

# 目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析 に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法

貝戸清之<sup>1</sup>・金治英貞<sup>2</sup>・小林寛<sup>3</sup>・間嶋信博<sup>4</sup>・大石秀雄<sup>5</sup>・松岡弘大<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 建設技術課 (〒 550-0011 大阪市西区阿波座 1-3-15)  
E-mail: hidesada-kanaji@hanshin-exp.co.jp

<sup>3</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 建設技術課 (堺設計担当) (〒 590-0075 堺市堺区南花田口町 2-3-20)  
E-mail: hiroshi-kobayashi@hanshin-exp.co.jp

<sup>4</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 建設企画課 (〒 550-0011 大阪市西区阿波座 1-3-15)  
E-mail: nobuhiro-mashima@hanshin-exp.co.jp

<sup>5</sup>非会員 財団法人 阪神高速道路管理技術センター (〒 541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7)  
E-mail: oishi@tech-center.or.jp

<sup>6</sup>学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: k-matsuoka@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本研究では、ライフサイクル費用とリスク発生確率という2つの評価軸に基づき、長大橋の最適な点検手法および点検間隔に関する意思決定を行うための方法論を提案する。はじめに、目視点検データを用いた集計的マルコフ劣化ハザードモデルを定式化し、ライフサイクル費用最小化モデルを提示する。さらに、長大橋の目視点検による管理限界リスクの発生過程をフォルト・ツリーで表現するとともに、フォルト・ツリーを構成する末端事象のリスク発生確率をマルコフ推移確率で算出する。これにより点検政策の相違がもたらすリスク発生確率の時間的変動を把握することが可能となる。最後に、提案手法を阪神高速道路が管理する実際の長大橋の最適点検政策の決定問題へ適用し、その有効性を実証的に検証する。

**Key Words :** *fault tree analysis, visual inspection, long span bridge, optimum inspection policy, asset management*

## 1. はじめに

橋梁のような大型の社会基盤施設を効率的に維持管理していくための方法論として、アセットマネジメントが注目されている<sup>1),2)</sup>。とりわけ近年では、目視点検データを用いた統計的劣化予測手法<sup>3),4)</sup>、および劣化予測モデルと有機的に連動したライフサイクル費用最小化モデル<sup>5)-7)</sup>が提案され、実務レベルの意思決定問題に活用される事例が増加している<sup>8)</sup>。ただし、このようなアセットマネジメントは、膨大な数が存在する一般的な構造形式の施設群を対象としており、統計的手法に依拠した方法論である以上、目視点検データの蓄積量が劣化予測の推計精度や意思決定の実務的整合性に影響を及ぼすことは否めない。

一方で、各構造物管理者ではこのような一般的な構造形式の施設とは別に特殊施設を管理しているケースが少なくない。本研究で対象とする橋梁では長大橋が特殊施設に該当する(例えば、阪神高速道路においては、鋼橋では中央径間が200m以上、コンクリート橋では100m以上を長大橋と定義している)。長大橋は一つ一つが完全なオーダーメイドであり、同質な施設の

マクロ分析を出発点とする前述の手法の適用には自ずと限界がある。さらに、長大橋における点検は、設計当初に作成された点検マニュアルに従って実施されている場合が多い。今後、長大橋においても、本格的な老朽化を迎えるに際して、実際の損傷・劣化等を見極めながら、現状を反映した内容に点検マニュアルを適宜更新していく必要がある。このときに重要となるのは、「点検項目」と「点検手法・間隔」である。「点検項目」では、橋梁形式、構造的特徴や過去の点検記録を勘案して、点検における着目箇所を選定するとともに、それぞれの着目箇所が発生が懸念される損傷・劣化を定め、それらの状態を健全度として評価することが重要となる。一方で、「点検手法・間隔」は、どのような手法によってどのくらいの間隔で点検を実施するのかという意思決定問題である。具体的には、点検に要する費用および各損傷・劣化の進行に伴う補修費用などの経済的負担(直接的費用)の増加と、点検を実施することによる安全性向上(対比的にはリスクの軽減)とのトレードオフ問題を解くことが求められる。すなわち、必要以上に高頻度の点検は効率性を損なうだけでなく、過剰投資となり、厳しい財政状況の中で予算の最適配

