6-5 および表 6-5 に示す結果により、生存確率の標準偏差が小さい値となっている WB-B および WB-30 の判定区分が、最も内部の性能状況を表すのに適しているものと解釈される.しかし、同表における各判定区分の標準偏差はいずれも大きい値となり、生存確率の算定結果と実際のリフトオフ試験結果の間にはばらつきみられる.このような

66

結果が得られた要因については、そもそも本研究で対象としたアンカーのリフトオフ試験 結果のばらつきが大きいためであると推察される.本研究では同一地質条件のデータを各 点検年次でひとまとめにしたが、前述の通り実際はアンカーのタイプや施工条件等の暴露 条件の相違により、アンカーの性能低下過程に異質性が存在する可能性がある.また、本 研究ではアンカー緊張力の変化は単調減少に従うとしたが、実際のアンカーでは過緊張過 程が複雑に組み合わさるものと予想される.さらに、本研究ではアンカーの初期性能比を 旧タイプアンカーでは 60%、新タイプアンカーでは 30%と定義したが、実際の施工状況は これとは異なる可能性が考えられる.以上のような要因により、生存確率とリフトオフ試 験結果の間のばらつきが大きくなったものと推察される.この問題に対応するためには、 今後は前述のように性能低下過程の異質性を検討し、さらにアンカーの過緊張過程のメカ ニズムを解明していく必要性がある.

6.3 点検結果および性能低下モデルによる解析結果の比較

本節では,前節で算定した各損傷/健全の判定区分に基づくアンカーの生存確率と,本章 第1節で推定したマルコフ過程モデルを用いて性能低下過程を推定した結果の,目視点検 結果およびリフトオフ試験結果それぞれに基づいた場合の比較を行う.

6.3.1 解析結果の比較

まず、両モデルの比較を行う上で、便宜上マルコフ過程モデルでの算定結果において、 目視点検に基づく健全度区分でのランク III~VI およびランク IV~VI に相当するアンカー の、全アンカーに占める相対頻度を、それぞれワイブルハザードモデルにおける WB-A お よび WB-B の区分に基づくアンカーの生存確率に相当するものと仮定する. 同様に、リフ トオフ試験に基づく健全度ランクでのランク LF-II~LF-VI、ランク LF-III~LF-VI、および ランク LF-IV~LF-VI に相当するアンカーの、全アンカーに占める相対頻度を、それぞれ ワイブルハザードモデルにおける WB-10、WB-20、および WB-30 の区分に基づくアンカー の生存確率に相当するものと仮定する.

図 6-6(a)~(c)に,各損傷/健全の判定区分に基づくワイブルハザードモデルでのアンカー の生存確率と,目視点検結果およびリフトオフ試験結果に基づくマルコフ過程モデルでの 健全度ランクの算定結果の比較を示す.また,表 6-6(a)~(c)に,供用 20 年後,40 年後お よび 60 年後での,各損傷/健全の判定区分に基づくアンカーの生存確率,およびマルコフ 過程モデルにおける健全度ランクでのランク III~VI,ランク IV~VI,ランク LF-II~LF-VI, ランク LF-III~LF-VI,およびランク LF-IV~LF-VI に相当するアンカーの,全アンカーに 占める相対頻度の比較を示す.なお,目視点検結果に基づくマルコフ過程モデルにおいて は,指数ハザードモデルによる結果を適用した.


表 6-6 ワイブルハザードモデルにおける生存確率およびマルコフ過程モデルにおける生存アンカーの相対頻度の比較

供用年数	20年後	40年後	60年後
WB-A に基づく アンカーの生存確率	0.839	0.478	0.181
マルコフ過程における ランクIII~VIの相対頻度	0.866	0.563	0.329
WB-B に基づく アンカーの生存確率	0.733	0.233	0.027
マルコフ過程における ランクIV~VIの相対頻度	0.805	0.503	0.290
WB-10に基づく アンカーの生存確率	0.781	0.091	0.000
マルコフ過程における ランクLF-II~LF-VIの相対頻度	0.808	0.252	0.046
WB-20に基づく アンカーの生存確率	0.633	0.040	0.000
マルコフ過程における ランクLF-III~LF-VIの相対頻度	0.652	0.151	0.024
WB-30に基づく アンカーの生存確率	0.461	0.021	0.000
マルコフ過程における ランクLF-IV~LF-VIの相対頻度	0.500	0.097	0.014

(b) 流紋岩

供用年数	20年後	40年後	60年後
WB-Aに基づく アンカーの生存確率	0.993	0.980	0.963
マルコフ過程における ランクIII~VIの相対頻度	0.997	0.977	0.941
WB-B に基づく アンカーの生存確率	0.822	0.547	0.312
マルコフ過程における ランク IV~VI の相対頻度	0.892	0.687	0.501
WB-20に基づく アンカーの生存確率	0.961	0.072	0.000
マルコフ過程における ランクLF-III~LF-VIの相対頻度	0.943	0.660	0.356
WB-30に基づく アンカーの生存確率	0.793	0.507	0.280
マルコフ過程における ランクLF-IV~LF-VIの相対頻度	0.841	0.476	0.218

(c) 花崗岩

供用年数	20年後	40年後	60年後
WB-B に基づく アンカーの生存確率	0.666	0.000	0.000
マルコフ過程における ランクIV~VIの相対頻度	0.703	0.407	0.234
WB-10に基づく アンカーの生存確率	0.810	0.174	0.002
マルコフ過程における ランクLF-II~LF-VIの相対頻度	0.840	0.300	0.062
WB-20に基づく アンカーの生存確率	0.680	0.036	0.000
マルコフ過程における ランクLF-III~LF-VIの相対頻度	0.690	0.182	0.032
WB-30に基づく アンカーの生存確率	0.313	0.004	0.000
マルコフ過程における ランクLF-IV~LF-VIの相対頻度	0.354	0.038	0.003

6.3.2 解析結果の比較に関する考察

図 6-6 および表 6-6 に示す比較結果から、リフトオフ試験結果に基づく性能低下モデルの解析結果は、目視点検結果に基づく性能低下モデルの解析結果と比較して、生存確率の低下が急激であることが分かる.また、目視点検結果に基づく性能低下モデルの結果を比較すると、供用後 20 年程度まではほぼ同じ性能低下傾向であるが、その後はワイブルハザードモデルの方が急な性能低下を示し、年数を経るに従ってその差は拡大する傾向がある. 一方、リフトオフ試験結果に基づく性能低下モデルの結果を比較すると、供用後 20 年~30 年まではほぼ同じ性能低下傾向であるが,その後はワイブルハザードモデルの方が急な性 能低下を示し,生存確率は低い範囲ではその差が拡大する傾向がある.

以上の結果より,以下の事項が推察される.まず,目視点検結果に基づきマルコフ過程 モデルを用いた場合の性能低下は,目視点検結果が点検員の主観量であるため,性能低下 速度を過小評価している可能性がある.これに対して,客観量であるリフトオフ試験結果 に基づきマルコフ過程モデルを用いた場合の性能低下は,目視点検結果に基づいた場合に 比較して急激である.すなわち,目視点検結果は点検員の主観量であり,リフトオフ試験 結果での客観量である数値に比較して,性能低下速度を過小評価している可能性がある. しかし,いずれの場合にも,本解析でのマルコフ過程モデルは推移確率を一定としている ため,性能低下過程での加速性を考慮したワイブルハザードモデルに比べて,供用後長期 の劣化状態を過小評価している危険性が指摘される.

