マルコフ過程を用いた道路構造物の 最適維持補修計画に関する研究

平成 21 年 2 月 24 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

幹 拓也

要旨

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工と橋梁主要部材の一つである道路床版の劣化を定量的に予測し、維持補修の優先順位付けや予算管理に関するマクロ的な検討手法を提案する。その際、グラウンドアンカー、道路床版ともに既存の健全度評価に基づく点検結果を用いて、時間の経過により劣化が進展する過程をマルコフ過程を用いてモデル化する。また、このモデルによる解析結果を点検結果と比較することで、本モデルの妥当性を検証する。その上で、本モデルにより算定される推移確率行列を用いて、路線毎または区間毎に現在状態を規定するとともに、マクロ的な将来状態の予測を行う。さらに、このモデルに補強・補修を表現するモデル化手法を適用し、ライフサイクルコストを判断指標として、維持補修の優先順位付けだけでなく、路線毎または区間毎の補強あるいは補修の有効性についても検討する。

そして最後に、グラウンドアンカー、および道路床版の性能低下特性を比較することで、本研究に用いた性能低下モデルの適用範囲についての考察を行う.

第	1	章	序	論 .			. 1
1	. 1	本	研	究の	背	景	1
1	. 2	本	研	究の	目	的	1
1	. 3	既	往	の研	究		2
1	. 4	本	研	究の	構	成	3
第	2	章	マ	ルコ	ワ	過程を用いた最適維持補修計画	. 4
2	. 1	マ	ル	コフ	過	程を用いた最適維持補修計画の概要	4
2	. 2	点	検	結果	· Ø	形式	5
		2.2.1	2	グラ	ウン	ノドアンカーの点検結果	5
		2.2.2	ì	道 路』	床片	页の点検結果	6
2	. 3	マ	ル	コフ	過	程を用いた性能低下のモデル化	6
2	. 4	最	適	推移	確	率行列の同定手順	8
		2.4.1	2	グラ	ウン	ノドアンカーにおける最適推移確率行列の同定手順	9
		2.4.2	ì	道 路』	床片	反における最適推移確率行列の同定手順	9
2	. 5	維	持	補修	計	画の立案	10
2	. 6	維	持	補修	計	画の最適化	11
		2.6.1	2	グラ	ウン	ノドアンカーにおける LCC の定式化	11
		2.6.2	ì	首路』	床片	反における LCC の定式化	12
第	3	章	グ	ラウ	ァン	ドアンカーへの適用	14
3	. 1	点	検	結果	:		14
3	. 2	推	移	確率	行	列の同定	14
3	. 3	点	検	結果	ع :	解析結果の比較	15
3	. 4	補	修	戦略	(A)	設 定	16
3	. 5	LO	СС	の算	定定		17
3	. 6	考	察				18
		3.6.1	þ	解析系	結身	具に対する考察	18
		3.6.2	I	LCC	算沒	定結果に対する考察	20
₩	1	*	决	吸亡	: H=	~の海田	ດດ

4.1	点 検 結 果	
4.2	推移確率行列の同定22	
4.3	点検結果と解析結果の比較22	
4.4	補修戦略の設定	
4.5	LCC の 算 定	
4.6	考察24	
4	.6.1 解析結果に対する考察24	
4	.6.2 LCC 算定結果に対する考察26	
第 5 章	章 結論28	
5.1	構造物の性能低下特性に関する考察28	
5.2	本研究の成果	
5.3	今後の課題29	
参考	文献31	
謝辞	32	

第1章 序論

1.1 本研究の背景

わが国における道路,橋梁等に代表されるインフラ構造物は高度経済成長期に急速に整備が行われてきた.現在,それらのインフラ構造物は,長期の供用により劣化が顕在化してきており,補修の必要性が指摘されている.今後,ますます老朽化した構造物が増えることに加え,景気低迷にともなう公共投資削減,少子高齢化にともなう公共投資余力の減少といった厳しい予算制約が課されることが予想されるため,効率的なインフラ構造物の維持補修計画の立案が求められている.そこで近年,インフラ構造物を資産(アセット)として捉え,長期的な資産の状態を予測するとともに,予算制約の下で構造物の安全性・利便性等を確保し,利用者の便益を最大化するための戦略的なマネジメント手法としてアセットマネジメントの概念が注目されており,この観点からインフラ構造物の維持補修計画を立案することが必要不可欠となっている.特に,道路構造物は,道路舗装,橋梁、トンネル、および道路斜面等様々な構成要素から成り立っており,各構成要素の特性を考慮したアセットマネジメント手法の確立が求められている¹⁾.

また、アセットマネジメントにおいては、本来、予算執行者の観点からの維持補修計画の検討が必要であり、図 1.1 に示す流れに従って維持補修が行われる. 同図より、維持補修計画においては、どの路線、あるいはどの区間から維持補修すべきかの優先順位付けに関するマクロ的観点からの検討とどの箇所から維持補修すべきかの選択に関するミクロ的な観点からの検討が必要である. このうち、予算計画においてまず重要となるのはマクロ的観点からの検討であり、この検討がなされた上で、ミクロ的観点からの検討に移行することで、効率的な維持補修が可能となる. このように、道路構造物のアセットマネジメントにおいて、第一に重要になることはマクロ的観点からの維持補修計画の検討である.

1.2 本研究の目的

本研究では、マクロ的なアセットマネジメントの観点から、道路構造物の最適維持補修計画を立案するための一評価手法を提案することを目的とし、以下のよ

うに展開する.

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(以下、アンカーと称す)と橋梁主要部材の一つである道路床版(以下、床版と称す)を対象とし、マクロ的なアセットマネジメントの観点から最適維持補修計画の立案を目指す.維持補修計画の検討に際して、第一に重要となることは、性能低下の予測手法である.本研究では確率統計学手法としてマルコフ過程に注目し、これを用いて経時的な性能低下をモデル化し、将来状態を予測する.そして、予測結果に基づき、複数の補修戦略を設定し、ライフサイクルコスト(以下、LCCと称す)を判断指標として、維持補修の優先順位、および路線毎または区間毎の最適な補修戦略を決定することで最適維持補修計画を立案する.

1.3 既往の研究

本節では、アンカー、および床版のアセットマネジメントに関する既往の研究を概観し、それらの中での本研究の位置づけを述べる.

S.Thamrongsak²⁾らはアンカーの性能低下について、既存の健全度評価に基づく 点検結果にマルコフ過程を適用し、点検結果の仕様や数的制限に対処するために 仮定条件を設定することで性能低下のモデル化を行った. また、LCC を判断指標 として路線単位の補修優先順位付けに関するマクロ的な一検討手法を示した.

大津ら ³⁾は、アンカーの性能低下について、その導入力の低下に着目してモデル化を行い、LCC を指標として斜面毎の最適補修年を判断する手法を提案した. 津田ら ⁴⁾は橋梁部材、その中でも床版の性能低下過程にマルコフ過程を適用し、マルコフ推移確率を指数ハザードモデルで推定することで、性能低下過程における不確実性を考慮した予測モデルを提案した.

貝戸ら⁵⁾は床版の維持補修に必要な LCC を,社会的割引率を用いない平均費用 法によって評価した. つまり,半永久的な供用期間を設定することにより,床版 の維持補修に必要となる LCC を初期の劣化状態に依存する相対費用と毎年等価 に発生する年平均費用に分解し,年平均費用による評価手法を提案した.

以上より、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.

● アンカー:本研究では、アンカーに関する既往の研究²⁾を引き継ぎ、マクロ的 観点からの維持補修を検討するが、後述する健全度評価区分の変更に対処す る方法を提案し、性能低下予測モデルの将来状態における予測精度を確認する.一方、既往の研究³⁾のように特定の斜面を対象としたミクロ的な検討は行っておらず、LCC 算定において斜面の安定性について考慮していない.

● 床版:床版においても、アンカーと同様に既存の健全度評価区分に基づいて判定された点検結果にマルコフ過程を適用して、性能低下のモデル化を行い、マクロ的観点からの維持補修の検討を行う. ただし、本研究における点検結果は既往の研究 4)に比べてデータ数が少ないため、推移確率をハザードモデルのような確率モデルを用いて推定することが困難である. このため、アンカー同様に、簡易化のために仮定条件を設定することで推移確率を推定する. さらに、既往の研究 5)では LCC の算定の際に半永久的な LCC 算定期間を設定し、社会的割引率を用いずに、補修費用のみを考慮している. しかし、本研究では、ある一定の LCC 算定期間を設定し、その LCC 算定期間において LCCを評価する. また、社会的割引率を用いて、点検費用、補修費用、および補修にともなう社会経済的損失として利用者損失を考慮して LCC を算定する.

1.4 本研究の構成

本論文の構成は全5章からなる.

第1章では、研究の背景、目的、および既往の研究について述べた.

第2章では、マルコフ過程を用いた最適維持補修計画の立案に関する一連の流れを述べる.具体的には、はじめに本研究において道路構造物の性能低下のモデル化にマルコフ過程を適用する根拠について述べ、最適維持補修計画の概要を説明する.次に、実際の道路構造物の点検結果の形式を示し、性能低下のモデル化における諸問題を明らかにし、それらの問題に対処した性能低下のモデル化手法について説明する.そして最後に、このモデル化手法に基づいた維持補修計画の立案、および維持補修計画の最適化手法について説明する.

第3章,および第4章では、それぞれ実際のアンカーと床版を適用事例として取り上げ、第2章で提案した最適維持補修計画立案のための評価手法を適用し、結果に対する考察を行う.

第5章では、第3章、および第4章での結果から本研究の結論として、構造物性能低下に関する考察、本研究の成果、および今後の課題について述べる.

第2章 マルコフ過程を用いた最適維持補修計画

本章では、道路構造物として、斜面対策工の一つであるアンカーと橋梁主要部材の一つである床版を取りあげ、マルコフ過程を用いた最適維持補修計画の具体的な立案手法について述べる.

2.1 マルコフ過程を用いた最適維持補修計画の概要

本研究では、確率統計学手法としてマルコフ過程に注目し、アンカー、および 床版の健全度評価区分をマルコフ過程に適用することでそれらの性能低下をモデ ル化する. ある時点の状態がそれ以前の状態にのみ依存するような確率過程のこ とをマルコフ過程といい、特に直前の状態にのみ依存す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、現時点の状態が直前時点の状態だけに依存するのではなく、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を構築することができる利点がある.また、構造物の性能を示す状態量が連続量ではなく健全度評価区分のような離散量である場合、マルコフ過程の操作性は極めて高い.本研究でマルコフ過程を用いる理由はこのためである.

一般的にマルコフ過程の特性は、次式によって示すことができる.

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t)$$
(2.1)

ここに X_t は離散型パラメータ, i_t は時点 t における状態, P は状態生起確率を表す.また,経時変化を離散型とし,ある状態から次の状態への推移確率を累積することにより,マルコフ過程を用いた性能低下予測モデルを構築することができる.具体的には,ある状態から直後の状態への推移確率行列(以下,推移行列と称す)を T とすれば,状態が初期時点から τ 時点推移した場合の状態は次式のように定義される.

$$S(\tau) = S(0) \cdot T^{\tau} \tag{2.2}$$

ここに、S(0)は初期状態、および $S(\tau)$ は時点 τ の状態を表す.また、推移行列Tは 状態を表すS(t)の要素、あるいは区分の数をnとすると以下のように $n \times n$ 行列で 表すことができる. なお, 推移行列Tの要素 T_{ij} は経時変化過程において区分iから区分iへ推移する確率を意味する.

$$T = \begin{bmatrix} T_{nn} & T_{nn-1} & \cdots & T_{n1} \\ T_{n-1n} & T_{n-1n-1} & \cdots & T_{n-11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{1n} & T_{1n-1} & \cdots & T_{11} \end{bmatrix}$$
 (2.3)

本研究では、数区分のランクに分かれた点検結果から推移行列を求め、将来の状態を予測する.以上のように、マルコフ過程の推移確率を用いる手法では、要素毎に推移確率を算定することで、平均化された状態推移で評価するのではなく損傷の大きさや範囲を考慮した性能低下の予測が可能である.また、予測結果に基づき、維持補修計画を立案し、LCCを判断指標とすることで維持補修計画の最適化を行うことが可能になる.本章ではこの一連の流れを具体的に説明する.

2.2 点検結果の形式

点検結果に基づくマルコフ過程を用いた性能低下のモデル化手法の構築において,点検結果の形式が及ぼす影響は大きく,その影響を考慮してモデル化する必要がある.そのため本節では,実際のアンカー,および床版の点検結果の形式に触れ,それらの点検結果をマルコフ過程に適用する際の留意点について説明する.

2.2.1 グラウンドアンカーの点検結果

本研究で用いるアンカーの点検結果は、旧 JH の健全度評価区分に準じ、表 2.1 に示す六区分(表中では $I \sim VI$)に判定されているものと、表 2.2 に示す三区分(表中では I, II, OK)に判定されているものがある.これは、2002 年にアンカーにおける健全度評価区分が改定され 6)、それ以前に使用されていた表 2.1 に示す健全度評価区分が表 2.2 に示す健全度評価区分へ変更されたためである.詳細については後述するが、本研究では、二つの健全度評価区分で判定されたアンカーにおいて、同じ手法を用いて性能低下を評価するために、表 2.2 に示す 3 ランクの健全度評価区分を表 2.1 に示す 6 ランクの健全度評価区分に再分配し、6 ランクの健全度評価区分に基づいて性能低下のモデル化を行う.

また、本研究で用いる点検結果は、図 2.1 に示すように、同一斜面のアンカー を定期的に点検したものではなく、ある時点で一斉点検したアンカーを路線毎に、 供用期間で区別し、まとめたものである. つまり、同一斜面を複数回点検したものではなく、同一路線の数ある斜面の点検結果を供用期間で区別することで、年次の違いを表現したものである. このため、点検結果の年次間隔が一定でないことに加えて、点検結果の点検本数が年次によって異なるという特徴がある. これらのことが、後述するようにアンカーの性能低下を解析的にモデル化する上での支障となる.

2.2.2 道路床版の点検結果

本研究で用いる床版の点検結果は表 2.3 に示す旧 JH のパネル別健全度評価区分に準じ、五区分(表中では $A\sim E$)に判定される。表中の赤字部は 2003 年に点検要領改訂 $^{7)}$ にともない追加となったものである。

また、床版の点検結果は図 2.2 に示すように、アンカーとは異なり同一区間の床版を複数回点検したものである. しかし、縦桁増設、一部道路の拡幅、および床版下面のコンクリート剝落対策のために調査年次により点検枚数に若干の差があり、点検間隔はアンカー同様に一定でない. そのため、床版においても性能低下のモデル化の際には、このような点検結果の特性を考慮する必要がある.