分を阻害する要因になりかねない。しかしながら、これまで長大橋を対象として「点検手法・間隔」という意思決定問題を工学的見地から精査した事例は著者らの知る限り見当たらない。

以上の問題意識のもと、本研究では、はじめに長大橋を構成する主要な部材の劣化確率の時間的変化をマルコフ劣化ハザードモデルにより表現するとともに、目視点検データを用いて集計的に推計する。さらに、マルコフ決定モデルを援用し、ライフサイクル費用最小化を達成する点検・補修政策(点検手法、間隔および補修工法)の決定方法を示す。またその一方で、長大橋全体リスクの発生過程を、フォルト・ツリーで表現するとともに、フォルト・ツリーの末端事象を構成する部材の劣化確率をマルコフ劣化ハザードモデルにより与え、最終的に点検・補修政策の相違がもたらす長大橋全体のリスク発生確率の時間的変化を分析する。最後にライフサイクル費用とリスク発生確率の2つの評価軸に基づく最適点検・補修政策の決定手法を述べる。以下、2. で本研究の基本的な考え方を説明する。3. では、部材の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで表現するとともに、その集計的推計手法について述べる。4. では、ライフサイクル費用最小化を達成する点検・補修政策モデルを提案する。5. では、長大橋のリスク事象の発生過程をフォルト・ツリーを用いて表現する。6. では、阪神高速道路が管理する実際の長大橋A(鋼斜張橋:1本柱1面ケーブル箱桁形式、支間長149m+355m+149m=653m、片側3車線)を対象とした適用事例を示す。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 目視点検データを用いた統計的劣化予測

社会基盤施設の劣化予測に関しては、数多くの研究事例がある。特に、社会基盤施設に対する目視点検データ(離散的な健全度)を用いた統計的劣化予測モデルとしてマルコフ連鎖モデルが提案されている。マルコフ推移確率の推計方法として、1) 集計的推計方法と、2) 非集計的推計方法が存在する。前者の方法は、ある一定の観測期間の中で生じた健全度間の推移状態に関するデータに基づいて、マルコフ推移確率を直接推計することを目的とする。もっとも単純な算定方法は、健全度間の推移状態に関する実データの数え上げにより、推移確率を直接定義する方法である<sup>9)</sup>。これに対して、最尤法により、推移確率を推計する方法も提案されている。マルコフ推移確率は、推移確率を定義する期間間隔に依存する。現実には点検される目視点検データには、観測期間長が異なる多様なデータが混在している場合が多い。このとき、実データが観測された期

間間隔の差異がもたらす影響を補正することが必要となる。杉崎ら<sup>10)</sup>は、異なる観測期間長を有する目視点検データを用いて、マルコフ推移確率を集計的に推計する方法を提案している。しかし、このような集計的劣化予測方法では、個々の施設が置かれている使用環境や、施設が有する構造的、機能的特性と推移確率との関係をモデル化できないという限界がある。