また,前述したように、本解析対象としたアンカーは供用年数が 20 年~30 年程度であ るため、いずれの性能低下モデルを用いても、現状での性能低下過程については有意な推 移は認められないものと解釈される.しかし、ワイブルハザードモデルを適用した結果に 示されたように、今後アンカーの性能低下が加速する危険性は否定できない.この課題に 対応するためには、今後目視点検結果に加えて、リフトオフ試験結果を蓄積して性能低下 過程の監視を継続し、データの蓄積を図ることが肝要であると推察される.ただし、表 2-2 および表 2-4 に示すように、本研究で用いた目視点検結果およびリフトオフ試験結果にお いては、泥岩・砂岩・礫岩互層以外の地質条件ではサンプル数が不足している.このため、 流紋岩地質および花崗岩地質のアンカーの性能低下モデルに関しては、泥岩・砂岩・礫岩 互層のアンカーの性能低下モデルと比較して、その推定精度に課題が残ることに留意され たい.

6.4 斜面の破壊確率

本節では,第4章で説明した斜面の安定性評価手法に基づき,本章第1節および第2節 で推定したアンカーの性能低下モデルを用いて,実際に斜面の破壊確率を算定する.また, 算定した各地質条件における破壊確率に対して,補修を行わない場合および補修を行う場 合のそれぞれについて考察を行う.

6.4.1 解析条件

本研究では3次元のアンカー斜面の崩壊モデルとして,図6-7に示すような幅38.3m×高 さ29m×奥行66mのモデル斜面を設定する.ここで,前述のように本研究では具体的な斜 面の地盤諸量が不明であるため,各地質条件においてモデル斜面の形状および地盤定数は 同じものを設定する.単位体積重量は日本道路公団の設計要領³⁰⁾を参考にし,粘着力は地 すべり最大層厚より設定する³¹⁾.また,内部摩擦角は4.2.1で述べた通り,モデル斜面の



図 6-7 3 次元斜面安定解析におけるモデル斜面

単位体積	内部摩擦	粘着力	総ブロック	アンカー	アンカー	アンカー	許容	アンカー
重量(<i>_{7t})</i>	角(ϕ')	(<i>c`</i>)	数	段数	列数	傾斜角	アンカー 力	打設前安全率
$18 kN/m^{3}$	31.66°	$10 kN/m^2$	774	10	21	-30°	269.0kN	1.018

表 6-7 3 次元斜面安定解析における解析条件

中央断面において設計安全率が 1.20 となるように逆算した値を用いる.アンカー総数は 10段×21列の 210本とし,初期緊張力は許容アンカー力に 0.6 を乗じたものとする.また, 本研究では地下水位の影響は考慮していない.これらの解析条件の詳細を表 6-7 に示す. さらに,本研究では経年劣化したアンカーの維持補修を対象として斜面の安定性を検討す るため,性能低下が進行したアンカーのデータを用いて解析を行う.したがって,泥岩・ 砂岩・礫岩互層地質においては供用 24 年のアンカーの状態を,流紋岩地質においては供用 28 年のアンカーの状態を,および花崗岩地質においては供用 21 年のアンカーの状態を基 準として,本研究で提案した手法の下,将来状態の予測を行う.また,実際の斜面ではア ンカー1本1本が異なる性能低下を示す可能性が考えられるが,本研究では斜面に打設さ れているアンカーは全て同様の性能低下過程に従うものと仮定し,斜面内での局所的な変 動に関しては考慮しない.

6.4.2 斜面の破壊確率算定結果

前項で設定したモデル斜面に対して,第3章で述べた性能低下モデル,および第4章で 述べた斜面の安定性評価手法を用いた,将来状態における各補修プランの斜面の破壊確率 の算定結果,および補修を行わない場合の斜面の破壊確率の算定結果を図 6-8(a)~(d)に示 す.また,以下図表中では,マルコフ過程モデルに基づく解析結果を MC,ワイブルハザ ードモデルに基づく解析結果を WB と表記する.





図 6-8(b) 破壊確率算定結果(流紋岩)



図 6-8(d) 破壊確率算定結果(補修を行わない場合)

6.4.3 斜面の破壊確率算定結果に関する考察

本項では,前項で算定した各地質条件における破壊確率に対して,補修を行わない場合および補修を行う場合のそれぞれについて考察を行う.

1) 補修を行わない場合

図 6-8(d)に示すように、LCC 算定期間において補修を行わない場合のマルコフ過程モデ ルに基づく破壊確率は、泥岩・砂岩・礫岩互層では基準年より 10 年を経過した頃から緩や かに上昇し、流紋岩および花崗岩では LCC 算定期間を通して小さい値となっている.一方、 補修を行わない場合のワイブルハザードモデルに基づく破壊確率は、泥岩・砂岩・礫岩互 層では基準年より8年程度経過した頃から、流紋岩では基準年から15年を経過した頃から、 マルコフ過程モデルと比較して大きな増加を示す.一方、花崗岩では基準年から数年以内 に急激な増加を示す.このように地質条件および性能低下モデルにより破壊確率の値に相 違がみられた要因については、以下のように推察される.

まず、マルコフ過程モデルに基づく結果において、泥岩・砂岩・礫岩互層では破壊確率 の上昇が確認され、流紋岩および花崗岩では破壊確率が小さな値となったことの主要因は、 アンカーの性能低下速度の違いであると推察される.本解析においては、表 2-7 に示す目 視点検結果とリフトオフ試験結果の相関より、アンカーがランク II からランク I に推移す ると緊張力が大きく低下する.ここで、表 6-1 および図 6-2 に示すように、泥岩・砂岩・ 礫岩互層ではアンカーがランク I まで推移する確率が他の地質条件と比較して大きくなっ ているため、緊張力が大きく低下し、破壊確率が上昇したものと解釈される.一方、流紋 岩および花崗岩においては、ランク III からランク II へ推移する確率が非常に低くなって おり、それほど緊張力の低下がみられなかったため、破壊確率が小さな値になったと推察 される.しかし、表 6-1 および図 6-2 に示すように、花崗岩は流紋岩よりもランク IV から ランク III へ推移する確率が大きくなっているため、図 6-8(d)において僅かに花崗岩の方 が破壊確率が大きい結果となった.

一方,ワイブルハザードモデルに基づく結果において,破壊確率が上昇する速度が異なったことの主要因は,アンカーの性能低下の加速性の違いであると推察される.本解析の ワイブルハザードモデルにおいては性能低下の加速性を考慮しており,アンカーの性能低 下の加速度を表すパラメータβの値が1以上ならば,その値が大きいほど供用年数の増加 に伴い急激に性能低下が進むことを表している.そして,**表**6-4 および図6-4 に示すよう に,アンカーの性能低下の加速度は流紋岩および泥岩・砂岩・礫岩互層では比較的小さく, 花崗岩では非常に大きくなっている.このため,花崗岩では泥岩・砂岩・礫岩互層および 流紋岩と比較して,破壊確率の上昇が急激であったものと解釈される.また,泥岩・砂岩・ 礫岩互層では基準年より8年程度経過した頃から,流紋岩では基準年から15年を経過した 頃から,花崗岩では基準年から数年以内に破壊確率が増加を示したことの主要因は,基準

年時点のアンカーの性能状態および性能低下の加速度の違いであると推察される. すなわち,図 6-5の WB-B の解析結果にも示すように,花崗岩では基準年(供用 21 年)時点においてすでにアンカーの性能低下が加速度的に進行し始めていたため,基準年から数年以内に斜面が崩壊するという結果が得られたものと推察される. これに対して,泥岩・砂岩・礫岩互層および流紋岩では,基準年時点の生存確率が花崗岩よりも大きく,また性能低下が加速度的に進行し始める時期が花崗岩と比較して長かったため,基準年から 8~15 年経過した頃に破壊確率が上昇するという結果になったと解釈される.