2.3 マルコフ過程を用いた性能低下のモデル化

本研究で対象とする表 2.1, および表 2.3 に示す健全度評価区分に基づくマルコフ過程を用いた性能低下のモデル化手法は,本章第 1 節で説明したモデルを拡張して次式のように表される.

$$S(t+\tau) = S(t) \cdot T^{\tau} \tag{2.4}$$

$$S(t) = [S_n(t) \ S_{n-1}(t) \ \cdots \ S_2(t) \ S_1(t)]$$
 (2.5)

$$T = \begin{bmatrix} T_{nn} & T_{nn-1} & \cdots & T_{n1} \\ 0 & T_{n-1} & \cdots & T_{n-1} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & T_{11} \end{bmatrix}$$
 (2.6)

ここに、S(t)は、供用後 t 年時点で点検したアンカー、あるいは床版の全数を表す状態ベクトルであり、その成分 $S_i(t)$ は供用後 t 年時点での各ランク i に相当するアンカー本数、あるいは床版枚数を表す、また、状態行列 S(t)のランク $1 \sim n$ はアンカーではランク $I \sim VI$ に相当し、床版ではランク $A \sim E$ に相当する. さらに、

推移行列 Tの成分 T_{ij} の添字 i および j は構造物性能低下の不可逆性により $i \leq j$ となるため, $T_{ij} = 0$ (i > j) となることに留意されたい.

ここで、マルコフ過程を用いたモデル化において推移行列 T の成分 T_{ij} を算定する上では、同一地点において、一定の点検データ数、および点検間隔で、出来るだけ多くの点検が行われていることが望ましい。しかし、実際の事例では前述のとおり理想的な点検結果が整備されていないことが一般的である。このマルコフ過程を用いて性能低下をモデル化する上での点検結果の不備に対処する方法としては、第 1 章の既往の研究 $^{4)}$ で示したような推移行列の成分 T_{ij} をハザードモデルのような確率過程モデルを用いて表現する方法が挙げられる。

しかし、本研究で対象とするアンカー、および床版の点検データ数は、参考文献に示した事例に比べて少ない.このため、これらの道路構造物の性能低下特性を数学モデルである確率過程を用いてモデル化することは困難である.このような観点から、本研究においては、マルコフ過程を適用する上で、簡便なモデルを用いて表現することを目的として以下のような仮定条件を設ける.

- ① 同一路線(区間)におけるアンカー、および床版は全て同様の劣化過程に従う.
- ② アンカーの推移行列は耐用年数を通じてただ一つに決定され、かつ一定である.
- ③ 床版の推移行列は次の点検が行われるまではただ一つに決定され、かつ一定であり、点検が行われる度に更新される.
- ④ 推移行列が対象とする推移期間は1年間である.
- ⑤ 1年間の状態推移は現状維持、もしくは1区分のみの劣化とする.

なお、上記の①~⑤の各仮定条件の内、①、④、⑥はアンカー、および床版に共通の仮定条件であり、②の仮定条件はアンカーのみを対象とし、③の仮定条件は床版のみを対象とする.ここに、①の仮定条件は図 2.1、2.2 が示すように、同一路線(区間)であっても点検データが、同一箇所を対象として得られたものばかりではないことに対処するために設けた仮定条件である.本来、構造物の劣化過程は、それらの施工条件や暴露条件により異なることが想定されるため、構造物の設置条件毎に分離して取り扱うことが必要であると推察される.しかし、本研究の目的は、路線(区間)毎の性能低下を予測するというマクロ的な観点から維持補修の優先順位付けの意思決定手法を提案するものであることから、上記のような仮定条件を設定した.次に、②~⑤の仮定条件は前述のとおり、本研究におけ

る構造物の劣化特性を確率過程を用いてモデル化することの困難さに対処するために設けたものである. すなわち、簡便な定常過程に従うものとするため、推移行列の状態推移を1年単位と短く設定した. そして、対象期間が1年単位と短いため、一回の状態推移は、表 2.1、2.3 で示す健全度評価区分で現状維持、もしくは1ランクであると仮定した. ただし、アンカーでは耐用年数を通じて定常過程を仮定し、床版では点検が行われる毎に推移行列を更新するという段階的定常過程を仮定する. 以上の仮定条件の下で、状態量 S と推移行列 T の関係は式 2.7で表される. また、推移行列 T は次のように、アンカーの場合は式 2.8、床版の場合は式 2.9 で表され、各要素が表す推移確率を図 2.3、2.4 に概念図として示す.

$$S(t+1) = S(t) \cdot T \tag{2.7}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{\text{VIVI}} & T_{\text{VIV}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{\text{VV}} & T_{\text{VIV}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{\text{WW}} & T_{\text{WH}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{\text{HH}} & T_{\text{HH}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{\text{HH}} & T_{\text{HI}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{\text{II}} \end{bmatrix}$$
 (2.8)

$$T = \begin{bmatrix} T_{EE} & T_{ED} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{DD} & T_{DC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{CC} & T_{CB} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{BB} & T_{BA} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{AA} \end{bmatrix}$$
(2.9)

なお、上記の仮定条件は、あくまで現状で得られている点検結果の制約に対処するために設定したものである.このため、後述するように、今後戦略的に点検データを蓄積することで、モデル化手法を高度化することは可能であり、上記の仮定条件の問題点を解消することも可能である.また、本研究では、構造物の性能低下が停滞しないように、すべての成分 T_{ij} において $0 < T_{ij} < 1$ を満たすものとして計算する.ただし、最低ランクでは、吸収状態であるため推移確率は 1 となる.

2.4 最適推移確率行列の同定手順

点検結果の制約に対処するために設定した仮定条件は推移行列の同定手法に も関わるため、アンカーの場合と床版の場合では、その同定手法が異なる. そこ で、本節では、前述したモデル化手法における最適推移行列の具体的な同定手法 を説明する.

2.4.1 グラウンドアンカーにおける最適推移確率行列の同定手順

各点検時の点検本数,および点検間隔が異なるデータを用いて,式 2.8 に示すアンカーの推移行列 T の成分は図 2.5 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, および k は評価区分ではなく時点を表し i < j < k の関係が成り立つことに留意されたい.すなわち,前節の仮定条件の下で初期状態がすべて健全なランク VI であるとすれば,各点検時に対する暫定解となる推移行列 T(図 2.5 では T_i , T_i , T_k を指す)の成分は次の確率漸化式を解くことで算定される.

$$\begin{split} S_{\text{VI}}(t) &= S_{\text{VI}}(t-1) \cdot T_{\text{VI VI}} \\ S_{\text{V}}(t) &= S_{\text{VI}}(t-1) \cdot T_{\text{VI V}} + S_{\text{V}}(t-1) \, T_{\text{V V}} \\ S_{\text{IV}}(t) &= S_{\text{V}}(t-1) \cdot T_{\text{V IV}} + S_{\text{IV}}(t-1) \cdot T_{\text{IV IV}} \\ S_{\text{III}}(t) &= S_{\text{IV}}(t-1) \cdot T_{\text{IV III}} + S_{\text{III}}(t-1) \cdot T_{\text{III III}} \\ S_{\text{II}}(t) &= S_{\text{III}}(t-1) \cdot T_{\text{III II}} + S_{\text{II}}(t-1) \cdot T_{\text{II II}} \\ S_{\text{I}}(t) &= S_{\text{II}}(t-1) \cdot T_{\text{III II}} + S_{\text{I}}(t-1) \cdot T_{\text{II II}} \end{split}$$

つまり、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 t-1、t-2、…、 1、 0 と下げていき、順次代入していくことで初期状態と各点検結果から推移確率行列 T 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 まで繰り返し計算を行うことで、すべての成分が算定される.次に、この暫定解を用いて最終点検時(図 2.5 においては k 年が最終点検年である)までの拡張計算を行い、それらを合算することで路線全体の性能低下過程として最適化を行う.そして、暫定解を求めたときと同様の計算過程に基づき、最適化によって得られた多項方程式を解くことで路線毎の最適推移行列が同定される.この最適推移行列を初期状態から累積することで性能低下の予測が可能となる.

2.4.2 道路床版における最適推移確率行列の同定手順

アンカーの場合と同様に、床版においても各点検時の点検枚数、および点検間隔が異なるデータを用いる. しかし、床版においては各点検時の点検枚数に違いがみられるのは、アンカーの場合とは異なり過去の補修履歴や道路の拡幅によるものであり、同一区間の点検結果である. そのため式 2.9 に示す床版の推移確率行列 T の成分は各点検間を区分的な定常過程ととらえて、図 2.6 に示す計算過程を踏むことで同定される. すなわち、アンカー同様、前節の仮定条件に基づき、初期状態がすべて健全であるランク E とすれば、供用開始時から最初の点検時までの間の推移行列 T(図 2.6 では T_{0i} を指す)の成分はアンカーの場合と同様に次式

の確率漸化式を繰り返し計算することで算定できる.

$$S_{E}(t) = S_{E}(t-1) \cdot T_{EE}$$

$$S_{D}(t) = S_{E}(t-1) \cdot T_{ED} + S_{D}(t-1) \cdot T_{DD}$$

$$S_{C}(t) = S_{D}(t-1) \cdot T_{DC} + S_{C}(t-1) \cdot T_{CC}$$

$$S_{B}(t) = S_{C}(t-1) \cdot T_{CB} + S_{B}(t-1) \cdot T_{BB}$$

$$S_{A}(t) = S_{B}(t-1) \cdot T_{BA} + S_{A}(t-1) \cdot T_{AA}$$
(2.11)

さらに、各点検間における推移行列 $T(\boxtimes 2.6$ では T_{ij} , T_{jk} を指す)の成分は年次の早い点検結果を初期状態、年次の遅い点検結果を推移後の状態ととらえ、式 2.11 の確率漸化式を解くことで算定できる.ここで、将来予測のための最適推移行列には最終点検間の性能低下過程を表す推移行列(図 2.6 では T_{jk} を指す)を用い、最終点検時からこの最適推移行列を累積していくことで最終点検時以降の将来予測を行う.また、この最適推移行列は新しく点検が行われる毎に更新されるものとする.このようにアンカーと床版において、最適推移行列の同定手法が異なる理由は前述したように点検結果の形式や点検データ数等の制約のためである.

2.5 維持補修計画の立案

維持補修計画を立案するためには、具体的に、点検実施間隔、あるいは構造物がどのランクになったときに補修を施すか、また、補修を行う際にどのような補修方法を採用するかといった要素を考慮する必要がある。点検実施間隔は各時点において予測される状態、あるいは専門家の判断によって決定されうるが、補修方法は割り当てられる予算の制約、補修対象となる性能低下レベル(以下、ターゲットレベルと称す)および補修後に期待する構造物の性能レベルに依存する.

ここで、状態行列Sに基づき、何らかの補修作業が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.

$$S^*(\tau) = S(\tau) \cdot R \tag{2.12}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{nn} & R_{nn-1} & \cdots & R_{n1} \\ R_{n-1n} & R_{n-1n-1} & \cdots & R_{n-11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{1n} & R_{1n-1} & \cdots & R_{11} \end{bmatrix}$$
 (2.13)

ここに、 $S^*(\tau)$ 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、式 2.13に示す補修行列 Rの要素 R_{ij} はアンカー、および床版の評価区分 i が区分 j に推移する確率を表す.なお、実際の構造物における補修プラン、および点検実施間隔

は対象とする構造物によって異なるため、次章以降の事例検証で詳説する.

2.6 維持補修計画の最適化

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を目的としており、具体的にはある一定期間において考えられうる全ての戦略のうち、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案を意味する.本研究では、LCCを判断指標とすることで、維持補修計画の最適化を行う.

また、LCC は一般的に次式(2.14)で定義される $^{8)}$.

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_0 {(2.14)}$$

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

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、既設構造物を対象としている場合が多いため、これらの費用項目のうち特に維持補修に関わる C_{MT} のみが対象項目となることが多い.したがって、本研究においても、維持補修費用を中心とした LCC 評価を行う.

2.6.1 グラウンドアンカーにおける LCC の定式化

アンカーにおいて、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は、アンカーの更新、あるいは延命化を目的とした補強といった対策が採られる.一方で、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場合もある.つまり、ある一定期間において必要になると想定される LCC 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と考えられる.

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、点検実施年に関わらず一定値である. なお、点検費用行列を C_{ins} とすると、次式によって表され、c は点検費用を表す.

$$C_{ins} = [c] \tag{2.15}$$

次に、点検が実施された際に補修作業が必要であると判断された場合に補修費

用が計上され、補修費用行列を C_{rep} とすると、次式によって表される.

$$C_{rep} = \begin{bmatrix} c_{VI} & c_{V} & c_{IV} & c_{III} & c_{II} & c_{I} \end{bmatrix}^{T}$$
 (2.16)

ここに、要素 c_i は各評価区分に対する補修費用を表す.ただし、これらの費用は 更新あるいは補強といった補修方法によって決定される.

以上において定義した各費用を用いて,本研究におけるアンカーの LCC 算定式は以下のようになる.

$$LCC = \sum_{i=1}^{t_x} C_{ins} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i \cdot t_m} + \sum_{i=1}^{t_x} S(i \cdot t_m) \cdot C_{rep} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i \cdot t_m}$$
 (2.17)

$$t_x = t/t_m \tag{2.18}$$

ここに, t_x は一定期間年数 t における点検実施回数, t_m は点検実施間隔年,および $S(i \cdot t_m)$ は補修作業が実施される以前の状態行列を表す.なお, ρ 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,対象国のマクロ経済の成長率もしくは公定歩合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.

本来、点検は構造物の現状を規定するものであり、斜面崩壊等の災害リスクを低減することを目的とし、予防保全の観点から実施される.したがって、LCCを算定するためには、斜面の力学的安定性を考慮すべきである.しかしながら、本研究では、数万本という膨大な本数のアンカーを対象としており、各アンカーの導入力の低下を詳細に検討するものではなく、路線毎の維持補修の優先付けを行うものである.すなわち、点検間隔に関わらず定常の性能低化過程、つまり同様の推移行列によって将来予測をしているため、式 2.17 の算定式に斜面安定性に関する条件を加味していないことに留意されたい.