これに対して、非集計的推計方法は、個々の社会基盤施設の劣化過程に関する情報に基づいて、その背後にある劣化過程の統計的規則性を推計する方法である。このような非集計的推計方法として、貝戸ら<sup>11)</sup>は、ニューヨーク市における橋梁の目視点検データを用いて、橋梁の劣化速度に着目した平均劣化曲線の算出方法を検討している。また、劣化速度を確率変数と捉えて、過去の点検履歴を反映したマルコフ推移確率の推計方法を提案した。その後、非集計的推計方法は、ハザードモデル<sup>12),13)</sup>の適用により、飛躍的な発展を遂げている。その中で、Mishalani and Madanat<sup>14)</sup>は、2つの隣接する健全度のみを対象として、マルコフ推移確率を指数ハザードモデルを用いて表現する方法を提案した。これとは独立に、津田ら<sup>4)</sup>は、2つ以上の任意の健全度間における推移状態を表現する多段階指数ハザードモデルを提案し、マルコフ推移確率を推計する一般的なマルコフ劣化ハザードモデルを提案した。その後、マルコフ推移確率が過去の記憶を有する非斉次マルコフ推移確率を推計するための多段階ワイブル劣化ハザードモデル<sup>15)</sup>、異なる劣化パターン間の推移過程を表現する階層型指数劣化ハザードモデル<sup>16)</sup>が提案されている。また、マルコフ推移確率の推計方法に関しては、点検データが非常に少ない段階で、技術者の経験情報と点検結果を結合してマルコフ推移確率を推計するベイズ推計法<sup>17),18)</sup>、予防補修により点検データが欠損することにより発生する欠損バイアスを補正する方法<sup>19)</sup>が提案されている。さらに、小濱ら<sup>20)</sup>は、個別施設に特有なハザード率の異質性を考慮することが可能な混合マルコフ劣化ハザードモデルを提案し、ベンチマーキング劣化曲線の設定や、劣化速度の相対評価を実施した。

本研究で対象とする長大橋においても、目視点検を通じた多段階の健全度により部材の健全性が評価されており、部材の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで記述することが可能である。しかし、前述したように長大橋は基本的に同質な構造形式の橋梁が他に存在しないことが多く、いかに長大橋が数多くの部材で構成されていると言えども、統計的推計に十分な情報を蓄積することは難しい。そこで本研究では、点検実施年における各健全度の相対的な割合という集計的な情報を用いた推計を行うこととする。このような集計的マルコフ劣化ハザードモデルに関しても、堀ら<sup>21)</sup>

による下水道施設のコンクリート版への適用事例が存在し、本研究においても基本的にはこの手法を踏襲することとする。集計的マルコフ劣化ハザードモデルにより、長大橋の部材の劣化過程を表現するとともに、これらの劣化予測結果に基づき、長大橋のライフサイクル費用やリスク発生確率を算出する。

## (2) リスク評価

目視点検データを用いた統計的劣化予測結果を活用したリスクマネジメント研究として、貝戸ら<sup>22)</sup>は、道路巡回頻度の決定問題に対して、路上障害物の発生リスクをポアソンガンマ発生モデルにより定式化し、日常の点検記録を用いてモデル推計を行った。また、リスク管理水準を設定し、管理水準を満足するための最適道路巡回頻度を決定する方法論を提案した。さらに、小濱ら<sup>23)</sup>は同じ問題に対して巡回費用を考慮し、費用とリスクの最小化を実現する最適巡回頻度と経路を選定する手法を提案している。また、堀ら<sup>21)</sup>は、下水道施設に着目し、その中でも硫酸腐食が深刻な問題となるコンクリート版の最適補修戦略を検討した。具体的には、直接的費用とリスク費用の総和で定式化される期待ライフサイクル費用を最小化する最適点検間隔の決定手法を提案している。期待ライフサイクル費用評価に際しては、マルコフ劣化ハザードモデルによる予測結果と連動した形でモデル化がなされている。ただし、以上の既往の研究においては基本的に、膨大な数の道路区間や部材を独立した要素の集合と捉え、それらの最大リスクやリスクの総和に焦点が当てられており、複数要素が依存関係にある構造系全体としてのシステムリスクという概念が希薄であった。