ここで、図 6-8(d)に示すように、全地質条件において、ワイブルハザードモデルに基づ く破壊確率の算定結果は、マルコフ過程モデルに基づく結果よりも早期に増加を始め、ま たその値も大きい結果となっている.これは、損傷/健全という二値の評価手法を用いて目 視点検結果に含まれる点検員のバイアスを考慮し、かつ性能低下の加速性を表現したワイ ブルハザードモデルの方が、よりアンカーの性能低下に伴う斜面崩壊の危険性を評価でき たものと推察される.また、特に花崗岩地質においては2つの性能低下モデルによる結果 に大きな差があるため、今後性能低下過程のモニタリングを継続し、データの蓄積を図る ことが重要であると指摘される.

(1) 補修を行う場合

2-a) 泥岩・砂岩・礫岩互層

図 6-8(a)に示すように、泥岩・砂岩・礫岩互層におけるマルコフ過程モデルに基づく結 果では、補修を行うことで破壊確率が大きく低減されることが分かる.また、プラン1の 破壊確率は LCC 算定期間中上昇を続けるが、プラン2およびプラン3の破壊確率は補修を 行った時点からは増加しない結果となった.このような結果が得られた要因は、以下のよ うに推察される.すなわち、前述のように泥岩・砂岩・礫岩互層ではランクIのアンカー が発生する確率が他の地質条件と比較して大きくなっているため、補修を施しランクIの アンカーを更新することで、緊張力が大きく低下することを防ぎ、破壊確率の上昇を抑制 できたものと推察される.また、プラン1の破壊確率がLCC 算定期間中上昇を続けたのは、 泥岩・砂岩・礫岩互層では全体的に健全度ランクの推移が速いため、ランクIのアンカー のみを補修しても、次回の点検までに再度ランクIのアンカーが発生してしまうためであ ると推察される.一方、プラン2およびプラン3では、予防保全的にランクIまで性能が 低下していないアンカーも補修しているため、補修を行った後の破壊確率は小さな値とな ったものと解釈される.

また、図 6-8(a)に示すように、泥岩・砂岩・礫岩互層におけるワイブルハザードモデル に基づく結果では、同じく補修を行うことによる破壊確率の低減が確認されるが、点検間 隔を 10 年および 15 年とした場合は、破壊確率の上昇が確認される. このような結果が得 られた要因については、以下のように推察される. すなわち、前述のように泥岩・砂岩・ 礫岩互層では基準年から 8 年程度が経過した頃から加速度的に性能低下が進行するため、 点検間隔をそれ以上とすると、補修を施す前にアンカーの性能低下が加速度的に進行し、 破壊確率が上昇したものと推察される.また、本研究ではワイブルハザードモデルに基づ く解析において、ランク III 以下を損傷とする WB-B の判定区分を用い、補修方法は損傷 のアンカーの全本更新としている.しかし、図 6-8(a)においてワイブルハザードモデルに 基づく破壊確率は、マルコフ過程モデルに基づきランク III 以下のアンカーを全て更新す るプラン3の破壊確率よりも大きい結果となっている.これは、前述のように本解析にお けるワイブルハザードモデルでは、性能低下の加速性を考慮しているため、推移確率を一 定としたマルコフ過程モデルと比較して、よりアンカーの性能低下に伴う斜面崩壊の危険 性を評価しているためであると推察される.

2-b) 流紋岩

図 6-8(b)に示す結果において,流紋岩では補修を行わない場合と同様,破壊確率が全地 質条件の中で最小となっているが,マルコフ過程モデルに基づく結果では,補修を施すこ とによる破壊確率の低減率は小さい結果となった.また,プラン1およびプラン2では LCC 算定期間中に破壊確率が上昇を続けるが,プラン3では破壊確率は非常に小さい値となっ た.このような結果が得られた要因は,以下のように推察される.すなわち,表 6-1 およ び図 6-2 に示すように,流紋岩においてはアンカーの性能低下速度が非常に遅く,またラ ンク III からランク II へ推移する確率が特に小さかったため,ランク III 以下を補修するプ ラン3以外では補修の効果が小さかったものと推察される.しかし,流紋岩ではもともと 補修を行わない場合でも破壊確率の値は小さいため,斜面の安定性を議論する上で問題と なるものではないことに留意されたい.

また、図 6-8(b)に示すように、流紋岩におけるワイブルハザードモデルに基づく結果で は、補修を行うことによる破壊確率の大きな低減が確認される.しかし、点検間隔が 10 年未満では破壊確率は非常に低い値となっていることに対して、点検間隔を 15 年とした場 合は破壊確率の上昇が確認される.これは、前述のように流紋岩では基準年から 15 年程度 が経過した頃から加速度的に性能低下が進行するため、アンカーの性能が急激に低下する 前兆であると推察される.しかし、この場合でも補修により破壊確率の大幅な低減が確認 される.また、点検間隔 10 年および 15 年の場合は、泥岩・砂岩・礫岩互層と同様に、ワ イブルハザードモデルに基づく破壊確率はマルコフ過程モデルに基づくプラン 3 の破壊確 率よりも大きい結果が得られた.

2-c) 花崗岩

図 6-8(c)に示すように、花崗岩におけるマルコフ過程モデルに基づく結果では、流紋岩 と同様に、補修による破壊確率の低減率は小さく、また、プラン1およびプラン2では LCC 算定期間中に破壊確率が上昇を続け、プラン3では破壊確率が非常に小さい値になるとい う結果が得られた.これは、花崗岩においてもアンカーの性能低下速度が非常に遅く、ま たランク III からランク II へ推移する確率が特に小さかったため、ランク III 以下を補修す るプラン3以外では補修の効果が小さくなったものと推察される.しかし,前述のように 花崗岩は流紋岩よりもアンカーがランク IV からランク III へ推移する確率が大きくなって いるため,破壊確率は流紋岩よりも僅かに大きいという結果になった.

しかしながら、図 6-8(c)に示すように、花崗岩におけるワイブルハザードモデルに基づ く結果では、点検間隔3年および5年では補修により破壊確率が低減されるもののその値 は大きく、点検間隔10年および15年では補修による破壊確率の低減効果は確認できない. このような結果が得られた要因としては、基準年時点でのアンカーの性能低下の加速度が 挙げられる. すなわち、前述のように花崗岩におけるワイブルハザードモデルに基づく結 果では、基準年時点においてすでにアンカーの性能低下が加速度的に進行し始めていたた め、早急に補修を施さなければ斜面が崩壊する確率が高くなったものと推察される.

また,全ての地質条件において,ワイブルハザードモデルに基づく結果では,1度目の 補修を施すと,その後の LCC 算定期間では明確な破壊確率の増加は確認できない結果とな った.これは,本解析では前述のように,アンカーの性能低下過程は供用年数の増加につ れて加速度的に劣化が進行する摩耗型故障をとるため,本研究のような定期点検では,更 新後のアンカーが急激な性能低下を見せる前に次の点検・補修が行われるためであると推 察される.さらに,マルコフ過程モデルに基づく結果では,全ての地質条件において,事 後補修的なプランであるプラン1は破壊確率の低減率が小さく,プラン2,プラン3と予 防保全的に補修を施すほど,破壊確率の低減率が大きくなっていることが確認される.

ただし、本研究では更新後のアンカーの性能は初期状態に戻り、その後の性能低下特性 は補修前のアンカーのものと同様であると仮定したが、更新後のアンカーは二重防食が施 された新タイプアンカーであることが予想され、更新前とは異なる性能低下を示す可能性 がある.このため、補修後のアンカーの性能低下過程のモデル化を検討することが今後の 課題であることに留意されたい.

6.5 LCC 算定結果

本節ではまず,本研究で立案した維持補修計画の LCC を算定するために必要な点検費用, 補修費用および崩壊時損失額を設定する.これらの各種費用に基づき,前章第1節で提案 した維持補修計画における LCC を地質条件毎に算定し,結果に対する考察を行う.

6.5.1 各種費用の設定

本研究において必要となる費用は点検費用,アンカー更新費用,ならびに斜面の復旧費 用,走行費用損失額,時間損失額からなる崩壊時損失額である.このうち,点検費用およ びアンカー更新費用は 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.