2.6.2 道路床版における LCC の定式化

床版においても、アンカーと同様、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は、床版の更新、あるいは延命化を目的とした補強といった対策が採られる.また、性能低下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.したがって、床版のLCCの算定においても点検費用と補修費用を計上する.さらに、床版の場合には、補修を行う際にアンカーとは異なり通行止めや車線規制の対応が必要となるため、迂回や速度減少にともなう走行経費の増加や時間的な損失、

交通事故リスクの増加等の利用者に生じる間接的な損失を計上する必要がある. このため、本研究における床版の LCC 算定式は、補修作業によって間接的に生じる利用者損失額(以下、利用者損失額と称す.)を C_{ind} とすると、次式で表される.

$$LCC = \sum_{i=1}^{t_x} C_{ins} \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{i \cdot t_m} + \sum_{i=1}^{t_x} C_{rep}(i) \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{i \cdot t_m} + \sum_{i=1}^{t_x} C_{ind}(i) \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^{i \cdot t_m}$$
(2.19)

式 2.19 の右辺第 1 項, はアンカーにおける LCC 算定式と同様である. 一方, 第 2 項の維持補修費用, 第 3 項の利用者損失額は仮に m 回目と n 回目の点検時に補修するとした場合それぞれ以下のような数列として表される.

$$0,0,\dots,0,C_{rep_m},0,0,\dots,0,C_{rep_n},0,0,\dots$$
 (2.20)

$$0,0,\cdots,0,C_{ind_m},0,0,\cdots,0,C_{ind_n},0,0,\cdots$$
 (2.21)

すなわち、アンカーの場合と異なり、床版においては一枚ずつの補修を行うことは現実的ではなく、床版全体にある程度劣化が進行した段階で全面補修を行うため、m回目とn回目の点検時以外の補修費用は0となる.また、利用者損失額も補修を行う場合のみ発生するため、m回目とn回目の点検時以外は0となる.さらに、利用者損失額は以下の損失の和として表される.

$$C_{ind} = C_s + C_i + C_k \tag{2.22}$$

ここに、 C_s は走行費用損失、 C_j は時間損失、 C_k は交通事故損失を表す、そして、これらの損失は通行量調査結果より次式によって求めることができる.

$$C_{s} = \sum n \times N_{m} (B_{m}^{L} \times l^{L} - B_{m}^{H} \times l^{H})$$

$$C_{j} = \sum n \times N_{m} \times A_{m} \times \Delta t$$

$$C_{k} = \sum n \times N_{m} (D_{m}^{L} - D_{m}^{H})$$

$$(2.23)$$

ここに、n は通行規制日数であり、 N_m は日交通量を、 B_m^L 、 B_m^H は車種毎の走行経費原単位(B_m^L が迂回時もしくは車線規制時、 B_m^H が現道走行時)を表し、 l^L 、 l^H はそれぞれ迂回時もしくは車線規制時走行距離、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。さらに、 D_m^L 、 D_m^H はそれぞれ車両 1 台当たりの迂回時交通事故損失額、現道交通事故損失額を表す。なお、これらの利用者に関わる損失項目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。

以上のように、床版では点検、補修費用等の管理者費用に加えて、補修にともなう社会経済的損失である利用者損失額も考慮し、より高度な LCC 評価を行う.

第3章 グラウンドアンカーへの適用

本章では、前章で説明したモデル化手法を、実際のアンカーに適用し、考察を述べる.

3.1 点 検 結 果

本事例で対象とする路線は 5 路線(A~E 路線)であり、表 3.1 に 2000 年に実施された対象路線のアンカーの点検結果を示す. また、表 3.2 に 2007、2008 年に A 路線の一部で追加的に実施されたアンカーの点検結果を示す. 2.2.1 で示したように 2002 年に健全度評価区分が変更されたため、表 3.1、3.2 に示す点検結果はそれぞれ 6 ランクの健全度評価区分、3 ランクの健全度評価区分で判定されている.

同表中にある新旧 2 種類のアンカータイプとは、1988 年にアンカーの防食に関する基準 ⁹⁾が制定されたことを受け、この基準制定前に打設されたアンカー(以下、 旧タイプアンカーと称す)と、この基準制定以降に打設されたアンカー(以下、新タイプアンカーと称す)を区別したものである. 防食に関する基準が規定されたことにより、新旧のアンカータイプにおいては、PC ケーブルの腐食に対する耐久性が異なると考えられる. さらに、本研究の対象となるアンカーのうち、旧タイプアンカーは、そのほとんどが、図 3.1 に示す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. 一方、新タイプアンカーは、そのほとんどが、図 3.2 に示す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)である. この 2 種類のアンカーに対して、本研究における点検結果を対象とした各ランクにおけるアンカータイプ構成比を図 3.3 に示す. 同図より、鋼棒タイプの方がより線タイプに比べて圧倒的に健全度が低いものが多くなっており、新旧 2 タイプの劣化特性は明らかに異なっていると判断できる. したがって、本研究においては、新タイプアンカーと旧タイプアンカーを区別して、合計 8 路線の性能低下について考察する.

3.2 推移確率行列の同定

本節では,第2章で説明した性能低下のモデル化手法に表 3.1 に示す 2000年に

実施された点検結果を適用し、各路線の最適推移行列を同定する. また、その同定結果を表 3.3a~h に示す.

3.3 点検結果と解析結果の比較

本節では、前節で実際に同定した推移行列を用いた性能低下モデルの解析を行い、供用後経過年数毎の状態行列を算定する.この算定結果として、推移行列の算定に利用した表 3.1 に示す点検結果と解析結果との比較を図 3.4a~h に示す.さらに、A 路線旧タイプにおいては、表 3.2 に示す 2007、2008 年に実施された点検結果を、前述したように 6 ランクの健全度評価区分に再分配することで、2000 年点検結果と同様の比較を行うことが可能となる.ここで、再分配は図 3.5 に示す方法で行い、再分配の根拠となった判定項目一覧を、6 ランクの健全度評価区分、3 ランクの健全度評価区分それぞれ、表 3.4、3.5 に示す.さらに、6 ランクに再分配された点検結果を表 3.6 に示し、この点検結果における解析結果との比較は図 3.6 に示す.

つまり、図 3.4 により、2000 年の点検結果とこの点検結果に基づいて同定された推移行列による 2000 年時点のシミュレーションの解析結果を比較することで、本モデル化手法の内挿の範囲内における予測精度を検証し、その妥当性を評価する. そして、図 3.6 においては 2007、2008 年に実施された点検結果と 2000 年に実施された点検結果に基づいて同定された推移行列による 2007、2008 年時点のシミュレーションの解析結果を比較することで、本モデル化手法の外挿の範囲における予測精度を確認する.

次に、本研究において、3 ランクの健全度評価区分ではなく 6 ランクの健全度評価区分を用いる根拠について説明を加える.

表 3.4, 3.5 より, 3 ランクの評価区分においては, 判定項目が比較的明確に区分されているのに対して, 6 ランクの評価区分は判定項目が細かく, その程度を判断するのが難しいと考えられる. しかしながら, 3 ランクの評価区分では, 判定の曖昧さは解決される一方で, 細かく判定がなされていないため, 補修を施す際に, 再度細かく調査する必要があるものと考えられる. 例えば, 3 ランクの場合に,同ランクに区分されるアンカーにおいてもその性能低下の程度に差があり, 必要とされる補修レベルも異なると考えられる. つまり, 補修を施す段階を考慮

すると3ランクより6ランクの評価区分の方が適しているといえる.したがって、本研究では、6ランクの評価区分に統一して、アンカーの性能低下を評価する. 続いて、本研究で提案する図 3.5 に示す再分配方法について詳説する.

表 3.4、3.5 の判定項目は両者の整合性をとる上で留意点が存在する. つまり、 6 ランクの評価区分において、旧タイプアンカーは健全なランク VI に該当するも のがないのに対し、3 ランクの評価区分によって判定された 2007, 2008 年の点検 結果においては, 6 ランクの評価区分のランク VI に相当するランク OK のアンカ ーが数多くみられる. このため, 3 ランクの評価区分においてランク OK に該当 するものは 6 ランクの評価区分においてはすべてランク V に再分配する. また, 3 ランクの評価区分によるランク II に該当するものは, 6 ランクの評価区分ではラ ンクⅢ,Ⅳとする.これらのような基本再分配法則に加えて,点検をおこなった アンカーー本ー本の写真を参考にして、より詳細な性能低下の程度、複数の性能 低下の判定項目を評価し(図 3.5 中の特殊再分配法則に当たる), 出来る限り 6 ラ ン ク の 評 価 区 分 に 近 く , ま た 3 ラ ン ク の 評 価 区 分 が 有 す る 規 則 性 を 残 し た 再 分 配 方法を設定した.しかし、点検が実施されたアンカーの中には写真が保存されて いないものもあり、それらのアンカーについては基本再分配法則のみに基づく再 分配をおこなった. このように, 本研究で提案する再分配方法には, その再分配 に際して多少恣意的な要素が含まれていることに留意されたい、また、この再分 配方法の適用範囲は旧タイプアンカーに限られる.

ここで、2007、2008年に実施された点検は A 路線の旧タイプアンカーのみであり、限られた点検結果から本モデルの将来状態における予測精度、および再分配方法の妥当性について議論することは困難である. したがって、今後点検データを蓄積することで予測精度の向上を図るとともに、再分配方法を高度化していく必要がある. ただし、図 3.4、3.6 に示すように概ね整合性のとれた結果が得られていることから、本研究におけるモデル化手法についてはある程度の実用性があるものと判断し、本研究を進める.

3.4 補修戦略の設定

本事例では、アンカーの補修戦略として図 3.7 に示すような、以下の 2 つの補修プランを設定する.

- 1) プラン 1: 健全度ランクが I まで低下したアンカーのみを打ち替える. ただし、 打ち替えた後のアンカーの性能低下特性は当初と同様と仮定する.
- 2) プラン 2: 予防保全の観点から、健全度ランクが I まで低下したアンカーのみを打ち替えることに加えて、健全度ランクが II まで低下したアンカーに対して、防食を施すことで、延命化する. ただし、延命化されたアンカーの状態は以後ランク II を維持すると仮定する.

つまり、プラン 1 は事後補修を目的とした補修プラン、プラン 2 は予防保全を目的とした補修プランと位置づけることができる。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。

ここに、 R_1 は補修プラン 1 の補修行列を、 R_2 は補修プラン 2 の補修行列である. さらに、本事例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 8 種類の補修戦略に関して議論する.

3.5 LCC の 算 定

本節では、維持補修計画の最適化を行うために、各補修方法に関する費用を設定し、その費用に基づいて LCC を算定する. 本事例において必要となる費用は点検費用、アンカー更新費用(ランク I)、および延命化費用(ランク I)である. 具体的な数値は NEXCO 西日本によって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、以下に示すように設定する.

$$C_{ins} = [2,000]$$
 (3.2)

$$C_{rep}^{-1} = \begin{bmatrix} 0\\0\\0\\0\\550,000 \end{bmatrix} \qquad C_{rep}^{-2} = \begin{bmatrix} 0\\0\\0\\10,000\\550,000 \end{bmatrix}$$
(3.3)

ここに, C_{rep}^{-1} はプラン 1 における補修費用行列を, C_{rep}^{-2} はプラン 2 における補修費用行列を表す.

また,前節で設定した補修戦略と式 3.2, 3.3 に示す費用に基づいた全路線の LCC 算定結果を図 3.8a~h に示す. なお,本事例における LCC 算定期間は供用開始時点から 40 年とする. さらに,式 2.17 に示す LCC は,対象とする路線における全てのアンカーを対象として定式化したものである. しかし,この場合,LCC はアンカー本数が多い路線ほど大きくなるので,優先順位の議論をすることができない. したがって,本事例では,対象路線毎の性能低下特性を考慮した比較を行うために,供用開始時点を起点とした,対象路線のアンカーー本あたりの LCC を算定した. したがって,LCC 算定期間において LCC が最小となる補修戦略が各路線の最適維持補修計画であり,最適維持補修計画において,点検実施間隔が短く,最小 LCC が大きい路線ほど補修優先順位が高いことを表す.

3.6 考察

本節では、3.3、3.4、3.5 における算定結果より、解析結果に対する考察、および LCC 算定結果に対する考察を行い、本章のまとめとする.

3.6.1 解析結果に対する考察

前述したように、図 3.4 に示す 2000 年の点検結果とこの点検結果に基づいたマルコフ劣化モデルによる 2000 年時点のシミュレーションの解析結果は概ね整合性のとれた結果となっている。しかしながら、ランク V やランク IV においては、年次毎にばらつきが見られる。ただし、A 路線新タイプを除くすべての路線の点検結果においては、ランク VI と判定されたアンカーが見られず、ランク V, もしくはランク IV が卓越する結果となっている。また、いずれの路線の点検結果においても、ランク III 以下の発生頻度が低くなっている。このような点検結果とこの点検結果に基づいたマルコフ過程による解析結果に相違が生じる要因については以下のように推察される。

2.2.1 で示したように、本研究における点検結果は同一路線のものであるが、ある年に一斉点検されたものを供用期間毎にまとめることで、年次を表現したものであり、同一のアンカーを対象として得られたものではない.そのため、図 3.4c に示す B 路線新タイプのように、供用 4 年経過しているアンカーをまとめた場合にランク V、およびランク Vが卓越するのに対して、供用 6 年のアンカーをまと

めた場合ではランク Vのみが卓越するという判定結果が生じうる. さらに、本研究における性能低下のモデル化手法では、各年次の調査結果を最終調査年まで推移させたものを合算することで最適化し、路線全体の調査結果としている. このため、モデル化に関してはアンカーの本数が多い年次の点検結果による影響が大きく、図 3.4b に示す A 路線新タイプにおける供用 4 年の点検結果や図 3.4d に示す C 路線旧タイプにおける供用 12 年の点検結果のように、他の年次に比べて極端に点検本数が多い場合、ほぼその年次の状態推移に依存したモデルとなり、他の年次の点検結果の整合性が低くなる. また、この傾向が特にランクV、およびランクV0において強く見られる直接の要因は前述のとおり、点検結果において、ランクV1、およびランクV0の発生頻度が卓越しており、これらのランクにおいてばらつきが大きく認められるためである. だだし、このようにランクV1、ランクV1、 すいのまでは以下のように考察される.

表 2.1 に示すような健全度評価区分に基づいて点検が実施される場合には、点検員の個人的な判断基準の違い、すなわちバイアスの影響が大きくなることが一般に指摘される課題である.特に、表 2.1 に示す健全度評価区分はアンカーの状況説明が抽象的であり、1 ランク程度の判定の相違は有意な差ではないと考えられる.その結果、表面的に性能低下が認められない場合であっても、供用期間が長い場合にはランク V やランク V と判定される可能性が高いと推察される.さらに、点検員が性能低下は認められるが、その程度について確信されない場合には、保守的にランク V と判定する可能性が高いと推察される.表 2.2 に示す 3 ランクによる健全度評価区分はこのような点検員によるバイアスを小さくするための一手段であると捉えることもできる.