一方で、複数部材により構成される長大橋のリスクを考える際には、長大橋全体リスクに直結するような部材を抽出し、そのような部材や部材グループの劣化が、長大橋全体のリスクに発展する可能性を記述することが重要な課題となる。このような問題に関しては一般的にフォルト・ツリー分析が適用される。フォルト・ツリー分析に関しても、膨大な研究の蓄積<sup>24)</sup>があり、原子炉故障解析をはじめとして数多くの適用事例が存在する。土木工学の分野でも、すでに適用事例がいくつか見出せる<sup>25), 26)</sup>。これらの研究では、個々の要素(部材)の故障(劣化)確率が、システム(構造物)全体のリスク発生確率に及ぼす影響を分析し、システム(構造物)の信頼性や冗長性を静的に分析することに主眼が置かれている。また、個々の要素の故障確率が与件的に設定されることが多く、実際の故障履歴データを反映しているケースは極めて少ない。これに対して、長大橋の部材の劣化に伴う劣化確率の増加が、長大橋全体の安全性、利用者や社会に及ぼす影響を分

析することを目的とした動的フォルト・ツリー分析に関してはそれほど研究が蓄積されていない。システムの動的フォルト・ツリー分析に関しては、山本ら<sup>27)</sup>が高速道路の管制システムにフォルト・ツリー分析を適用した事例を除いて、簡単な構造を有するシステムを対象とした分析のみが行われているのが実情である<sup>28)</sup>。

本研究では、ハザード率が異なる多様な部材で構成されているような長大橋を対象として、実用的な動的フォルト・ツリー分析モデルを提案することを目的とする。さらに、劣化ハザードモデルと連動し、点検手法、間隔および補修工法を政策変数とするライフサイクル費用最小化モデルを提案する。その上で、動的フォルト・ツリー分析により算出された長大橋のリスクと、ライフサイクル費用最小化モデルにより算出されたライフサイクル費用の2つを評価軸として、長大橋の最適な点検間隔を決定する。なお、本研究では、長大橋に対する目視点検を中心として方法論を展開する。したがって、「リスク」という用語は「目視点検で設定された管理限界を超える(健全性が最も劣るランクの健全度に到達する)リスク」と定義し、以下目視点検上の管理リスクと称する。なお、健全性が最も劣るランクとは、阪神高速道路の場合、後の表-3に示す健全度S1, S2, Aを意味する。さらに、フォルト・ツリーで算出するリスク発生確率は、フォルト・ツリーを構成する部材個々に対して健全性の劣る健全度(S1, S2, A)に到達する確率を算出し、それらを5.(3)で述べるフォルト・ツリーの頂上事象の算出ルールに従って全ての部材に対して集計した確率を用いることとする。したがって、本研究では長大橋の構造安全性に直結する類の損傷の発生を想定していないことを断っておく(あくまでも、目視点検で健全性が最も劣るランクの健全度と評価される損傷を対象とする)。ただし、現実問題として現時点における点検の主体は目視点検であることを勘案すれば、実務を通して獲得できる情報に基づき長大橋の最適点検政策に関する意思決定を行うための方法論を提案する点に本研究の工学的価値を見出せるものと考えている。なお、構造安全性に関わるリスクを想定した方法論の構築も、基本的には本研究の延長線上に位置するが別の機会に改めて発表したい。

## (3) 目視点検に基づく長大橋のマネジメント

社会基盤施設に対する最適点検・補修政策は、直接的費用とリスク発生に伴う損失(以下、リスク費用)のトレードオフ問題を定式化した期待ライフサイクル費用を最小化することで、一意に決定することが可能である。リスク費用は具体的に、