表 6-8 崩壊時損失額とその内訳

復旧費用	走行費用損失額	時間損失額	崩壞時損失額	アンカー1本当たりの
<i>c_r</i> (千円)	c^{d}_{ind} (千円)	<i>c^tind</i> (千円)	<i>C_h</i> (千円)	崩壊時損失額C _h (円/本)
64,096(29%)	38,374(18%)	115,408(53%)	217,878(100%)	1,037,514

$$C_{ins} = \begin{bmatrix} 2,000 \end{bmatrix}$$
(6.1)

$$C_{rep}^{MC1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 550,000 \end{bmatrix}$$

$$C_{rep}^{MC2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 550,000 \\ 550,000 \\ 550,000 \end{bmatrix}$$

$$C_{rep}^{MC3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 550,000 \\ 550,000 \\ 550,000 \\ 550,000 \end{bmatrix}$$
(6.2)

$$C_{rep}^{WB} = \begin{bmatrix} 550,000 \\ 0 \\ 550,000 \\ 550,000 \end{bmatrix}$$
(6.3)

ここに, *C*^{MC1}_{rep}, *C*^{MC2}_{rep}および *C*^{MC3}_{rep}はそれぞれ, マルコフ過程モデルを適用した場合のプラン 1, プラン 2 およびプラン 3 における補修費用行列を表す.また, *C*^{WB}_{rep}はワイブルハザードモデルを適用した場合の補修費用行列を表す.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.

また,本研究において実際に設定した崩壊時損失額とその内訳を表 6-8 に示す.同表で, 復旧費用は崩壊土塊量,および崩壊面積を基準に設定し,走行費用損失額および時間損失 額は,モデル斜面がある高速道路の特定の区間に存在していると仮定し,その高速道路区 間の交通量や迂回路等の情報と斜面崩壊時の通行止め日数に基づき設定したものである.

6.5.2 LCC 算定結果

前項で設定した各種費用に基づき,前章第3節で提案した維持補修計画における全地質 条件のLCC算定結果を図 6-9(a)~(c)に示す.また,各維持補修計画における最終評価年 時点のLCCの各種費用の内訳を表 6-9(a)~(c)に示す.なお,本事例におけるLCC算定期 間は,前節で設定したアンカーの供用年数を基準年として,以降の30年間とする.また, 全地質条件においてアンカーの本数および崩壊時損失額が等しいことから,本事例では各 地質条件においてアンカー1本あたりの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条件のアンカーにおける最適な維持補修計 画となり,その中で点検間隔が短く,最適維持補修計画におけるLCCが大きい地質条件の アンカーほど補修の優先順位が高いことを表す.さらに,図 6-9(a)~(c)および表 6-9(a)~ (c)には補修を行わない場合のLCC算定結果を併せて示す.また,点検間隔を基準として 比較した各維持補修計画における最終評価年時点のLCC算定結果を図 6-10(a)~(c)に示す.

なお,図6-9,表6-9および図6-10ではマルコフ過程モデルに基づく結果とワイブルハ ザードモデルに基づく結果を,性能低下モデル間で比較を行うために併せて示しているが, 維持補修計画の選択および補修の優先順位付けは,性能低下モデル毎に分けて検討する.



(a) 泥岩·砂岩·礫岩互層



図 6-9 LCC 算定結果



図 6-9 LCC 算定結果

表 6-9 LCC 算定結果の内訳

(a) 泥岩·砂岩·礫岩互層

(b) 流紋岩

補修戦略	点検費用 (円)	補修費用 (円)	崩壞時 損失額(円)	LCC(円)
MC 補修なし	0	0	323,690	323,690
MCプラン1_3年	10,825	93,289	31,834	135,948
MCプラン2_3年	10,990	243,276	7,815	262,081
MCプラン3_3年	10,992	284,086	7,510	302,588
MCプラン1_5年	6,144	87,481	46,307	139,932
MCプラン2_5年	6,274	225,516	15,964	247,754
MCプラン3_5年	6,276	261,700	15,519	283,495
MCプラン1_10年	2,592	72,541	95,633	170,766
MCプラン2_10年	2,696	182,496	51,077	236,269
MCプラン3_10年	2,699	208,636	50,082	261,417
MCプラン1_15年	1,376	57,076	157,247	215,699
MCプラン2_15年	1,454	139,923	109,354	250,731
MCプラン3_15年	1,457	157,579	107,917	266,953
WB 補修なし	0	0	626,565	626,565
WB_3年	11,007	443,774	6,075	460,856
WB_5年	6,186	399,577	27,482	433,245
WB_10年	2,059	242,565	216,665	461,289
WB_15年	508	82,542	479,439	562,489

補修戦略	点検費用 (円)	補修費用 (円)	崩壊時 損失額(円)	LCC(円)
MC補修なし	0	0	15,131	15,131
MCプラン1_3年	11,010	5,631	10,643	27,284
MCプラン2_3年	11,024	17,231	8,187	36,442
MCプラン3_3年	11,072	196,266	638	207,976
MCプラン1_5年	6,339	5,386	10,968	22,693
MCプラン2_5年	6,349	16,398	8,458	31,205
MCプラン3_5年	6,378	183,412	1,089	190,879
MCプラン1_10年	2,852	4,836	11,805	19,493
MCプラン2_10年	2,857	14,513	9,317	26,687
MCプラン3_10年	2,871	155,089	2,617	160,577
MCプラン1_15年	1,704	4,363	12,661	18,728
MCプラン2_15年	1,707	12,870	10,429	25,006
MCプラン3_15年	1,716	131,288	4,767	137,771
WB補修なし	0	0	265,403	265,403
WB_3年	11,079	291,748	6	302,833
WB_5年	6,385	271,109	60	277,554
WB_10年	2,871	225,680	2,507	231,058
WB_15年	1,667	183,203	21,586	206,456

補修戦略	点検費用 (円)	補修費用 (円)	崩壊時 損失額(円)	LCC(円)
MC 補修なし	0	0	30,139	30,139
MCプラン1_3年	10,980	12,257	14,927	38,164
MCプラン2_3年	10,989	15,040	13,491	39,520
MCプラン3_3年	11,068	338,148	957	350,173
MCプラン1_5年	6,318	11,692	15,811	33,821
MCプラン2_5年	6,324	14,313	14,159	34,796
MCプラン3_5年	6,373	311,823	1,748	319,944
MCプラン1_10年	2,835	10,402	18,242	31,479
MCプラン2_10年	2,839	12,652	16,383	31,874
MCプラン3_10年	2,864	255,278	4,549	262,691
MCプラン1_15年	1,687	9,262	20,945	31,894
MCプラン2_15年	1,690	11,183	19,225	32,098
MCプラン3_15年	1,706	208,727	8,714	219,147
WB 補修なし	0	0	876,052	876,052
WB_3年	6,958	416,001	350,647	773,606
WB_5年	1,578	148,931	684,207	834,716
WB_10年	36	5,312	868,061	873,409
WB 15年	1	184	875.741	875.926

表 6-9 LCC 算定結果の内訳





図 6-10 点検間隔を基準とした LCC 算定結果

15年

10年

点検間隔

5年

(c) 花崗岩

3年

★ WB

200,000

100,000 0



図 6-11 ワイブルハザードモデルに基づく泥岩・砂岩・礫岩互層での LCC の概念図

6.5.3 LCC 算定結果に関する考察

本項では,LCCの算定結果に対して,地質条件毎に考察を加える.

a) 泥岩・砂岩・礫岩互層

図 6-9(a),表 6-9(a),および図 6-10(a)に示す結果より,泥岩・砂岩・礫岩互層における マルコフ過程モデルに基づく結果では、プラン1のときが最もLCCが縮減でき、その中で も点検間隔を3年とし、こまめに点検・補修を行う計画が最適な維持補修計画となる.こ のような結果が得られた要因は、以下のように推察される.すなわち、泥岩・砂岩・礫岩 互層はアンカーの性能低下が全体的に速いため、ランクIIおよびランクIIIのアンカーま で打ち替えるプランでは、崩壊時損失額は低減できてもその分補修費用が増大してしまう ものと解釈される.一方、ランクIのアンカーのみを補修した場合は、破壊確率は前項で 述べたようにその他のプランと比較して増加してしまうが、補修費用を大幅に抑えること ができたため、LCCの縮減効果が高くなっている.その際、こまめに点検・補修を行った 方が、点検費用および補修費用は大きくなってしまうが、それ以上に崩壊時損失額を抑え ることができるという結果になった.また、その他の補修計画に関しては、図 6-10(a)よ り、プラン2、プラン3と予防保全的に補修を行うほど、LCCが大きくなっている.また、 ランクI以外のアンカーも補修するプラン2およびプラン3では、点検間隔を10年と長め にとる方がLCCの縮減効果は高いという結果になった.