また、ランクⅢ以下で整合性が高くなった要因についても、単純にどの路線においてもランクⅢ以下に判定されたアンカーが比較的少ないためであると考えられる.現時点ではランクⅢ以下に判定されるアンカーは比較的少ないが、今後は劣化が顕著となるランクⅢ以下のアンカーの発生頻度は高くなっていくと推察される.本研究で示したマルコフ過程を用いたモデル化手法においては、2.3 の②の仮定条件に示すように、耐用年数を通じて定常な性能低下過程を仮定しているため、例えば D 路線や E 路線のように点検結果においてランク I と判定されたアンカーが一つもない場合、この点検結果に基づいた性能低下モデルにおいては、ほぼ永久にランク I が出現しないという結果が生じうる.現実的にはこのような

ことは考えられないため、アンカーの状態変化(例えば、打設直後の変動が顕著で、その後はほとんど変動しないといった状態変化)が時間的に変動する場合には本手法による解析結果に基づく判断には検討の余地がある. このため、今後点検データを蓄積することで、その精度向上を図る必要がある.

次に、図 3.6 に示す 2007、2008 年の点検結果と 2000 年の点検結果に基づいたマルコフ劣化モデルによる 2007、2008 年時点のシミュレーションの解析結果の比較に対して具体的な考察を加える. 前述のとおり、図 3.6 において、マルコフ過程に基づいた解析結果は概ね整合性がとれているが、内挿の範囲内における解析結果同様、ランク V、ランク IVにばらつきのある結果となっている. また、調査結果におけるランク V のアンカーの本数は解析結果におけるランク V とランク IV の合計本数に近い値となっており、ほとんどランク IV に該当するものがない. このような相違が生じた要因は以下のように推察される.

前述のとおり、図 3.6 における点検結果は 3 ランクの評価区分を 6 ランクに再分配して得られたものである.その再分配方法においては、3 ランクの評価区分においてランク OK に判定されていたものをすべてランク Vに再分配している.しかし、2000 年に実施された点検においては、前述のとおり、ランク V やランク IV の判定の誤差は有意なものではないと判断され、ランク IV の判定が多くなされた結果、上記のような相違が生じたものと推察される.

さらに、今後の点検においても 3 ランクの健全度評価区分に基づいて判定されることが予想されるため、この再分配方法の整合性を高めていく必要がある.例えば、ランク V とランク IV の判断が困難であり、これらのランクは具体的な補修の対象とはならないことを考慮し、これらのランクをまとめて、5 ランクからなる評価区分で評価するような手法も考えられる.また、本事例では、3 ランクの健全度評価区分に基づいて判定されたアンカーは旧タイプのみである.今後は新タイプアンカーにおいても、3 ランクの健全度評価区分に基づいて判定されることが予測されるため、新タイプアンカーにおける再分配方法を確立することも今後重要な課題となる.

3.6.2 LCC 算定結果に対する考察

図 3.8d, e, h に示す C 路線の新旧両タイプと E 路線新タイプにおいては, ランク I まで性能低下したアンカーのみ打ち替える事後補修的なプラン 1 のほうが

最適となる. これに対して、上記以外のすべての路線においては、ランク I まで性能低下したアンカーを打ち替えることに加えて、ランク II まで性能低下したアンカーの延命化を図る予防保全的なプラン 2 のほうが最適となる. さらに、ほぼすべての路線において、点検実施間隔を長く設定した戦略の LCC が小さくなっており、図 3.8c に示す B 路線新タイプにおいてのみ、点検実施間隔を短く設定した戦略の LCC が小さくなっている. このように、対象路線毎に最適となる維持補修計画が異なる理由は以下のように要約される.

式 3.2, 3.3 に示すように,アンカーの打ち替え費用が,アンカーの延命化費用 に対して55倍となっているため,点検実施間隔中に健全度ランクが Iまで低下す る ア ン カ ー の 発 生 頻 度 が LCC に お い て は 支 配 的 要 因 と な る . し た が っ て , プ ラ ン 2 を適用することの利点は、図 3.7 に示すように補修を実施した後は、アンカー はランクⅡで維持されるため、ランクⅠまで性能低下するアンカー本数が低減さ れることである.このことから、С路線の新旧両タイプとЕ路線新タイプにおい ては, ランクⅡからランクⅠへの推移が遅く, ランクⅡでの維持効果が卓越する ため,プラン1ほうがプラン2より最適な結果となっている.さらに,ランクⅢ からランクIへの推移が遅い路線では、補修費用より点検費用が支配的となるた め、点検実施間隔を長く設定することによるLCC縮減効果が大きくなる.一方、 ランクⅢからランクⅠへの推移が速い路線では LCC は大きくなり,特にランクⅡ からランクIへの推移が比較的速い路線では、プラン2のほうがプラン1より最 適な結果となっている. また, 図 3.8c に示す B 路線新タイプのようにランクⅢか らランク I への推移が極めて早い場合は、プラン 2 を選択することによる LCC 縮 減効果が大きい.さらに,この場合は点検費用より補修費用が支配的となるため, 点検実施間隔を短く設定し、こまめに点検、補修を実施する戦略の方がLCCの縮 減効果が大きくなっている.

また、本研究においては、図 3.3 より旧タイプアンカーのほうが評価の低いものが多いことを理由に新旧 2 タイプを区別して評価を行ったが、B 路線新タイプのように、新タイプでありながらその性能低下速度が大きい路線もあるため、一概に新タイプは劣化しにくいと考えることは危険であるといえる.

以上のように、本研究で提案する、アンカーの性能低下特性、および補強・補 修戦略を考慮したモデル化手法を適用することで、アンカーにおける最適維持補 修計画を定量的に選択することが可能となる.

第4章 道路床版への適用

本章では、第2章で説明したモデル化手法を、実際の床版に適用し、考察を述べる.

4.1 点検結果

本事例で対象とする区間は図 4.1 に示すように高速自動車国道における 2 つの連続高架橋において、インターチェンジ(以下 IC とする)を境に 2 区間に分け、上り下りを区別した合計 4 区間であり、表 4.1 に各区間の床版の点検結果を示す。同表中、供用 37 年の点検結果のみ表 2.3 の赤字部分が追加された判定基準によって判定されたものである。

4.2 推移確率行列の同定

本節では、第2章で説明した性能低下のモデル化手法に前節で示した点検結果を適用して各区間の各点検間における推移行列を同定し、その同定結果を表4.2a~dに示す.ここで、将来予測に用いる各区間の最適推移行列は最終点検間、つまり供用28年から供用34年の期間の推移行列となる.

4.3 点検結果と解析結果の比較

本節では、2.4.2 において示した床版における性能低下の将来予測手法に従い、供用開始時点から供用 24 年までの状態変化を表す推移行列を用いて供用 28 年時点のシミュレーションの解析を行い、供用 24 年から供用 28 年までの状態変化を表す推移行列を用いて供用 37 年時点のシミュレーションの解析を行う.この算定結果として、推移行列の同定に利用した表 4.1 の点検結果とこれらの解析結果との比較を図 4.2a~d に示す. つまり、アンカーと同様に、実際の点検結果と点検結果に基づいて同定された推移行列による解析結果を比較することで、本モデル化手法の予測精度を検証し、その妥当性を評価する. ただし、本事例では、同一地点の床版で複数回実施した点検結果に基づいてモデル化を行うが、補強工事等の

影響で点検年毎に床版数が異なるため、各評価区分の枚数ではなく、各評価区分の相対頻度を用いて評価を行っている.

4.4 補修戦略の設定

本事例では、床版の補修戦略として図 4.3 に示すような、以下の 4 つの補修プランを設定する.

- 1) プラン 1: 健全度ランクが A まで低下した床版が全体の 30%以上になった場合に全面取替えを行う。
- 2) プラン 2: 健全度ランクが A まで低下した床版が全体の 20%以上になった場合に全面取替えを行う。
- 3) プラン 3: 健全度ランクが A まで低下した床版が全体の 30%以上になった場合に全面取替えを行い,そうでなくとも健全度ランクが B まで低下した床版が全体の 50%以上になった場合には全面防水を施すことで延命化する.
- 4) プラン 4: 健全度ランクが A まで低下した床版が全体の 20%以上になった場合に全面取替えを行い,そうでなくとも健全度ランクが B まで低下した床版が全体の 40%以上になった場合に全面防水を施すことで延命化する.

ただし、取替え後の床版の性能低下特性は当初と同様と仮定し、全面防水で延命化される床版はランク B のみであり、以後ランク B を維持すると仮定する. つまり、プラン 1,2 は事後補修を目的とした補修プラン、プラン 3,4 はそれぞれプラン 1,2 に対応した予防保全を目的とした補修プランである. また、プラン 1,3 とプラン 2,4 の間にターゲットレベルの差を設定し感度分析を行う. さらに、床版の場合は補修時に通行規制を行う必要があるため、床版を一枚ずつ補修することは非現実的であり、性能低下がある程度進んだ段階で全面補修を行うプランを設定している. 全面取替え、および全面防水に対する補修行列 R は次式で表される.

$$R_{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad R_{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(4.1)$$

ここに、 R_A は全面張替えに対する補修行列を、 R_B は全面防水に対する補修行列を表す.また、本事例において点検実施間隔は、5年、および 10年の 2 種類を想定し、補修プランを合わせて合計 8 種類の補修戦略に関して議論する.

4.5 LCC の 算 定

本節では、本事例の LCC 算定で必要となる費用を設定し、その費用に基づいて LCC を算定する. 具体的な費用一覧を表 4.3 に示す. 同表に示す点検費用、および補修費用は NEXCO 西日本によって実施された点検、および補修に要した費用に基づき、利用者損失額は国土交通省道路局が設定する走行経費原単位、時間価値原単位、交通事故損失額 10)、本事例の各区間の交通データ、および各補修方法の通行規制方法とその規制日数に基づいて算定したものである. また、前節の補修戦略と上記の各種費用に基づいた LCC 算定結果を図 4.4a~d に示す. ここに、LCC 算定期間において LCC が最小となる補修戦略が各区間の最適維持補修計画であり、最適維持補修計画において補修費用が早く生じる区間ほど補修優先順位が高いことを表す.また、本事例の LCC 算定期間は最終点検時以降 60 年とする.

4.6 考察

本節では、4.3、4.4、4.5 における算定結果より、解析結果に対する考察、および LCC 算定結果に対する考察を行い、本章のまとめとする.

4.6.1 解析結果に対する考察

図 4.2 に示すように、供用 28 年の点検結果と供用開始時から供用 24 年までの状態変化を表す推移行列による供用 28 年時点のシミュレーションの解析結果を比較した場合、すべての区間で、点検結果ではランク D、ランク C、およびランク Bに性能が低下した床版が多数確認されている.これに対して、解析結果では、ほぼランク E で維持され、ランク D 以下への状態推移が確認されていない. すなわち、わずか 4 年の間に性能低下が急速に進行したことがわかる. このような点検結果とこの点検結果に基づいたマルコフ過程による解析結果に相違が生じた要因については以下のように推察される.

まず、一つの要因として、アンカー同様に点検員の判断におけるバイアスが考えられる.供用 24 年時の点検の段階では、表 2.3 に示す健全度評価区分を用いた点検方法は導入段階にあり、点検員の判定能力が未成熟だったものと考えられる. 同表中、黒字の部分(供用 24 年時、および供用 28 年時の判定基準)に示すよう

に,この判定基準では遊離石灰のみに基づいて判断されている.実際の床版(本研 究においては RC 床版)における主な劣化メカニズムとしては、過積載車両の繰返 し走行による疲労劣化にともないひび割れが発生し、そのひび割れに雨水が浸入 することで、鉄筋の腐食や遊離石灰が生じ、さらなる疲労劣化が進展していくこ とが一般に知られている 11). このように、遊離石灰が発生する前段階として、輪 荷重の繰返し走行によって生じるひび割れが存在する.表 2.3 の要領改訂前の判 定基準においてはこのひび割れを評価していないため、あたかも供用開始から二 十 数 年 も の 間 , ほ と ん ど 性 能 低 下 が み ら れ な い 点 検 結 果 が 得 ら れ た が , 実 際 に は , 性能低下が進行していたものと推察される. つまり,表 2.3 の黒字部分の判定基 準においてはランク E が占める性能領域が大きいため, ランク E からランク D へ なかなか推移せず、一方ランクD,C,Bはランク間の性能の差が小さいため、い ったんランクDへ推移すると、ランクC、ランクBへの推移が比較的速くなると 考えられる.また、上述の床版の劣化メカニズムで示すように、床版の性能低下 速度は、特に初期段階では、過積載車両の繰返し走行、すなわち大型車累積交通 量に大きく依存すると考えられる. 図 4.5 に示すように,本事例で対象とする区 間の交通量は供用開始時点では少なく,供用20年位まで増加し,それ以降はほぼ 停滞している. このため, 供用開始時点から供用 24年までの間の平均交通量は, それ以降の平均交通量に比べて小さく、その期間の大型車累積交通量も性能低下 を大きく引き起こすほどのものではなかったと考えられる.

次に、供用 37 年の点検結果と供用 24 年から供用 28 年までの状態変化を表す推移行列による供用 37 年時点のシミュレーションの解析結果を比較した場合では、すべての区間において、点検結果では解析結果に比べてランク D の相対頻度が高くなっており、解析結果ではランク D からランク B までの推移が速く、ランク B の相対頻度が高くなっている。すなわち、実際の点検結果と比較して危険側の推定結果となっている。このように点検結果と解析結果において上記の相違が生じた要因は以下のように考察される。

前述のとおり、要領改定前の判定基準ではランク E の性能領域が大きく、ランク D, ランク C, およびランク B 間の性能の差が小さいことにより、供用 24 年から供用 28 年にかけて急激に性能低下が進行したと判断され、この期間の推移を表す推移行列を用いた供用 37 年解析結果では供用 28 年でランク D, およびランク C と判定されたものの多くがランク B に推移したと考えられる. 一方、供用 37

年の点検結果では、表 2.3 の赤字部分のひび割れも含めた判定基準を用いており、ランク E の発生頻度は小さくなり、ひび割れの項目が追加されたランク D、ランク C の相対頻度が大きくなったため、上記のような相違が生じたと推察される。また、本事例が対象とする区間では、縦桁増設、一部道路の拡幅、および床版下面のコンクリート剝落対策が施されている箇所があり、完全に同一の床版からなる点検結果ではない。したがって、このことによる誤差も当然ながら図 4.2 に示す結果に含まれている.