$$\text{リスク費用} = \text{損害} \times \text{発生確率} \quad (1)$$

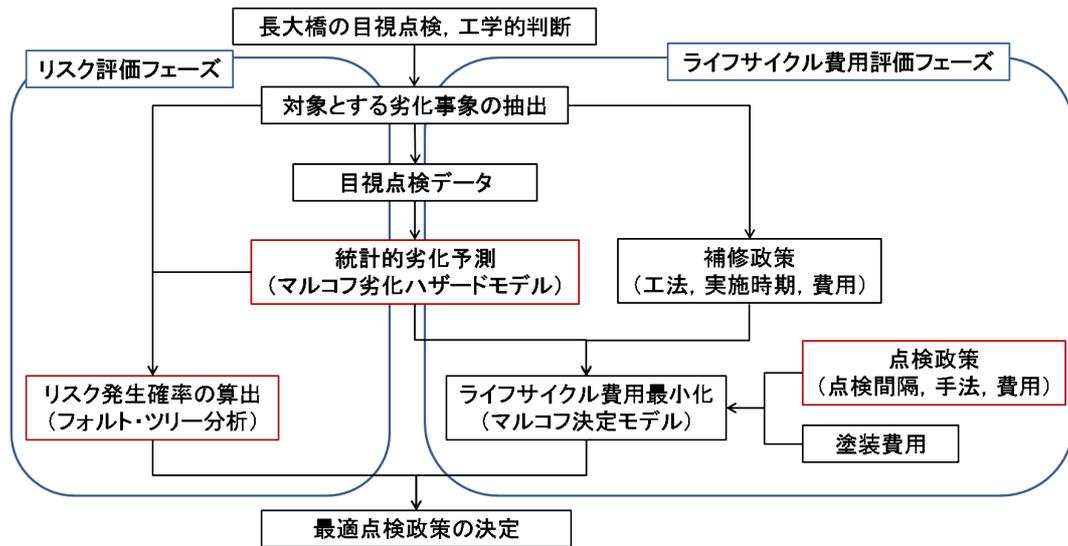


図-1 研究の基本的な枠組み

と定義できる。しかし、上式から明らかなように、リスク費用を算出するためには、まずリスクの発生がもたらす損害を費用換算する必要性があり、その妥当性に対する判断が難しい場合が多い。実際に、本研究におけるリスク発生確率の算出に際して、長大橋のフォルト・ツリーを作成し、最終的に長大橋全体のリスク発生確率の算出を試みるが、本研究でいうリスクは上述したように、目視による管理限界を超えるリスク（目視点検の結果として与えられる S1, S2, A ランクの健全度に到達するリスク）である。そのようなリスクが発生したとしても長大橋の構造安全性に影響を及ぼすには至らず、各部材の補修が必要となる程度である。したがって、リスク費用を算出する際に必要となる、フォルト・ツリーの頂上事象の発生に伴う費用（損害）をどのように積算すればよいかという疑問が生じる（例えば、頂上事象を長大橋の落橋相当に設定できるのであれば、リスク発生に伴う費用は長大橋の大規模補修費用や更新費用として見積もることができる）。以上のような理由から、本研究では期待ライフサイクル費用を算出することが困難となる。また、期待ライフサイクル費用を最小化する最適点検・補修政策、特に最適点検間隔を一意に決定してしまうことの安易さも実務では懸念材料となる。すなわち、最適点検間隔の数値のみが強調され、数値よりも重要な、数値の妥当性等に関する技術者間の議論が希薄になることが懸念される。そこで本研究では、点検や補修などの直接的費用のみを考慮したライフサイクル費用と、リスク費用に換算する以前のリスク発生確率をそれぞれ算出し、これら 2 つの評価軸を設けた上で最適点検・補修政策のあり方を議論できる方法論を構築することが望ましいと判断した。