一方,泥岩・砂岩・礫岩互層におけるワイブルハザードモデルに基づく結果では,図 6-9(a), 表 6-9(a),および図 6-10(a)に示す結果より,点検間隔を5年とする計画が最適な維持補修 計画となる.また,LCCはマルコフ過程モデルに基づく結果と比較して,非常に大きい値 となった.このような結果が得られた要因は,以下のように推察される.まず,最適な点 検間隔が5年となったのは,図 6-11に示すLCCの概念図により説明される.すなわち, 本研究におけるアンカーの補修計画では,点検間隔が大きくなるほど点検・補修の回数が

減り,また社会的割引率による点検費用と補修費用の縮減効果も大きくなる.また,前述 の通りアンカーの性能低下が摩耗型故障の形をとるため,点検と点検の間で生存確率が有 意な低下を示さず,点検間隔を大きくしても補修費用は増加しなかったものと推察される. 一方で,点検間隔が大きくなると,初回の点検時までに破壊確率が上昇してしまい,崩壊 時損失額は社会的割引率の影響を受けても増加する.したがって,泥岩・砂岩・礫岩互層 におけるワイブルハザードモデルに基づく結果では,これらの和である LCC が図 6-11 に 示すように下に凸な曲線となり,最小となったのが点検間隔5年の場合であったと解釈さ れる.

また、ワイブルハザードモデルに基づく解析は、損傷のアンカーの全本打ち替えという 保守的な補修計画を設定しているため、補修費用はマルコフ過程モデルに基づく結果と比 較して大きくなった.さらに、ワイブルハザードモデルでは性能低下の加速性を考慮して いるため、前項で述べたように点検間隔を10年および15年とした場合は破壊確率が上昇 し、崩壊時損失額が大きくなった.このため、マルコフ過程モデルに基づく結果と比較し て、LCCが非常に大きい値になったものと推察される.

b) 流紋岩

図 6-9(b)、表 6-9(b)、および図 6-10(b)に示す結果より、流紋岩におけるマルコフ過程モ デルに基づく結果では、ランク III 以降の推移が非常に遅いため、何も補修を行わない場 合が最も LCC が小さくなる.このような場合、実際に補修を行うかの判断に関しては、本 研究で提案した斜面安定性評価手法の精度等に議論の余地があると推察されるが、これを 除いた補修計画においては、プラン 1を 15年間隔で実施するのが最適な維持補修計画とな っている.これは、前述のように流紋岩においてはアンカーの性能低下が極めて遅く、LCC 算定においては点検費用が支配的要因となったため、点検間隔を長く設定することによる LCC 縮減効果が大きかったものと推察される.また、その他の補修計画に関しては、図 6-10(b)より、ランク II 以下を補修するプラン 2の LCC は、プラン 1 と比較して僅かに大 きい程度である.これは、流紋岩においてはランク II とランク I のアンカーの発生頻度が 共に低いため、プラン 1 とプラン 2 に大きな差が生まれなかったものと推察される.しか し、ランク III 以下を補修するプラン 3 の LCC は非常に大きくなっており、斜面の安定性 に対して過剰に補修を行っているものと解釈される.さらに、各プランの LCC が全地質条 件で最も低いことから、流紋岩地質は補修の優先順位が低いものと判断できる.

一方,流紋岩におけるワイブルハザードモデルに基づく結果では,図 6-9(b),表 6-9(b), および図 6-10(b)に示す結果より,点検間隔を 15 年と長くとる計画が最適な維持補修計画 となる.前述のように,本研究ではワイブルハザードモデルに基づく結果において,点検 間隔が大きくなるほど点検費用と補修費用が縮減され,またアンカーの性能低下が摩耗型 故障であるため,点検間隔を大きくしても補修費用は増加しない.さらに,流紋岩におい てはアンカーの性能低下が遅いため,点検間隔を大きくしても破壊確率の上昇は小さく,

崩壊時損失額は大きな増加を示さなかった.このため,点検間隔を15年とするものが最適 な維持補修計画になったものと推察される.また,泥岩・砂岩・礫岩互層と同じく,LCC はマルコフ過程モデルに基づく場合と比較して,非常に大きくなっている.

c) 花崗岩

図 6-9(c),表 6-9(c),および図 6-10(c)に示す結果より,花崗岩におけるマルコフ過程モ デルに基づく結果では,流紋岩と同様にランク III 以降の推移が非常に遅いため,何も補 修を行わない場合が最も LCC が小さくなる.また,これを除いた補修計画においては,プ ラン1を10年間隔で実施するのが最適な維持補修計画となった.これは,花崗岩において もアンカーの性能低下が遅いために LCC 算定においては点検費用が支配的要因となって いるが,流紋岩よりもランク IV からランク III へ推移が速いために点検間隔を長くすると 崩壊時損失額が増加するため,点検間隔 10年でこれらの和が最小となったものと解釈され る.また,花崗岩においてはランク I およびランク II のアンカーがほぼ発生しないため, 図 6-10(c)に示すようにプラン1とプラン2の LCC 算定結果はほぼ同じ値となった.一方, 花崗岩ではランク III のアンカーが多く発生したため,プラン3における補修費用は非常 に大きい結果となり,プラン3は斜面の安定性に対して過剰に補修を行っているものと解 釈される.また,各プランにおける LCC は比較的小さく,マルコフ過程モデルを用いた場 合は,花崗岩地質の補修の優先順位は高くないものと判断される.

しかしながら、花崗岩におけるワイブルハザードモデルに基づく結果では、図 6-9(c), 表 6-9(c),および図 6-10(c)に示す結果より、点検間隔を3年とする計画が最適な維持補修 計画となる.また、ワイブルハザードモデルを用いた場合、花崗岩における LCC 算定結果 は全地質条件で最も大きい結果となり、補修の優先順位が高いものと判断される.このよ うに性能低下モデルにより大きく異なる結果が得られた要因は、以下のように推察される. すなわち、花崗岩におけるワイブルハザードモデルに基づく結果では、基準年時点におい てすでにアンカーの性能低下が加速度的に進行し始めていたため、前項で述べたように破 壊確率が非常に大きくなっており、崩壊時損失額が大きく計上されたものと推察される. このように、花崗岩地質においては2つの性能低下モデルによる結果に大きな差があるた め、今後も性能低下過程のモニタリングを継続し、データの蓄積を図ることが重要である と指摘される.