以上より、構造物の性能レベルを規定する際に力学的な数値の連続量ではなく、数ランクに区分された健全度評価区分を用いる場合には、マルコフ過程による性能低下の予測精度を向上させるために、各健全度間に適当な性能の差異を設けること、および健全度評価区分のランク数や判定基準を統一した点検結果に基づくことが極めて重要といえる。また、過去の補修履歴等を考慮したモデルを構築することが望ましいが、本事例においては、過去の補修履歴を考慮するには、検データ数が少ないために、これを考慮せず相対頻度を用いて検討している。

4.6.2 LCC 算定結果に対する考察

図 4.4a,b に示す A 区間上り、および下りでは、事後補修的な補修プラン 1,2 とそれに対応する予防保全的な補修プラン 3,4 に差が見られなかった.これは、A 区間上下線ともにランク B からランク A への推移が速く、ランク B に設けたターゲットレベルに到達することなくランク A へと推移してしまったためである.一般には、3.6.2 で示したように、性能低下速度が大きい区間ほど予防保全的な補修プランによる LCC 縮減効果は大きくなると思われるが、前述のように床版では床版一枚ずつ補修を行わず、全体的にある程度性能低下が進行した段階で全面補修を行うため、このような結果になったものと推察される.

一方,図 4.4c に示す B 区間上りでは、プラン 4 において予防保全的なプランの有効性が確認でき、その LCC 縮減効果も非常に大きくなっている.この理由は、全面取替えの場合には全面防水に比べて補修費用が約 30 倍と大きく、それに加えて補修にともなう利用者損失額もはるかに大きいためである.また、図 4.4d に示す B 区間下りでは、性能低下速度が極めて小さいため、プラン 4 において全面防水による補修が行われたのみで、ほぼ点検費用による LCC 算定結果となった.

A区間と B 区間の補修を行うタイミングの比較により、 A 区間のほうが性能低

下が速いといえる. 隣接する区間にも関わらずこのような相違が生じた一つの要因として大型車累積交通量の影響が考えられる. 図 4.6, 4.7に示すように, 供用28年から供用37年にかけて, A 区間と B 区間における大型車日交通量に約2000台/日の差があり, 累積交通量の差は年間約75万台となる. つまり, この差によって性能低下速度に差が生じ, 上記の相違が生じたと考えられる. また, A 区間と B 区間で LCC が大きく異なっているが, この要因としては, A 区間のほうが性能低下速度が大きく, 早期に補修が実施されるため社会的割引率による影響が小さいことと,表4.3に示すように A 区間のほうが補修にともなう利用者損失額が大きいことが考えられる. A 区間の利用者損失額が大きいのは, 通行規制の実施単位が IC 毎であり, A 区間のほうが B 区間より IC 間が長いためである.

そして、全ての区間に共通した特徴として、同じプランにおいては点検間隔が5年のプランのほうが10年のプランに比べてLCCが大きくなっていることが挙げられる. 直接的な原因は社会的割引率による影響と点検費用の蓄積であるが、その根本には図4.8に示すような問題点が存在する. つまり、補修を行うタイミングとしてのターゲットレベルは設定しているが、許容できる最低限の性能レベル(以下、許容性能レベルと称す)を設定していないためである. 今回の条件ではターゲットレベルをやや下回ったために補修に至った場合と、ターゲットレベルをやや下回ったために補修に至った場合と、クーゲットレベルを大幅に下回り補修に至った場合を区別できないために、次回点検時に大きくターゲットレベルを超えることも許容され、社会的割引率による現在価値化によってより点検間隔を広げた場合に費用合計額は小さく算定されたと考えられる.

また、ターゲットレベルによる感度分析においては、ほとんどの区間で、ターゲットレベルを低め(危険側)に設定したプラン 1,3 のほうが、補修が行われる時期が遅いため、社会的割引率の影響が大きく、LCCが小さくなっている. しかしながら、B区間上りではプラン 4 でもっとも LCCが小さくなっている. これはランク B に対する延命化補修のターゲットレベルを高めに設定したことで、早い時期に予防保全効果が現れたためである. この結果より、予防保全的なプランのターゲットレベルを高め(安全側)に設定することで、性能低下速度が大きい路線においても LCC を低く抑えることが可能になると推察される.

以上のように、補修プランの設定において課題はあるが、本研究で提案する、 床版の性能低下特性、および補強・補修戦略を考慮したモデル化手法を適用する ことで、床版における最適維持補修計画を定量的に選択することが可能である.

第5章 結論

本章では本研究のまとめとして,本研究で対象としたアンカーと床版における 性能低下の特性について考察し,本研究の成果と今後の課題について説明する.

5.1 構造物の性能低下特性に関する考察

本研究では、図 5.1 に示すようにアンカーの場合は耐用年数を通じて定常過程を仮定し、床版においては点検間毎に定常過程を仮定することで性能低下の予測を行った.このような仮定を設けた理由としては、大前提として点検データベースの不備があることは説明した通りであるが、アンカーにおいては、点検結果は同一地点ではなく路線毎にまとめたものであり、計算過程上必要となる仮定条件である.一方、床版においては点検間毎の性能低下速度が極端に変化し、耐用年数を通じて定常過程としてモデル化することが困難であったために設定した仮定条件である.

アンカーにおいては、上記の仮定、および第二章で説明したその他の仮定条件の下で同定された推移行列を用いた性能低下予測モデルは内挿だけでなく外挿の範囲においてもある程度の予測精度が確認され、マクロ的な維持補修を検討する上で本研究で提案する性能低下のモデル化手法が有効であると判断できる.これは、本手法では同一路線内にある複数の斜面のアンカーの性能低下特性を平均化していることにより、全体の平均的な挙動を、不確実性を含めて推定できているためと推察される.一方、床版においては、各点検問における性能低下特性が大きく異なる中で、最終点検問の性能低下特性を用いて将来予測を行うため、点検結果に対する本モデル化手法の予測精度はアンカーと比べると高くはない.

したがって、本研究における床版のように性能低下特性が時間とともに大きく変化するような場合は、多くの仮定条件に基づいた本手法において、ある程度の精度を持つ予測を行うことは困難である. 4.6.1 において説明したように、健全度評価区分における問題点を解消し、点検データを蓄積することで本モデルの予測精度は向上するものと推察される. しかし、性能低下過程における不確実性が大きい場合には既往の研究 4)のようにハザードモデルを用いて推移確率を推定する手法や、交通荷重、降雨等の暴露条件を考慮した手法が今後必要になるといえる.

5.2 本研究の成果

本研究においては、議論を簡素化する仮定条件を設けたマルコフ過程を用いて、マクロ的な観点からの路線、あるいは区間毎のアンカー、および床版の戦略的な補強・補修に関する一検討手法を提案するとともに、その有用性について示した. 本研究の成果は、以下のように要約される.

- 1)本研究で提案した仮定条件を設けたマルコフ過程を用いた性能低下モデルは、アンカーにおいては内挿、および外挿の範囲である程度の予測精度があり、マクロ的な維持補修を検討する上で実用性があることが確認された。また、床版においては、本事例の条件の下では、実用性のある予測精度は確認できなかった。
- 2)アンカー、床版ともに本研究の性能低下モデルに基づいて、路線毎、あるいは区間毎の性能低下特性を反映した点検・維持補修を実施することで、補修 優先順位付けが可能である。
- 3)本研究で提案する補強・補修戦略を考慮したモデル化手法を適用することで、アンカー、床版ともに、路線あるいは区間毎に事後補修型あるいは予防保全型の分類が可能になり、最適維持補修計画を定量的に選択することが可能である.
- 4)床版の LCC 算定において、点検費用、補修費用のみならず補修にともなう社会経済的損失である利用者損失についても定量的な評価が可能である.

5.3 今後の課題

本節では、これまでに説明した本研究における今後の課題について説明する. 本研究で提案する手法は点検データベースを整備することで、マルコフ過程に 基づく解析結果の予測精度が向上することは言うまでもない.

アンカーにおいては、マクロ的観点からの維持補修の検討が可能な水準の予測精度が確認されるので、今後は本手法を発展させ、同一路線内のアンカーを例えば地質条件別、もしくは IC 間毎の暴露条件別にデータを分離、評価し、より物理的な意味を持たせることで本手法の有効性をさらに高めていく必要がある.また、マクロ的な検討からミクロ的な検討に移り、斜面の安定性を考慮した手法を検討

していく必要がある.この際、斜面崩壊により発生する社会経済的損失を考慮することで、本研究で得られた結論が変化することも考えられる.また、アンカー本体は斜面深くに打ち込まれているため、アンカーキャップの目視による評価だけでアンカーの状態を正確に判断することは難しい.したがって、力学試験による詳細点検と本研究で用いた目視点検を適切に組み合わせ補完しあうことで、よりアンカーの実状に即した性能低下予測、LCCの算定が可能となる.

床版においては、現状では本研究で提案する手法による予測精度に多少問題があり、今後精度を向上させる必要がある.具体的には、点検方式や点検データベースの整備に基づく課題とモデル化手法本体の不備に基づく課題が考えられるが、床版では累積交通量との相関が大きく、アンカーとは異なり時間とともに性能低下速度が大きく変化することを鑑みると、後者の課題を検討することも重要であると推察される.したがって、今後の課題として、本研究で設定した仮定条件を見直し、既往の研究⁴のようにハザードモデルを用いて推移確率を推定し、不確実性を考慮するような手法の適用を検討する必要がある.しかし、前述した通り、現状の点検データ数はそれほど多くはない.したがって、この手法である程度の精度を確保するためには、床版の種類や交通条件等の環境条件が近い区間をひとまとめにして点検データ数を増やすような工夫が必要になる.また、交通荷重や降雨等の暴露条件を考慮するような、力学的要素を取り入れたモデル化手法の適用も視野に入れて、床版の時々刻々と変化する性能低下過程をモデル化する必要性があると推察される.

次に、高速道路床版においては全面補修を行うことで莫大な利用者損失が生じるため、維持補修を検討する際は、いかに長期間の通行規制をともなう全面取替え工を回避できる維持補修計画を立案できるかが重要となる. したがって、今後は本研究では考慮できなかった、初期劣化を対象とする補修プラン(ランク C やランク D を対象とした補修プラン)や、床版下面から実施可能な床版下面増厚やひび割れ注入等の部分補修プランを検討していく必要がある. また、補修を先延ばしにすることによって生じる第三者被害やその代案としての許容性能レベルを設定したプランを検討する必要もある.

最後に、本研究においては、アンカー、床版ともに延命化された構造物は以後性能が維持されると仮定したが、今後補修される構造物が増加していくことを鑑みると、補修後の性能低下についても検討することが重要となる.

参考文献

- 1) 大津宏康, アセットマネジメント概論, サマースクール 2008「建設マネジメントを考える」, pp.1-8, 2008.
- 2) T.Suwanishwong, H.Ohtsu and S.Kamide: Strategic maintenance management of deterioreted ground anchor using Markov Chain model, Proc. of 12th Japan Symposium on Rock Mechanics & 29th Western Japan Symposium on Rock Engineering,pp.483-488,2008.
- 3) 大津宏康, 松山裕幸, N. 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.
- 4) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司:橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801/I-73, pp.69-82, 2005.
- 5) 貝戸清之,保田敬一,小林潔司,大和田慶:平均費用法に基づいた橋梁部 材の最適補修戦略,土木学会論文集 No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 6) 日本道路公団:アンカーエの点検および健全度調査マニュアル(案), 2002.
- 7) 日本道路公団:道路構造物点検要領(案), 2003.
- 8) 大津宏康,赤木舞,松山裕幸,大谷芳輝:吹付けコンクリート斜面の維持補修費評価に関する研究,建設マネジメント研究論文集,土木学会,Vol.13,pp.301-314,2006.
- 9) 土質工学会:アンカー設計・施工基準,1988.
- 10) 道路事業の評価手法に関する検討委員会編:費用便益分析マニュアル(案), 2008.
- 11) 松井繁之:「道路橋床版 設計・施工と維持管理」, 森北出版, 2007.

謝辞

最後になりましたが、本論文を締めくくるにあたり、本研究にご協力いただい た方々、お世話になった方々への感謝の意を表したいと思います.

まず、京都大学大学院工学研究科・大津宏康教授には、お忙しい中、自分で考え自分で組み立てていく研究に慣れておらずとまどいがちな筆者に対して、常に的確なご助言を頂き、時には親身になって相談に乗っていただきました。本当に心からお礼申し上げます。

京都大学大学院地球環境学堂・勝見武准教授には、本研究の副査として、お忙しい中、筆者の論文を読んでいただき、細部にわたって的確な助言をしてくださいましたことを深く感謝致します.

京都大学大学院工学研究科・塩谷智基准教授には、研究面で様々なご助言を頂き、違った視点から問題を捉えることの重要性について学ぶことができました.また、生活面におきましても親身になっていただきましたことを心からお礼申し上げます.

京都大学大学院工学研究科・稲積真哉助教には、研究面でも様々なご助言を頂き、生活面におきましても不自由なく研究が行える環境を作っていただきましたことに感謝致します.

また,西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社の東野忠雄氏にはお忙しい中貴重な資料を数多く提供して頂くとともに,度重なる質問にも親切にお答えいただいたことを心から感謝いたします.

北村瑞絵秘書には、研究生活のあらゆる面で常にサポートをして頂いたことを 心からお礼申し上げます.また、大津研究室の諸先輩には、研究のみならず生活 面においても親切にして頂き、学生生活を有意義なものにすることができ、本研 究を無事遂行することができました.大変感謝いたします.そして、4回生の方々 には、時に励まし合い、時に刺激しあいながら苦楽をともに過ごすことができた ことに大変感謝しております.

最後に、不自由なく勉学に励める環境を与えてくださり、自分をここまで育て てくれた両親に改めて感謝の意を表します.