図-1 に本研究の基本的な枠組みを示す。長大橋に対する目視点検が方法論全体の核となり、目視点検データを用いてマルコフ劣化ハザードモデルを推計する。マルコフ劣化ハザードモデルによる統計的劣化予測結果を利用して 2 つのフェーズを展開する。第一フェーズはライフサイクル費用評価（図中、右側の青囲み）である。ライフサイクル費用には点検、補修の他、管理者として定期的な支出を見込んでおくべき直接的費用（例えば、塗装、道路舗装の打換え、ジョイントの取替え等があるが、本研究では後述するフォルト・ツリーの構成から塗装費用のみ）を考慮しており、点検政策や補修政策を決定することが課題となる。ただし、通常はライフサイクル費用を検討する際には後者の補修政策（どの段階でどの補修工法を適用するか）の決定が重要となる。これは点検手法や点検間隔はすでに点検マニュアル等で定められているケースが多いためである。長大橋の場合にも点検マニュアルは存在するが、当該橋梁のみを対象に作成されたマニュアルであることが多い。本研究の動機となったように、1 橋を対象としたマニュアルであるがゆえに、長大橋の重要性和希少性を考えると、橋梁の現状を反映させた内容に逐次修正していくことも比較的容易である。また、その一方で特殊構造であるので損傷形態は多様であるが、各損傷に対する補修工法は過去の実績として 1 種類であった。したがって、長大橋に関しては補修政策よりも点検政策に高度な工学的判断が求められる。一方、第二フェーズはリスク発生確率の算出を行うリスク評価（図中、左側の青囲み）である。リスク発生過程をフォルト・ツリーで表現するとともに、末端事象の劣化確率をマルコフ劣化ハザードモデルに基づき算出し、その発生確率を用いてフォルト・ツリーにより長大橋の目視点検

上の管理限界リスクの発生確率を算出する。最終的に、ライフサイクル費用とリスク発生確率を同時に勘案しながら、最適点検政策を決定する。

### 3. 集計的マルコフ劣化ハザードモデル

#### (1) モデルの基本的な考え方

本研究では、長大橋の劣化・補修過程をマルコフ連鎖モデルとしてモデル化し、ライフサイクル費用を最小化するような最適点検・補修モデルを定式化する。従来より、社会基盤施設の劣化過程をマルコフ連鎖モデルとしてモデル化したような最適点検・補修モデル<sup>29)–31)</sup>が提案されている。そこでは、対象とする社会基盤施設や部材の劣化状態を、離散的な状態変数で記述し、状態変数から状態変数へ推移する確率を制御する政策変数として補修政策をモデル化している<sup>32),33)</sup>。しかし、本研究で対象とするような長大橋では部材数が多いとは言え、ある単一の部材や部位に着目し、非集計的にマルコフ劣化ハザードモデルを推計するほど十分なデータを蓄積することは困難である。現実問題として、部材の点検記録が健全度の割合等のような集計的情報として利用せざるを得ないのが現状である。

そこで、はじめに劣化予測に関しては、非集計的にマルコフ劣化ハザードモデルを推計することを諦める一方で、非集計的推計ではデータ数の問題で推計精度が低下するような場合に対しても推計が可能となる集計的推計手法を示す。集計的手法に関しては、補修面積率という集計的情報からマルコフ劣化ハザードモデルを推計した堀ら<sup>21)</sup>の研究がある。本研究ではこの方法を基本として、長大橋部材の劣化過程を健全度の割合という集計的状态変数を用いたマルコフ連鎖モデルとして直接モデル化を行う。その結果、長大橋の最適点検・補修政策モデルを、集計的マルコフ決定モデルとして定式化することが可能となる。また、本モデルを採用することで、個々の構造物の健全度に関する情報量が少ない場合であっても、点検実施年度において、各健全度が当該部材総数に占める相対的な割合が蓄積されているような場合には劣化予測が可能となる。

さらに、マルコフ決定モデルの状態変数としても、このような集計的状态変数を用いることが必要となる。その上で、長大橋部材の劣化・補修過程を、集計的状态間の推移状態に着目してモデル化する。このような集計的マルコフ決定モデルに関しても、いくつかの研究事例が存在する。青木らは道路付帯施設のアセットマネジメントを対象とした集計的マルコフ決定モデルを提案している<sup>34),35)</sup>。本研究で提案する最適点検・補修モデルも、基本的には青木らの集計的マルコフ決定モデルの考え方を踏襲している。