また,本適用事例における全地質条件において,マルコフ過程モデルに基づく結果では, 事後補修型のプラン1のLCCが最も小さく,予防保全型のプラン3のLCCは大きい結果 となった.これは,アンカーの更新費用が550,000円と高額であるため,ランクI以外の アンカーも更新する計画は,斜面の安定性に対して過剰な補修であると解釈される.この ように,本事例では予防保全的な補修によるLCCの縮減は確認できなかった.一方,本研 究ではワイブルハザードモデルに基づく解析においては,ランク III 以下を損傷とする WB-Bの判定区分を用い,補修方法は損傷のアンカーの全本更新とした.しかし,図6-10 に示すように、ワイブルハザードモデルに基づく LCC は、マルコフ過程モデルに基づきラ ンク III 以下のアンカーを全て更新するプラン 3 の LCC よりも、遥かに大きい結果が得ら れた.これは、前述のように本解析におけるワイブルハザードモデルでは、性能低下の加 速性を考慮しており、推移確率を一定としているマルコフ過程モデルと比較して、より斜 面崩壊の危険性を評価しているためであると推察される.

ただし、本事例での LCC 算定結果は、斜面崩壊のリスクコストを考慮するか否かにより 異なる値となることに留意されたい.また、本研究で提案する斜面安定性評価手法では、 前述のように地山の粘着力および地山の内部摩擦角は性能低下しないと仮定しているため、 斜面の破壊確率を過小評価している可能性がある.さらに、崩壊時損失額は斜面の規模や 斜面下道路の交通量、迂回路の長さなどに依存するため、実際の斜面においては損失額が 大きくなる場合も考えられる.したがって、本適用事例においては過剰補修とみなされた プラン2およびプラン3のような予防保全的な補修計画に関しても、今後検討を続ける必 要性があるものと推察される.

ここで、本研究では 6.5.2 で述べたように、最適な維持補修計画の中で点検間隔が短く、 LCC が大きい地質条件のアンカーほど補修の優先順位が高いことを表す.したがって、本 事例で対象とした 3 地質の補修優先順位付けは、マルコフ過程モデルに基づく場合は、泥 岩・砂岩・礫岩互層、花崗岩、流紋岩の順となる.一方、ワイブルハザードモデルに基づ く場合の補修優先順位付けは、花崗岩、泥岩・砂岩・礫岩互層、流紋岩の順となり、花崗 岩地質の補修優先順位が高くなる結果となった.このため、特に花崗岩地質においては、 今後の性能低下の監視を継続し、データを蓄積することが肝要であると推察される.

以上の結果をまとめると、本研究で提案した手法によって、旧タイプ鋼棒タイプアンカ ーに対して、既存の点検結果に基づき経年劣化をモデル化し、それに伴う斜面の安定性の 変化を考慮した維持補修計画の選択、および地質条件毎の補修の優先順位付けが可能とな る.また、本研究で提案した手法に基づく最適維持補修計画および補修の優先順位付けは、 アンカーの性能低下特性、社会的割引率、崩壊時損失額等の様々な要因と密接に関連して おり、その中でも特にアンカーの性能低下特性に大きく依存することが示唆された. さら に、損傷/健全という二値の評価手法を用い、かつ性能低下過程の加速性を検討に加えると、 ワイブルハザードモデルでの結果に示されたように、斜面の破壊確率および LCC は大きく なり、アンカー斜面の維持管理に関してより保守的な結果が得られることが示された. す なわち、既往の研究で用いられてきたマルコフ過程モデルはアンカーの性能低下および斜 面の破壊確率を過小評価している危険性があり、本研究ではワイブルハザードモデルを適 用して点検員のバイアスの影響および性能低下の加速性を考慮することで、これらの危険 性を評価できたものと推察される.

ただし、本研究では点検結果の制約により様々な仮定条件を設定しているため、今後デ ータの蓄積とともにその仮定条件を見直し、本手法の精度を検証していく必要性があるこ

とに留意されたい.

6.6 地質条件がアンカーの性能低下に及ぼす影響に関する考察

前項までに示した結果から、本研究で対象とした3種類の地質条件でそれぞれアンカー の性能低下特性が異なることが分かり、泥岩・砂岩・礫岩互層では性能低下が速く、一方、 流紋岩では性能低下が遅いという結果になった.また、花崗岩では供用早期ではアンカー の性能低下が遅かったが、長期供用に伴い性能低下が加速し始めているということが示唆 された.本項では、このように地質条件によってアンカーの性能低下特性が異なった要因 に関して考察を行う.

すでに述べたように、アンカーで補強された斜面において、その性能低下に起因して発 生する重大な事象とその要因は複雑に関連しているが¹⁴⁾、二重防食が施されていない旧タ イプアンカーの性能低下の主要因は、腐食によるアンカーの断面欠損であると推察される. このため、本事例でのアンカーの性能低下に寄与する斜面背面地山の地質特性としては、 地盤の透水性が主要であると推察される.

まず,砂岩および礫岩は、よく分級された粒子で構成されているとき地下水流動に関係 する有効間隙率が高いため透水性が高く、また、破砕による間隙増加も非常に大きいとい う特徴がある.次に、泥岩・シルト岩・粘土岩を含む頁岩は、無破砕状態では透水性が低 いが、破砕帯では非常に透水性が高くなる³²⁾.ここで、本研究で対象とした堆積岩類は中 生代ジュラ紀から白亜紀にかけてのものであり、塑性性質が小さいため破砕しやすく、本 事例の泥岩・砂岩・礫岩互層でも実際に破砕帯が確認されている.さらに、堆積岩類はそ の形成条件から様々な粒径の砕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.以上より、本事例での泥岩・砂岩・礫岩互層は透水性が高く、 アンカー体に水が浸入する可能性が高かったため、アンカー体が腐食しやすく、アンカー の性能低下が速くなったものと推察される.

一方,流紋岩や花崗岩のようなち密な火成岩は,間隙が微小であり,かつ内部連結性を 欠くため,一般的に透水性が非常に低い³²⁾.しかしながら,花崗岩は結晶粒子が大きくか つ鉱物結晶の熱膨張率が異なるため粒子間の結合が弱まり風化しやすく,風化すると脆く 崩れやすい状態になり高い透水性を示す(マサ化).ここで,本事例で対象とした花崗岩は 中生代白亜紀のものであり,実際に風化を受けマサ化している箇所が確認されている.し たがって,本事例での花崗岩は流紋岩と比較すると透水性が高く,アンカーが腐食しやす い環境にあったため,花崗岩のアンカーは性能低下が加速し始めているという結果になっ たと推察される.

以上より、本研究において地質条件によりアンカーの性能低下特性が異なった要因については、以下のように推察される.まず、泥岩・砂岩・礫岩互層では背面地山の透水性が

高いため、アンカー体に水が浸入する可能性が高い.このため、アンカー体の腐食が進行 しやすく、アンカーの性能低下が速くなったものと推察される.一方、流紋岩では背面地 山の透水性が低いため、腐食によるアンカーの性能低下が遅い.また、花崗岩では風化深 度は浅いが、流紋岩と比較して風化の度合いが大きいため、風化に伴い透水性が高くなり、 流紋岩よりもアンカーが腐食しやすい環境にあった.このため、マルコフ過程モデルでは 流紋岩より性能低下が速くなり、また、ワイブルハザードモデルでは性能低下が加速し始 めているという結果になったと推察される.

しかし,前述のように本研究では地盤に関する詳細なデータが得られておらず,以上の 議論はあくまで定性的なものである.したがって,今後は背面地山の透水性等を調査し, これらの検討について定量的に検証を行う必要性があることに留意されたい.

第7章 結論および今後の展望

本章では,前章までに示した点検結果の精度検証と,アンカーの維持補修計画に関する 検討手法の結果を本研究の成果としてまとめ,本論文の結論とする.また,本研究に関す る今後の課題について述べ,今後の展望とする.