表2.1 グラウンドアンカー健全度評価区分(旧)

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

表2.2 グラウンドアンカー 健全度判定基準(新)

評価区分	状 況	6ランクとの 対応
I	現状でまったく機能しない。もしくは、著しい機能低下が認められ、対策・補修を行ってもその機能の 復元が望めないもの	Ι·Π
П	機能低下は認められるが、対策・ 補修することによりその機能を復 元でき、かつ、保持することがで きる	ш · IV · V
OK	順調に機能している。現状のまま で良好な状態を維持できる	VI

表2.3 道路床版健全度評価区分

損傷度		床版の状況					
А	一般部	遊離石灰が2方向に発生しており、両方向ともその間隔が50cm以下で、かつ、遊離石灰が泥水、錆汁で変色している。またBでその進行が早いもの。ひび割れ・遊離石灰が著しく、亀甲状で閉塞した損傷部分状態。					
	継目部	施工継目地部において、遊離石灰が泥水、錆汁で変色している。					
В	一般部	遊離石灰が2方向に発生しており、両方向ともその間隔が50cm以下で、その色が白いもの。また、Cでその進行が早いもの。					
	継目部	施工継目地部において、遊離石灰が発生しており、その色が白いもの。					
С	遊離石灰が2方向に発生しており、いずれかの方向の間隔が50cm以上となっている。(亀甲状となっていない。またはその間隔が大きい。) <u>遊離石灰を伴わないひび割れが2方向に発生しており、両方ともその間隔が50cm以下となっている。</u> また、Dでその進行が早いもの。						
D	遊離石灰が1方向に発生している。 <u>遊離石灰を伴わないひび割れが2方向に発生している。</u>						
E	遊離石灰	及び <u>2方向のひび割れ</u> が認められない。					

表3.1 2000年点検結果一覧(1)

	アンカー タイプ	経過			Total				
	タイプ	年	VI	V	IV	III	II	I	Total
		4	773	64	0	0	0	0	837
	新	5	380	0	0	0	0	0	380
A路線		11	0	50	50	0	0	0	100
		12	0	394	0	0	0	0	394
	旧	14	0	382	137	1	4	0	524
		15	0	909	1247	93	10	6	2265
		Total	1153	1799	1434	94	14	6	4500

		経過			Total				
		年	VI	٧	IV	III	II	I	1 Otal
B路線	⊅ r	4	0	636	669	57	1	0	1363
	新	6	0	613	40	1	0	0	654
		Total	0	1249	709	58	1	0	2017

	アンカー	経過			評価	区分			- Total
	アンカー タイプ	年	VI	V	IV	III	II	I	
	±c	6	0	524	10	1	6	0	541
	新	8	0	35	15	0	0	0	50
 C路線		12	0	695	2	0	67	1	765
し日稼		13	0	0	34	2	0	0	36
	旧	14	0	6	48	0	0	0	54
		15	0	0	216	0	0	0	216
		21	0	69	1	1	0	0	71
		Total	0	1329	326	4	73	1	1733

表3.1 2000年点検結果一覧(2)

	アンカー	経過			評価	区分			Total
	アンカー タイプ	年	VI	V	IV	III	II	I	
		1	0	57	10	0	0	0	67
Dob se		4	0	140	43	0	0	0	183
D路線	新	5	0	105	255	0	0	0	360
		6	0	0	613	5	0	0	618
		7	0	0	93	0	0	0	93
		Total	0	302	1014	5	0	0	1321

	アンカー	経過			評価	区分			Total
	アンカー タイプ	年	VI	V	IV	III	II	I	
		6	0	0	64	69	7	0	140
	新	10	0	25	1249	21	2	0	1297
E路線		11	0	0	8	0	0	0	8
		12	0	11	36	4	1	0	52
	旧	16	0	0	206	0	2	0	208
		19	0	0	315	76	0	0	391
		Total	0	36	1878	170	12	0	2096

表3.2 2007,2008年点検結果一覧(3ランク)

	アンカー タイプ	経過		評価区分	}	Total
	タイプ	年	OK	II	I	Total
	Ш	20	123	11	13	147
A路線		21	206	24	16	246
		22	1356	90	53	1499
		23	161	6	7	174
		Total	1846	131	89	2066

表3.3a 推移確率行列同定結果 (A路線旧タイプ)

評価区分	VI	V	IV	Ш	П	I
VI	0.4297	0.5703	0	0	0	0
v	0	0.9526	0.0474	0	0	0
IV	0	0	0.9884	0.0116	0	0
ш	0	0	0	0.9496	0.0504	0
п	0	0	0	0	0.8720	0.1280
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3b 推移確率行列同定結果 (A路線新タイプ)

評価区分	VI	v	IV	Ш	П	I
VI VI	0.9798	0.0202	0	0	0	0
v	0	0.9587	0.0413	0	0	0
IV	0	0	0.9975	0.0025	0	0
ш	0	0	0	0.2567	0.7433	0
п	0	0	0	0	0.5200	0.4800
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3c 推移確率行列同定結果 (B路線新タイプ)

評価区分	VI	v	IV	Ш	П	I
VI	0.1306	0.8694	0	0	0	0
v	0	0.8642	0.1358	0	0	0
IV	0	0	0.9237	0.0763	0	0
ш	0	0	0	0.9506	0.0494	0
п	0	0	0	0	0.9565	0.0435
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3d 推移確率行列同定結果 (C路線旧タイプ)

評価区分	VI	V	IV	Ш	П	I
VI	0.5028	0.4972	0	0	0	0
v	0	0.9755	0.0245	0	0	0
IV	0	0	0.9645	0.0355	0	0
ш	0	0	0	0.0001	0.9999	0
п	0	0	0	0	0.9999	0.0001
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3e 推移確率行列同定結果 (C路線新タイプ)

評価区分	VI	v	IV	Ш	П	I
VI	0.1500	0.8500	0	0	0	0
v	0	0.9901	0.0099	0	0	0
IV	0	0	0.8642	0.1358	0	0
ш	0	0	0	0.0001	0.9999	0
п	0	0	0	0	0.9999	0.0001
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3f 推移確率行列同定結果 (D路線新タイプ)

評価区分	VI	v	IV	Ш	П	I
VI	0.0961	0.9039	0	0	0	0
v	0	0.8463	0.1537	0	0	0
IV	0	0	0.9942	0.0058	0	0
ш	0	0	0	0.9676	0.0324	0
п	0	0	0	0	0.7112	0.2888
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3g 推移確率行列同定結果 (E路線旧タイプ)

評価区分	VI	V	IV	Ш	П	I
VI	0.4766	0.5234	0	0	0	0
v	0	0.7357	0.2643	0	0	0
IV	0	0	0.9889	0.0111	0	0
ш	0	0	0	0.9889	0.0111	0
п	0	0	0	0	0.9916	0.0084
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.3h 推移確率行列同定結果 (E路線新タイプ)

評価区分	VI	V	IV	Ш	I	I
VI VI	0.2227	0.7773	0	0	0	0
v	0	0.7234	0.2766	0	0	0
IV	0	0	0.9840	0.0160	0	0
ш	0	0	0	0.9212	0.0788	0
п	0	0	0	0	0.9999	0.0001
I	0	0	0	0	0	1.0000

表3.4 6ランク評価区分における判定項目

アンカータイプ	評価	具体事例
	I	①コンクリートキャップが崩落している②コンクリートキャップが手で動く
	П	①コンクリートキャップが浮いている②錆がひどい、オイルが無い ③水もれ、遊離石灰、錆が有る
<mark>旧タイプ</mark> (二重防食前)	Ш	①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 ②鋼製キャップの錆、オイル漏れ著しい
	IV	①コンクリートキャップ表面の風化、劣化 ②鋼製キャップに錆発生、遊離石灰またはオイルが僅かに漏れている
	V	特に変状無し
	VI	該当なし
	I	アンカーが抜けている、破断している
	П	オイルキャップが動いている、内部より湧水がある
新タイプ (二重防食後)	Ш	①オイルキャップのオイル漏れ著しい ②オイルキャップが破損している、頭部がさびている
	IV	オイルキャップからオイルがわずかに漏れている、プレートがさびている
	V	オイルキャップの変色、塗装のはがれがある
	VI	特に変状無し

表3.5 3ランク評価区分における判定項目

アンカータイプ	評価	具体事例	6ランク評価区分 との対応
		①キャップの浮き(全体)	
	Ι	②キャップの角欠け(全体)	Ι • Π
		③アンカー破断	
旧タイプ		①キャップの浮き(部分的)	
		②キャップのひび割れ	
	П	③漏水	ш • г • v
新タイプ		④エフロレッセンス析出	
		⑤キャップの角欠け(部分的)	
		⑥鋼棒先端露出	
	OK	打撃調査結果からは、特に損傷の発 生が見られない箇所	VI

表3.6 2007,2008年調査結果一覧(6ランク)

	アンカー	経過	評価区分						Tatal
	アンカー タイプ	年	VI	٧	IV	Ш	II	I	Total
		20	0	123	6	9	7	2	147
A路線		21	0	206	1	23	14	2	246
	旧	22	0	1356	9	76	48	10	1499
		23	0	161	1	6	2	4	174
		Total	0	1846	17	114	71	18	2066

表4.1 道路床版点検結果一覧

	経過年	公 语左 L T L			評価区分					
	在迥牛	上上	E	D	C	В	A	total		
	24 年	上り	491	0	0	0	0	491		
A 57 88	2 4	下り	473	2	0	0	0	475		
A区間	28年	上り	639	106	17	1	0	763		
	20 4	下り	469	51	18	3	0	541		
	37 年	上り	372	324	59	7	5	767		
		下り	253	154	49	7	2	465		

	经记在	7		評価区分					
	経過年	上下	E	D	C	В	A	total	
	24 年	上り	711	0	0	0	4	715	
	24 -F	下り	710	8	0	0	0	718	
B区間	20/=	上り	491	182	36	10	0	719	
	28年	下り	665	63	42	13	0	783	
	37年	上り	231	298	69	40	3	641	
		下り	470	175	102	26	1	774	

表4.2a 推移確率行列同定結果 (A区間上り)

供用開始~供用24年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9999	0.0001	0	0	0
D	0	0.9999	0.0001	0	0
C	0	0	0.9999	0.0001	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

供用24年~供用28年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9566	0.0434	0	0	0
D	0	0.9002	0.0998	0	0
C	0	0	0.9213	0.0787	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9411	0.0589	0	0	0
D	0	0.9733	0.0267	0	0
C	0	0	0.9623	0.0377	0
В	0	0	0	0.8286	0.1714
A	0	0	0	0	1

表4.2b 推移確率行列同定結果 (A区間下り)

供用開始~供用24年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9998	0.0002	0	0	0
D	0	0.9999	0.0001	0	0
C	0	0	0.9987	0.0013	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

供用24年~供用28年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9659	0.0341	0	0	0
D	0	0.7891	0.2109	0	0
C	0	0	0.8091	0.1909	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9496	0.0504	0	0	0
D	0	0.9566	0.0434	0	0
C	0	0	0.9739	0.0261	0
В	0	0	0	0.9450	0.0550
A	0	0	0	0	1

表4.2c 推移確率行列同定結果 (B区間上り)

供用開始~供用24年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9998	0.0002	0	0	0
D	0	0.0001	0.9999	0	0
С	0	0	0.0001	0.9999	0
В	0	0	0	0.0001	0.9999
A	0	0	0	0	1

供用24年~供用28年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9103	0.0897	0	0	0
D	0	0.8599	0.1401	0	0
C	0	0	0.6770	0.3230	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9314	0.0686	0	0	0
D	0	0.9667	0.0333	0	0
C	0	0	0.9197	0.0803	0
В	0	0	0	0.9840	0.0160
A	0	0	0	0	1

表4.2d 推移確率行列同定結果 (B区間下り)

供用開始~供用24年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9995	0.0005	0	0	0
D	0	0.9999	0.0001	0	0
C	0	0	0.8092	0.1908	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

供用24年~供用28年

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9627	0.0373	0	0	0
D	0	0.6367	0.3633	0	0
C	0	0	0.7218	0.2782	0
В	0	0	0	0.9999	0.0001
A	0	0	0	0	1

評価区分	E	D	C	В	A
E	0.9634	0.0366	0	0	0
D	0	0.9328	0.0672	0	0
C	0	0	0.9753	0.0247	0
В	0	0	0	0.9937	0.0063
A	0	0	0	0	1

表4.3 道路床版におけるLCC費用

区間	点検費用(円)
A区間上り	9,137,340
A区間下り	9,137,340
B区間下り	10,637,460
B区間下り	10,637,460

区間	補修方法	補修費用(円)	利用者損失額(円)	Total (円)
A区間	床版取替工	2,136,039,135	2,728,267,728	4,864,306,864
上り	床版防水工	67,964,882	21,515,362	89,480,244
A区間	床版取替工	2,167,597,618	2,648,496,301	4,816,093,919
下り	床版防水工	68,969,015	19,567,025	88,536,040
B区間	床版取替工	2,493,495,417	1,159,134,170	3,652,629,587
上り	床版防水工	79,338,491	9,394,442	88,732,932
B区間	床版取替工	2,498,714,493	1,154,543,865	3,653,258,358
下り	床版防水工	79,504,552	8,811,331	88,315,883