7.1 本研究の成果

本研究では、まずリフトオフ試験結果により得られるアンカー内部の緊張力の性能比の 区分分けを行うとともに、非破壊検査結果を用いて、リフトオフ試験結果の健全度ランク の妥当性および目視点検結果の精度を検証した.次に、地質条件毎に分類した点検結果に マルコフ過程およびワイブルハザード関数の2種類の統計モデルを適用し、アンカーの経 時的な性能低下過程をモデル化した.また、アンカー内部の緊張力を確率変数としてモデ ル化し、アンカーの経時的な内部緊張力の変化を表現するとともに、3次元の斜面安定解 析を行い、将来状態における斜面の破壊確率を算定した.さらに、複数の補修計画を立案 し、LCCを判断指標として、アンカーの経年劣化および斜面の安定性を考慮した維持補修 計画の選択、および地質条件毎の補修の優先順位付けが可能となる手法を提案するととも に、その結果に対する考察を行った.以上の検討により得られた知見は、以下のように要 約される.

- 本研究で提案した 6 段階のアンカー緊張力に関する健全度ランクに関して、旧タイプ 鋼棒タイプアンカーにおける各健全度ランクでの損傷の発生頻度は、目視点検結果に おける各健全度ランクでの損傷の発生頻度と同程度であった.したがって、本研究で 初期性能比を一意的に定めて設定したリフトオフ試験結果に基づく健全度ランク分け には、ある程度の妥当性があるものと推察される.
- 2) 旧タイプ鋼棒タイプアンカーに関して、アンカーヘッドの損傷(浮き・クラック)、アン カー本体の断面欠損、および内部緊張力の低下にある程度の相関性が確認された.こ のことから、旧タイプ鋼棒タイプアンカーにおいては、アンカー内部の欠損/破断およ び緊張力の低下が、直接アンカーヘッドの損傷として確認される可能性が高いといえ る.したがって、旧タイプ鋼棒タイプアンカーを対象にマクロ的観点からのアセット マネジメントを検討するにあたって、目視点検結果を用いてアンカーの性能低下過程 をモデル化することには、妥当性があると推察される.
- 3) 本研究で提案したマルコフ過程モデルは,3つの地質条件を対象に実施したシミュレー

ションにおいて,目視点検結果とリフトオフ試験結果いずれに基づいた場合も,内挿 の範囲内である程度の予測精度が確認された.また,過程条件を用いて推定した簡易 モデルにおいても,ある程度指数ハザードモデルに近い推定精度が得られていること が確認された.

- 4) 本研究で提案したワイブルハザードモデルにより、アンカーの性能低下が地質条件によらず、供用年数の増加につれて加速度的に劣化が進行する摩耗型故障の形を取ことが示唆された.また、アンカーの劣化が加速度的に進行し始める時期は供用後 20 年~30 年が経過した時期であると推察され、現在劣化が顕在化していないアンカーに関しても、今後劣化が急激に進行する危険性が指摘された.また、アンカーの状態を損傷/健全の二値で評価することで、目視点検結果に含まれる点検員のバイアスの影響を小さくできると推察される.
- 5) 前述の精度検証より、目視点検結果とリフトオフ試験結果にはある程度相関性がある ものと推察されるが、あくまで点検員の主観量である目視点検結果は、客観量である リフトオフ試験結果での数値と比較して、性能低下速度を過小評価している可能性が ある.また、本解析でのマルコフ過程モデルは推移確率を一定としているため、性能 低下過程での加速性を考慮したワイブルハザードモデルに比べて、供用後長期の劣化 状態を過小評価している危険性が指摘される.
- 6) 本研究で提案する手法によって、アンカーの経年劣化および斜面の安定性を考慮した 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り、また地質条件毎に補修の 優先順位付けが可能となった.また、本研究で提案した手法に基づく最適維持補修計 画および補修の優先順位付けは、アンカーの性能低下特性、社会的割引率、崩壊時損 失額等の様々な要因と密接に関連しており、その中でも特にアンカーの性能低下特性 に大きく依存することが示唆された.
- 7) アンカーの性能に対して損傷/健全という二値の評価手法を適用し、かつ性能低下過程の加速性を検討に加えると、ワイブルハザードモデルでの結果に示されたように、斜面の破壊確率およびLCCは大きくなり、アンカー斜面の維持管理に関してより保守的な結果が得られることが示された.すなわち、既往の研究で用いられてきたマルコフ過程モデルはアンカーの性能低下および斜面の破壊確率を過小評価している危険性があり、本研究ではワイブルハザードモデルを適用して点検員のバイアスの影響および性能低下の加速性を考慮することで、これらの危険性を評価できたものと推察される.
- 8) 地質条件がアンカーの性能低下特性に及ぼす影響を斜面の背面地山の透水性に着目して考察し、定性的な議論ではあるが、背面地山の透水性の相違がアンカーの性能低下 過程が地質条件によって異なる要因の一つであるという知見を示した。

7.2 今後の課題

本節では、本研究で提案した手法に関する課題を取り上げ、検討および改良の余地を示し、本研究の更なる発展を願うものとする.

1) 点検結果の精度検証に関して

本研究で実施した目視点検結果およびリフトオフ試験結果の精度検証では,高ランク(ラ ンク V・ランク LF-V)においてもアンカー体の欠損の発生頻度が比較的大きい結果となっ た.また,目視点検結果とリフトオフ試験結果にある程度の相関が認められたが,目視点 検では損傷が確認されない健全度ランク V においても,健全度ランク IV と同程度の緊張 力の低下が確認された.このため,今後も各種点検結果を蓄積して健全度ランクと内部の 損傷状況をより照査するとともに,その力学的意味を検証していくことが重要であるもの と推察される.

また,目視点検で激しい損傷が確認されたランク II において,緊張力があまり低下して いないアンカーが確認された.このような結果が得られた一因として,過緊張のメカニズ ムが挙げられる.すなわち,緊張力が増加した後に減少に転じた,もしくはその逆の現象 が起こった結果,腐食等の要因によって性能は低下しているにもかかわらず,大きい緊張 力を有するアンカーが生じたものと推察される.このため,今後はアンカーの過緊張過程 のメカニズムを解明することが必要となる.

2) アンカーの性能低下モデルに関して

本研究では、リフトオフ試験結果に基づくアンカー緊張力低下のモデル化において、デ ータ数の制約からより線タイプおよび新タイプアンカーの結果も併せて利用したが、実際 はアンカーのタイプによって性能低下のメカニズムが異なる可能性が考えられる.また、 目視点検結果に基づく性能低下モデルに関しても、アンカーのタイプや材質、および施工 条件や打設斜面の地盤条件といった暴露条件により、アンカーの性能低下には異質性が存 在する可能性がある.このため、今後は文献¹⁶⁾で橋梁劣化予測に適用されているように、 構造物の性能低下に寄与する構造特性や使用環境をパラメータで表し、ハザード率に反映 させて性能低下過程の異質性に関する検討を行うことで、性能低下モデルの高度化を図る 必要性がある.

また、本研究で対象としたリフトオフ試験結果のサンプル数は、目視点検結果のサンプ ル数と比較して遥かに少ないものであり、本研究におけるリフトオフ試験結果に基づく性 能低下モデルにおいては、その推定精度に課題が残る.また、目視点検結果のサンプル数 についても、文献¹⁶⁾と比較すると、精度のよいハザードモデルを推計するには不足してい るといえる.このため、今後これらのデータを蓄積することで、性能低下モデルの精度を 向上させることが必要である.

3) アンカーの維持補修計画に関して

本研究では全ての補修計画において,更新後のアンカーの性能は初期状態に戻り,その 後の性能低下特性は補修前のアンカーのものと同様であると仮定した.しかし,更新後の アンカーは二重防食が施された新タイプアンカーであることが予想され,更新前とは異な る性能低下過程を有する可能性がある.このため,今後補修実績を積み,補修後のアンカ ーの性能低下過程のモデル化を検討する必要性がある.

また、本研究で提案する斜面安定性評価手法では、前述のように地山の粘着力および地 山の内部摩擦角は性能低下しないと仮定しているため、斜面の破壊確率を過小評価してい る可能性がある.したがって、今後は背面地山そのものの性能低下も検討に加え、本適用 事例において過剰補修とみなされた予防保全的な補修計画に関しても検証を続ける必要性 があるものと推察される.

さらに、本事例では花崗岩地質において、マルコフ過程モデルとワイブルハザードモデ ルによる各解析結果に大きな差が確認された.このため、特に花崗岩地質においては、今 後も性能低下過程の監視を継続し、データの蓄積を図ることが肝要であると推察される.

参考文献

- 1) 内閣府:日本の社会資本 2012, 2012.
- 2) 国土交通省:平成 23 年度国土交通白書, 2012.
- 3) 総務省:平成24年度版地方財政白書,2012.
- 4) 例えば、土木学会建設マネジメント委員会:アセットマネジメント導入への挑戦、土
 木学会、2003.
- 5) Federal Highway Administration: Proc., Asset Management: Advancing the State of the Art into the 21st Century through Public-Private Dialogue, Washington, D.C, 1997.
- 6) 大津宏康:地盤構造物の診断・修復・更新(アセットマネジメント,地盤工学の今後の 新たな展開),地盤工学会誌 58(1), pp.70-71, 2010.
- 7) 大津宏康:地盤工学分野における維持管理とアセットマネジメントの取り組み,地盤 工学会誌 59(9), pp.1-5, 2011.
- 大津宏康・Nutthapon SUPAWIWAT・松山裕幸・高橋健二:地下水排除工の性能低下を 考慮した斜面アセットマネジメントに関する研究,土木学会論文集 No.784/VI-66, pp.155-169, 2005.
- 9) 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, Vol.13, pp.301-314, 2006.
- 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を考慮した LCC 評価,土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.405-418, 2006.
- 11) 土質工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 1988.
- Ohtsu, H. and Suwanishwong, T.: A Proposal on Road infrastructure asset management associated with rock structures, Proc. of the Second Thailand Symposium on Rock Mechanics, pp.71-86, 2009.
- 大津宏康・Suwanishwong THAMRONGSAK・幹拓也・上出定幸:点検結果に基づくグ ラウンドアンカーエの維持補修計画,土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.158-169, 2010.
- 14) 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.
- 15) 大津宏康・Suksawat TAWEEPHONG・木許翔・上出定幸:目視点検結果およびリフトオフ試験結果に基づくグラウンドアンカー工の劣化予測,土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.68, No.4, pp. I_79- I_88, 2012.
- 16) 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.
- 17) 青木一也・山本浩司・小林潔司:劣化予測のためのハザードモデルの推計,土木学会 論文集 No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.

- 18) (財)高速道路調査会:斜面安定のためのアンカー工の計画・設計に関する研究(その 3)
 報告書, p.253, 1991.
- 19) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 2000.
- 20) 地盤工学会: グラウンドアンカー工法の調査・設計から施工まで, 1997.
- 21) Morcous, G.: Performance prediction of bridge deck systems using Markov Chains, J. Perform. Constr. Facil., 20(2), pp.146-155, 2006.
- 22) Lancaster, T.: The Econometric Analysis of Transition Data, Cambridge University Press, 1990.
- 23) Tobin, J.: Estimation of relationships for limited dependent variables, Econometrica, 26, pp.24-36, 1958.
- 24) Amemiya, T. and Boskin, M.: Regression analysis when the dependent variable is truncated lognormal, with an application to the determinants of the duration of welfare dependency, International Economic Review, Vol.15, pp.485, 1974.
- 25) 磯田和男, 大野豊: 数値計算ハンドブック, オーム社, 1990.
- 26) 堀籠教夫: ワイブル分布によるフィールドデータの解析について, 日本舶用機関学会 誌, Vol.15, No.9, pp.104-111, 1980.
- 27) Ang,A. H. and Tang,W. H., 著, 伊藤學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三, 共訳:土木・ 建築のための確率・統計の応用, 丸善, pp.357-467, 1988.
- 28) 国土交通省:公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針(共通編), 2009.
- 29) 国土交通省道路局都市・地域整備局:費用便益分析マニュアル, 2008.
- 30) 日本道路公団:設計要領第一集, 1983.
- 31) 国土交通省砂防部・独立行政法人土木研究所:地すべり防止技術指針及び同解説,(社) 全国治水砂防協会,2008.
- 32) 小鯛桂一:岩盤透水性のグラフ表示,地質調査所月報 35(9), pp.419-434, 1984.

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、本研究を遂行する上でご協力を頂いた方々と、お世話に なった方々に、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教授・大津宏康先生には、学部4回生の頃から3年間にわた り親身なご指導を賜りましたことを、心より感謝致します.学部4回生と修士2回生のと きは、ご多忙の中2~3週間に一回と中間発表の場を多く設けて頂いたことで、常に高い士 気で研究に取り組むことができました.また、現場の方を交えてのミーティングの機会も 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た.さらに、研究以 外においても、面白くかつためになる体験談や豆知識から、技術者としての考え方や問題 解決能力の重要性など、社会人になる上で非常に大切なことまで、数え切れぬほど沢山の ことをご教示頂きました.今後もこの3年間で先生にご指導頂いたことを決して忘れず、 土木技術者として社会に貢献できる人物になれるよう励む所存です.改めて、深甚なる感 謝の意を表します.3年間本当にありがとうございました.

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には,筆者にとって新鮮な情報を数多 く教えて頂き,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.研究以外 においても普段から積極的に交流を図って頂き,また時には社会人として仕事に取り組む うえでのアドバイスを頂き,非常に有意義な時間を過ごすことができました.心から感謝 致します.

京都大学大学院地球環境学堂准教授・乾徹先生には、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かつ貴重なご助言をして下さいました.深 く感謝致します.

京都大学大学院工学研究科助教・稲積真哉先生には,研究面において適切なご助言を頂 くとともに,生活面においても様々なご支援をして頂き,不自由なく研究に取り組める環 境を作って頂きました.大変感謝致します.

西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社・上出定幸氏には,ご多忙な中研究を進める上で重要な資料を数多く提供して頂くとともに,筆者からの度重なる質問に対しても 丁寧に回答して頂きました.心からお礼申し上げます.

京都大学大学院工学研究科大津研究室秘書・大八木智子さんには,出張の際の事務手続きやその他の雑務等で,常に研究生活をサポートして頂きました.大変感謝致します.

京都大学大学院工学研究科大津研究室・磯田隆行君,岩本勲哉君,太田康貴君,古賀博 久君とは,3年間研究室の同期として共に切磋琢磨し,有意義な時間を共有することがで きました.研究を進めていく上で非常に苦しかった時もありましたが,同期の皆で励まし 合えたおかげで乗り越えられたのだと思います.また,研究だけでなく生活面においても, 共に非常に楽しい時間を過ごすことができました.本当にありがとうございました. 京都大学大学院工学研究科大津研究室・Suksawat Taweephong さん,奥野直紀君,高田雄 大君,益田浩君,松塚直也君,山本浩大君,池永隼也君,大澤智君,熊本紗也華さん,袴 田薫さんとは,大津研究室のメンバーとして,非常に有意義な時間を共に過ごすことがで きました.Suksawat Taweephong さんは,同じ研究の先輩として多くの助言を頂くとともに, 普段から積極的に交流を図って頂き,研究室生活が一層有意義なものになりました.修士 1回生の皆には,旅行や飲み会,野球大会などの様々なイベントを企画して頂き,研究室 生活が非常に充実したものになりました.4回生の皆とは共に発表や論文の執筆に取り組 み,皆が初めての研究というものに四苦八苦しながらも頑張る姿に,非常に多くの刺激を 受けました.改めて,このメンバーで共に研究室生活を過ごせて本当に良かったと思いま す.本当にありがとうございました.

最後に、本研究を進める上でお世話になった全ての方々、親愛なる友人たち、そして、 大学院まで進学させて頂き、不自由なく研究に取り組める環境を与えてくれた両親に、心 から感謝致します.