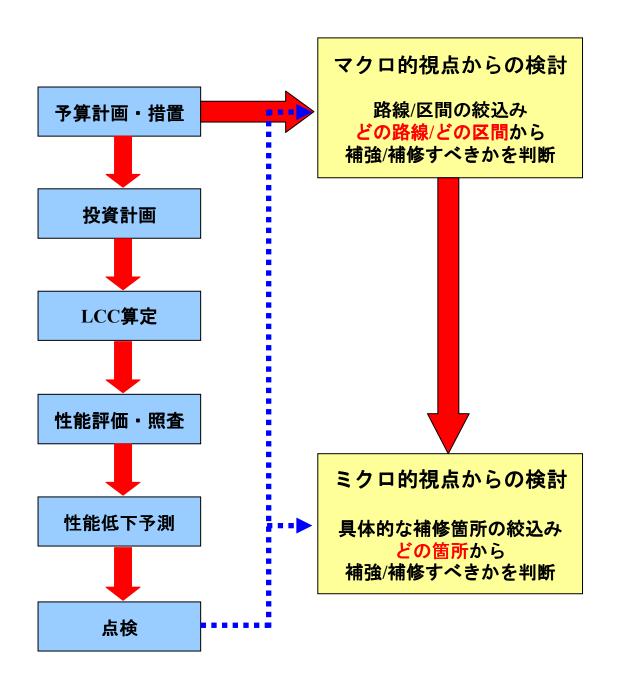


図1.1 予算執行者の視点からの維持補修のフロー

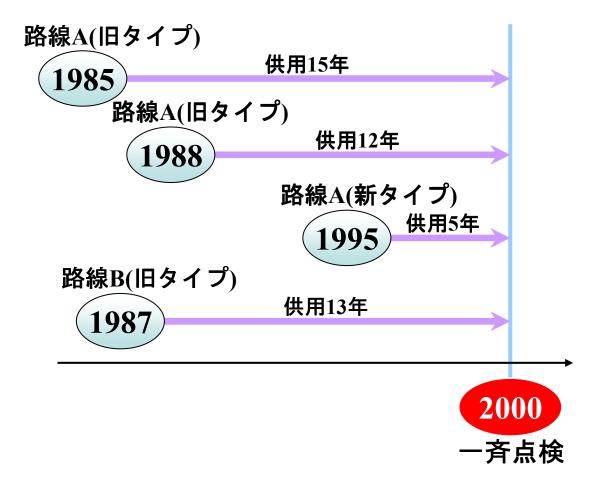


図2.1 グラウンドアンカー点検結果の仕様概念

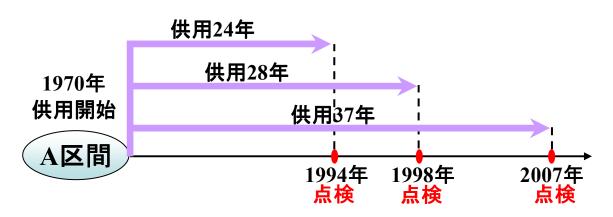


図2.2 道路床版点検結果の仕様概念

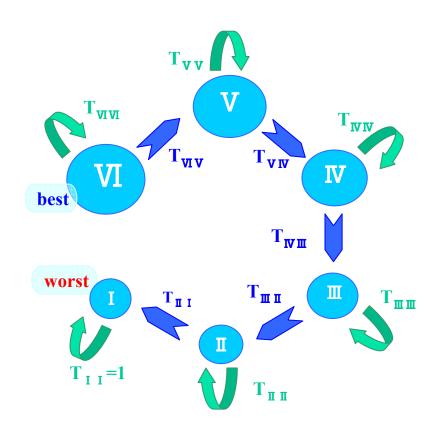


図2.3 グラウンドアンカーにおける推移確率行列の概念図

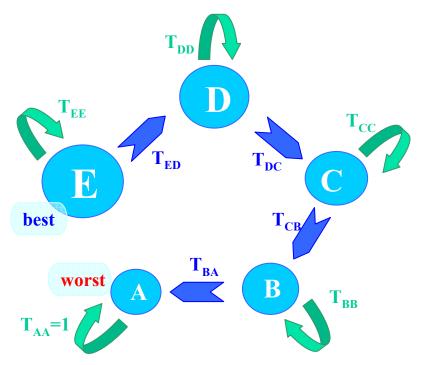


図2.4 道路床版における推移確率行列の概念図

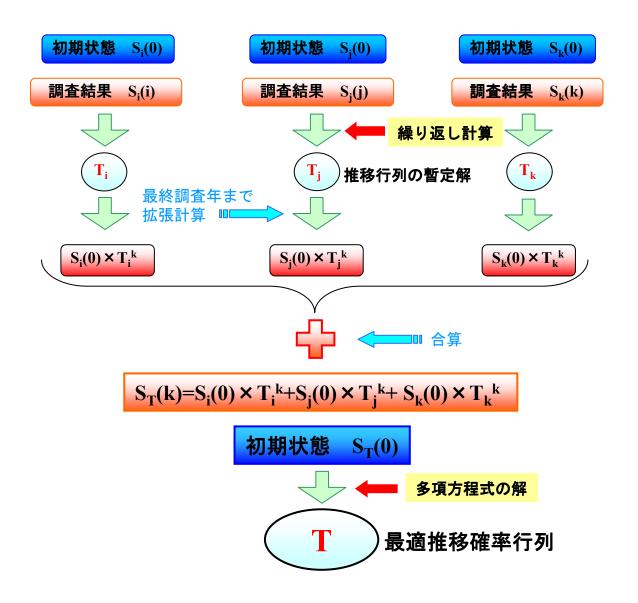


図2.5 グラウンドアンカーの最適推移確率行列同定手順

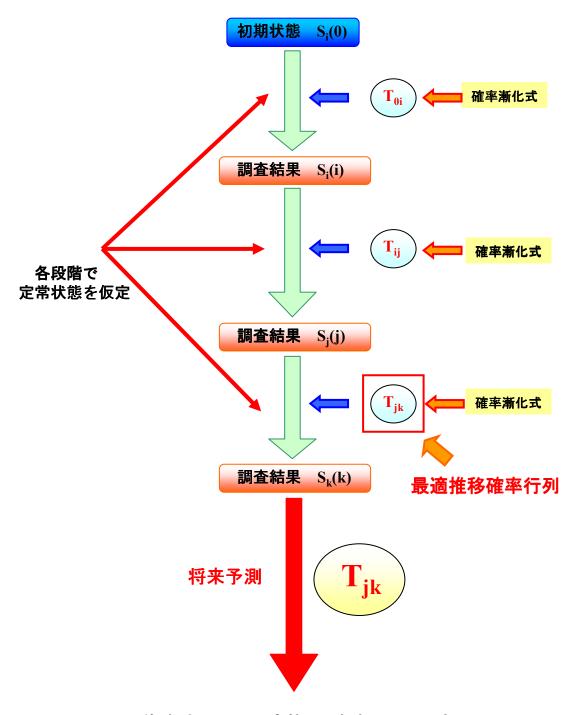


図2.6 道路床版の最適推移確率行列同定手順



図3.1 鋼棒タイプアンカー



図3.2 より線タイプアンカー

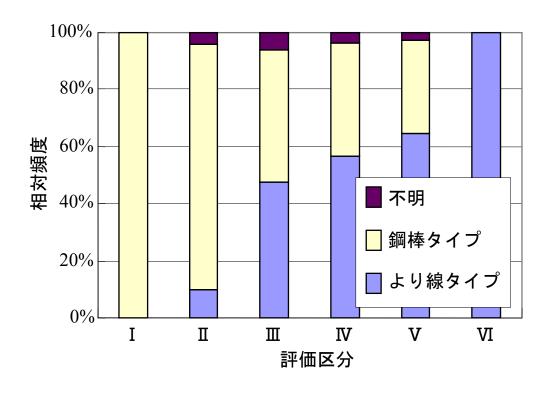


図3.3 アンカータイプ別評価構成比

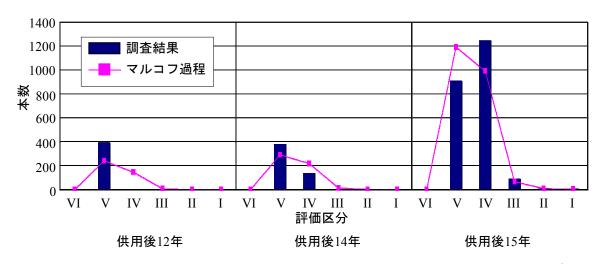


図3.4a 点検結果と解析結果の比較 (A路線旧タイプ)

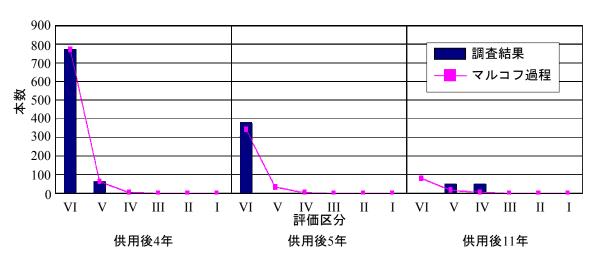


図3.4b 点検結果と解析結果の比較 (A路線新タイプ)

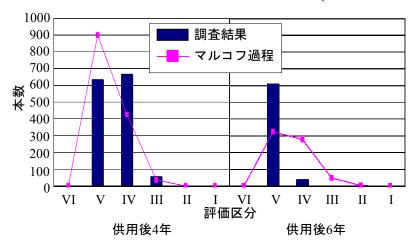


図3.4c 点検結果と解析結果の比較 (B路線新タイプ)

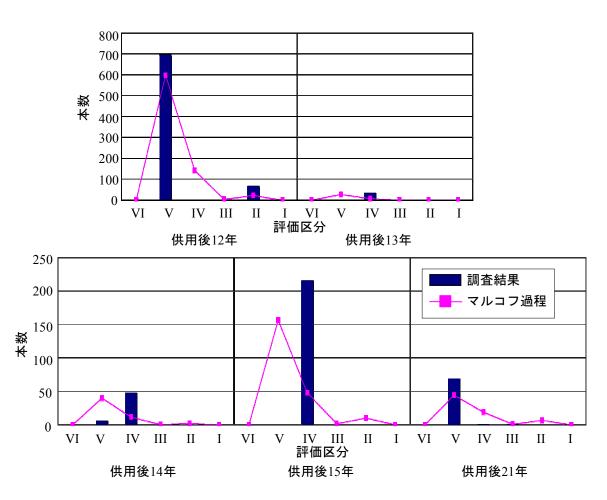


図3.4d 点検結果と解析結果の比較 (C路線旧タイプ)

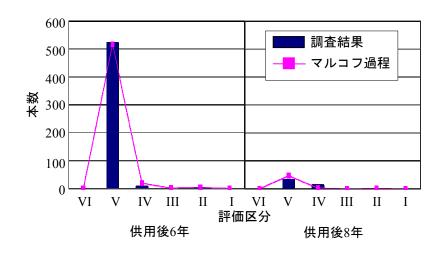


図3.4e 点検結果と解析結果の比較 (C路線新タイプ)

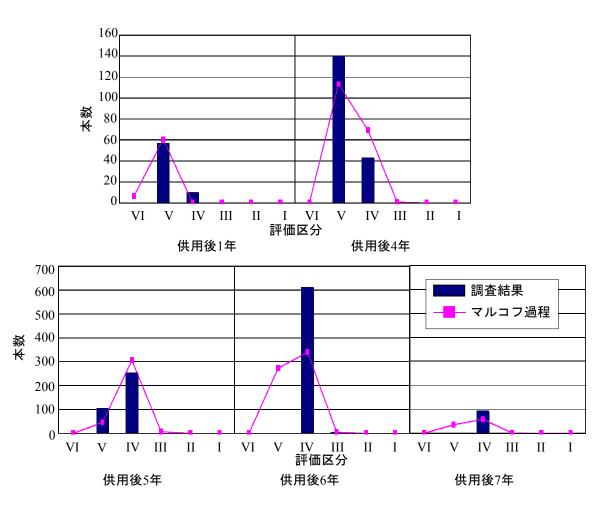


図3.4f 点検結果と解析結果の比較 (D路線新タイプ)

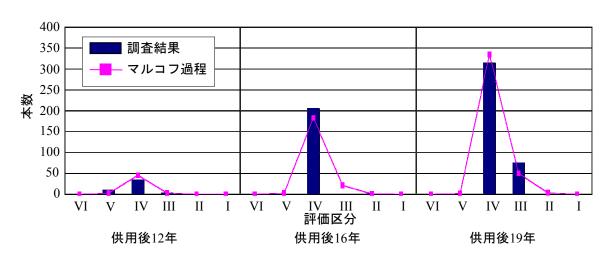


図3.4g 点検結果と解析結果の比較 (E路線旧タイプ)

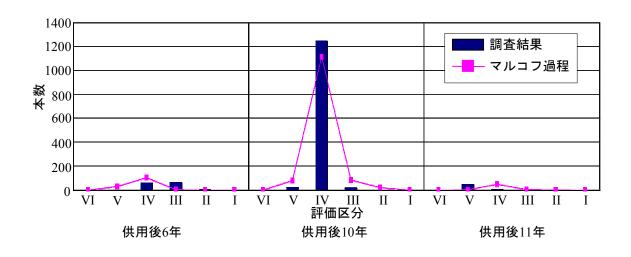


図3.4h 点検結果と解析結果の比較 (E路線新タイプ)

基本再分配法則			
調査項目(三区分)	六区分		
アンカー破断	I		************************************
キャップの浮き(全体)	П		特殊再分配法則 写真判断において 複数項目に当てはまる場合 それらの項目の中で 一番評価の低い区分から さらに評価を一つ下げる 例 Ⅲ+Ⅲ→Ⅱ Ⅱ+Ⅲ→Ⅰ Ⅱ+Ⅲ→Ⅰ Ⅳ+Ⅲ+Ⅲ→Ⅱ
キャップ角欠け(全体)	П		
キャップの浮き(部分的)	Ш		
キャップ角欠け(部分的)	Ш		
漏水	Ш		
エフロレッセンス析出	ш	•	
キャップひび割れ	Ш		
鋼棒先端露出	W		
健全	V		
該当なし	W		

図3.5 3ランクから6ランクへの再分配方法

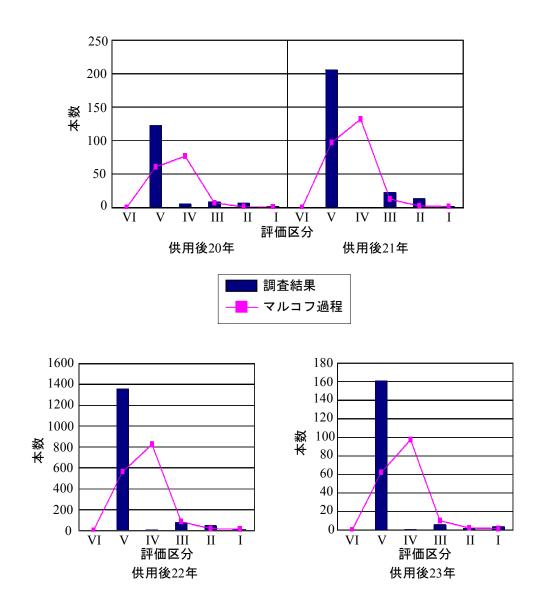


図3.6 2007,2008年調査結果と解析結果の比較 (A路線旧タイプ)

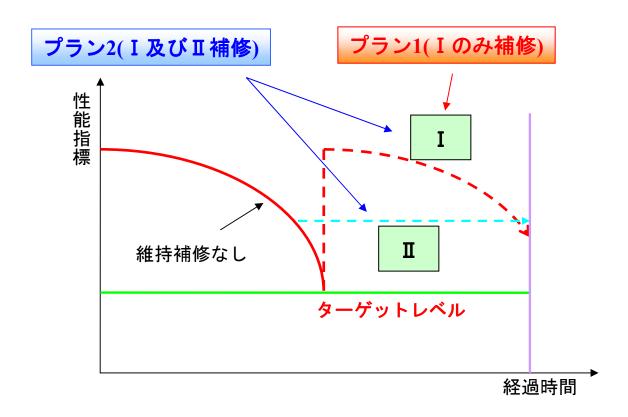


図3.7 グラウンドアンカーにおける維持補修戦略の概要

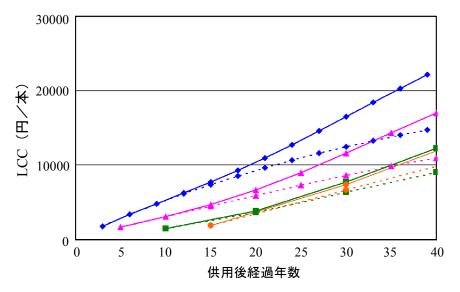


図3.8a LCC算定結果 (A路線旧タイプ)



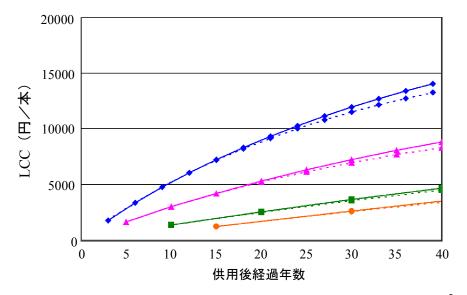


図3.8b LCC算定結果 (A路線新タイプ)

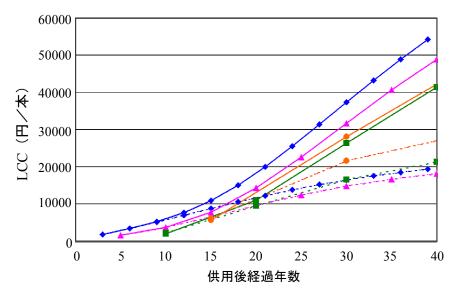


図3.8c LCC算定結果 (B路線新タイプ)



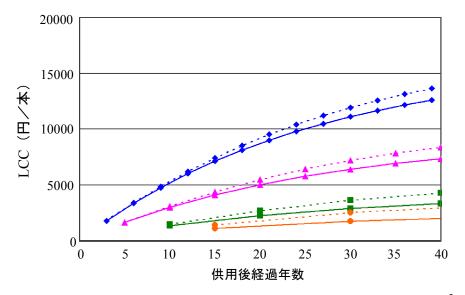


図3.8d LCC算定結果 (C路線旧タイプ)

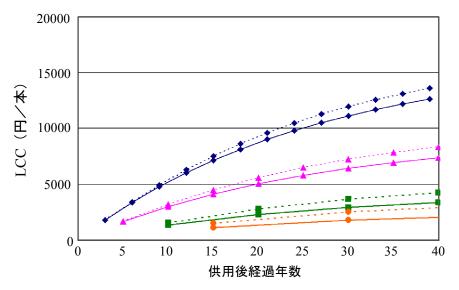


図3.8e LCC算定結果 (C路線新タイプ)



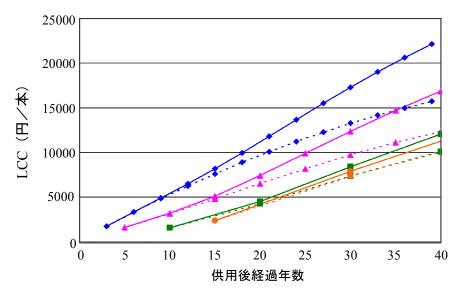


図3.8f LCC算定結果 (D路線新タイプ)

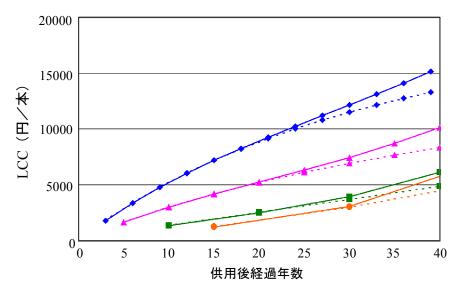


図3.8g LCC算定結果 (E路線旧タイプ)



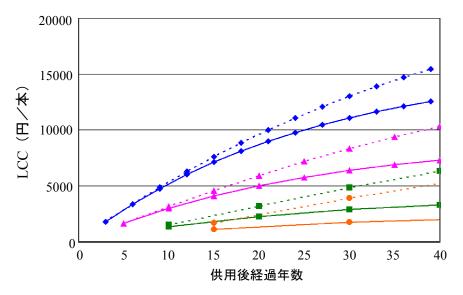


図3.8h LCC算定結果 (E路線新タイプ)

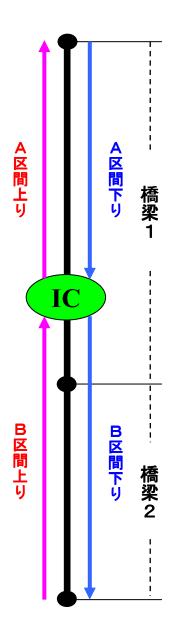


図4.1 研究対象道路床版

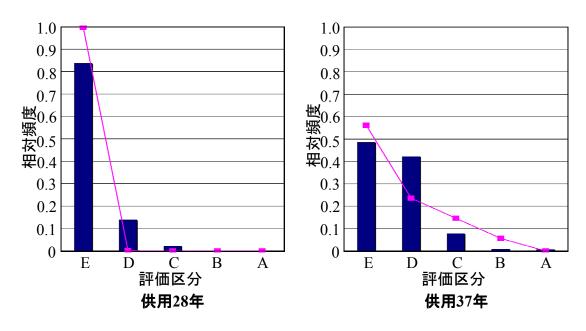


図4.2a 点検結果と解析結果の比較 (A区間上り)

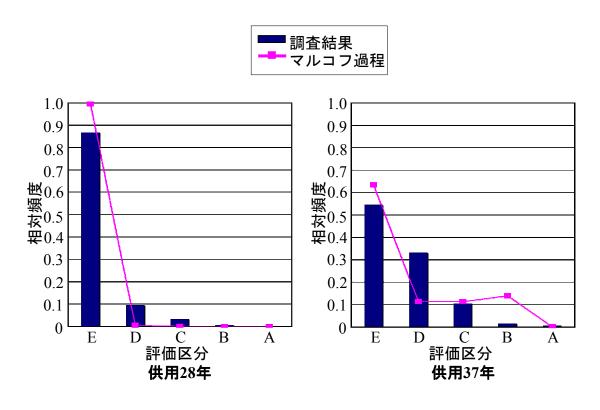


図4.2b 点検結果と解析結果の比較 (A区間下り)

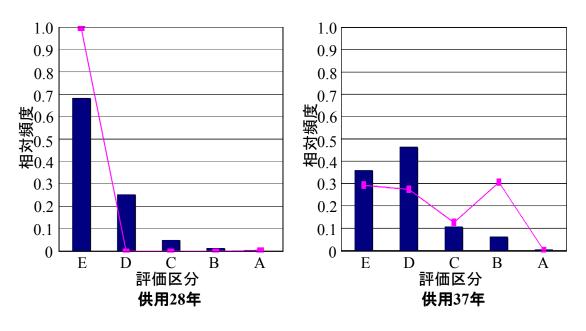


図4.2c 点検結果と解析結果の比較 (B区間上り)

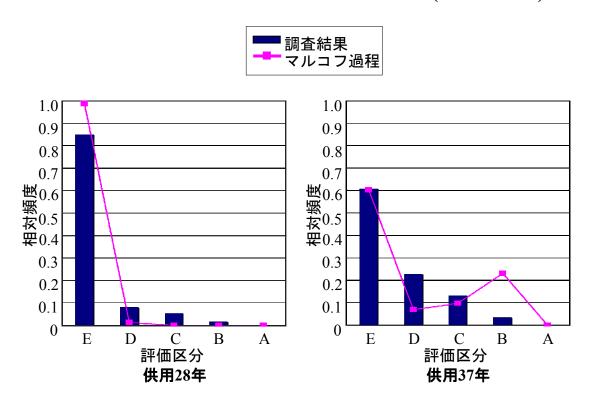


図4.2d 点検結果と解析結果の比較 (B区間下り)

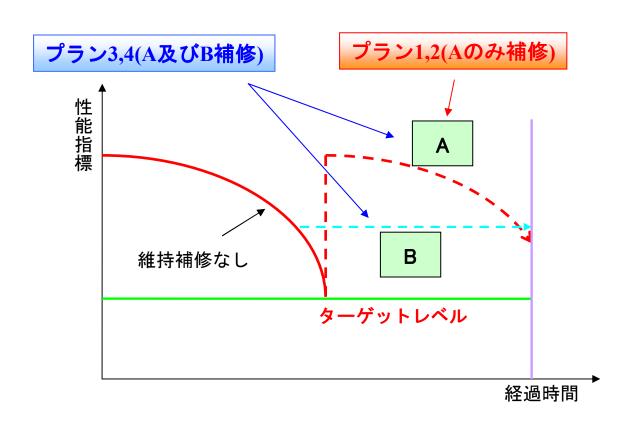


図4.3 道路床版における維持補修戦略の概要

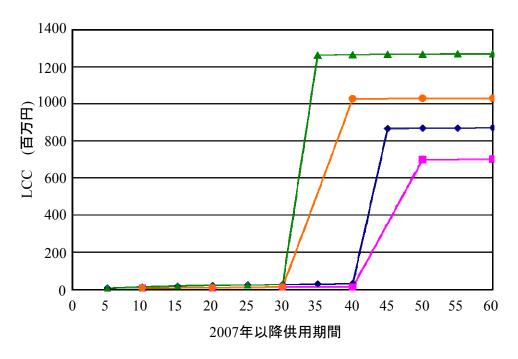
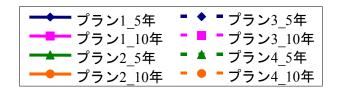


図4.4a LCC算定結果 (A区間上り)



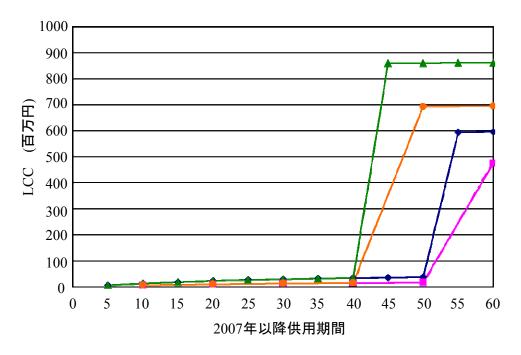


図4.4b LCC算定結果 (A区間下り)

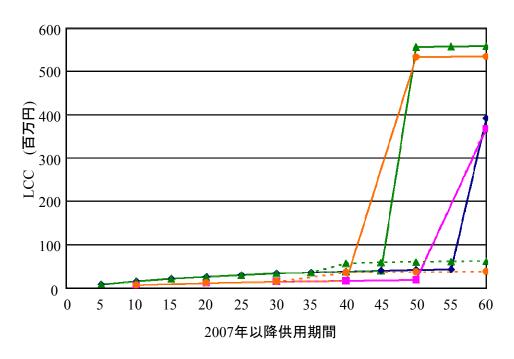


図4.4c LCC算定結果 (B区間上り)



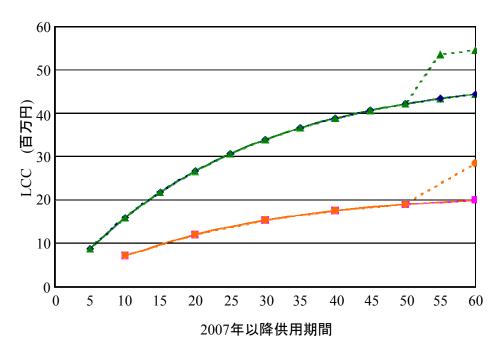


図4.4d LCC算定結果 (B区間下り)

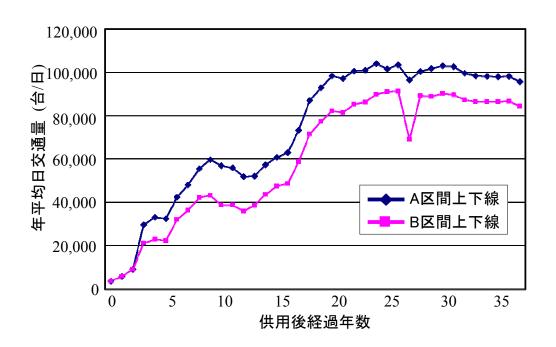


図4.5 年平均日交通量

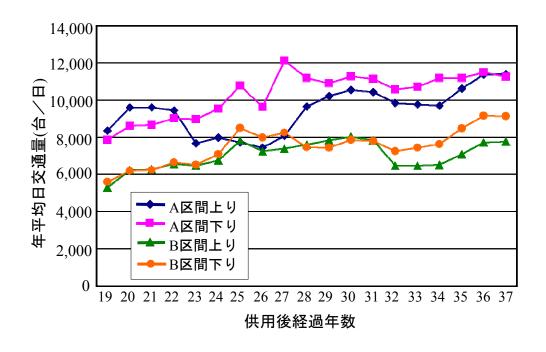


図4.6 大型車年平均日交通量

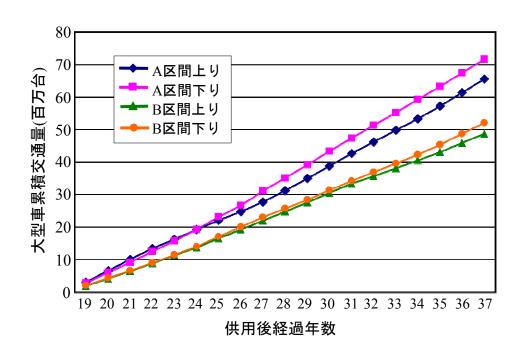


図4.7 大型車累積交通量

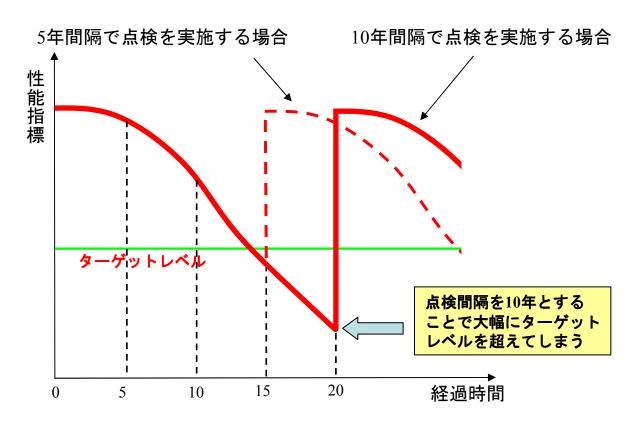


図4.8 点検間隔設定における問題点

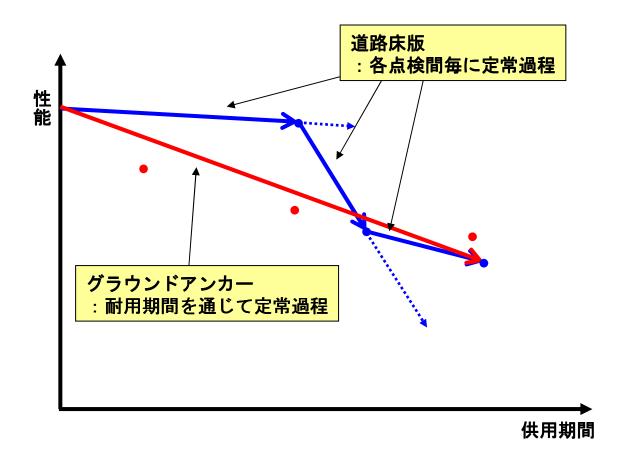


図5.1 本研究における構造物の性能低下特性の概念図