#### (2) モデルの前提条件

長大橋部材の劣化過程をモデル化する。本研究では、対象とする長大橋を構成するすべての部材を、時間軸上における同一時刻において同時に点検・補修するような問題を考える。いま、カレンダー時間軸上に等間隔に設けられた離散的な時刻において点検を実施し、必要な場合には部材の補修を同時に実施するような管理業務を考える。初期時刻  $t_0$  に、対象とする長大橋が新規に建設されたと考える。さらに、初期時刻  $t_0$  を起点とし、無限遠に続く離散的な時間軸

$$t_r^z = t_0 + rz \quad (r = 0, 1, \dots) \quad (2)$$

を導入する。ここに、添え字  $r$  ( $r = 0, 1, \dots$ ) は点検・補修間隔  $z$  の離散的な時間軸における時刻番号を表す。点検・補修間隔  $z$  は政策変数である。

長大橋は劣化特性の異なる複数の部材で構成される。いま、長大橋が  $L$  種類の部材グループ (あるいはフォルト・ツリーの末端事象) で構成されていると考える。このとき、対象とする部材の中から、ある代表的な部材グループ  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) に着目する。当該グループの部材総数は  $K_l$  である (ただし、これ以降は **4.(3)** まで表記を単純化するために  $l$  は略記する)。点検データに基づいて劣化・補修過程を推計するに際して、長大橋の場合には前述したように、部材ごとの点検データ (非集計的情報) を用いてマルコフ連鎖モデルを推計できるほどのデータを蓄積することは困難である。実際には、健全度ごとの部材総数に対する割合である健全度別相対頻度分布 (以下、健全度分布と呼ぶ) に関するデータのみが利用可能である。本研究では、健全度分布という集計化された情報を用いて、部材の劣化・補修過程をモデル化する。このような集計化操作に関しては、のちに **3.(4)** で議論することとし、当面の間、部材ごとの健全度データが入手可能として議論を進める。

部材  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) の健全度を  $M$  個の離散的なレーティング指標  $i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) で表現する。ただし、レーティング指標  $i$  の値が大きくなるほど、劣化が進展していることを表す。時刻  $t_r^z$  における部材  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) の健全度を状態変数

$$h_k(t_r^z) = i \quad (k = 1, \dots, K; r = 1, \dots) \quad (3)$$

を用いて表現する。ある部材の劣化過程は、状態空間  $\mathcal{K}_M = \{1, \dots, M\}$  上で定義されるマルコフ過程に従うと仮定する。さらに、同種類の部材の推移確率は同一であると考えられる。部材が異なれば、推移確率は異なる。時刻  $t_r^z = t_0 + rz$  において、部材  $k$  の劣化状態が  $h_k(t_r^z)$  であり、かつ時刻  $t_{r+1}^z$  において劣化状態  $h_k(t_{r+1}^z)$  に推移する条件付確率を

$$\text{Prob}[h_k(t_{r+1}^z) = j | h_k(t_r^z) = i] = p_{ij} \quad (4)$$

で表す。  $p_{ij}$  は、2つの状態変数  $i$  と  $j$  の間の推移確率

である。推移確率  $p_{ij}$  は点検・補修間隔  $z$  に依存するが、記述の簡便化のために点検・補修間隔  $z$  を省略している。健全度  $M$  は吸収状態であり、補修をしない限り健全度  $M$  の状態に留まると考える。すなわち、 $p_{MM} = 1$  が成立する。劣化確率の定義より、

$$\sum_{j=i}^M p_{ij} = 1 \quad p_{ij} = 0 (i > j \text{ の場合}) \quad (5)$$

が成立する。ここで、部材の推移確率行列を定義すると、推移確率行列  $\mathbf{P}$  は

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1M} \\ 0 & p_{22} & \cdots & p_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_{MM} \end{pmatrix} \quad (6)$$

と表すことができる。

### (3) マルコフ劣化ハザードモデル

マルコフ推移確率は、マルコフ劣化ハザードモデルを用いて推計できる。マルコフ劣化ハザードモデルの詳細は参考文献4)に譲り、ここではモデルの概要のみを説明する。いま、説明の便宜上、再びある部材  $k$  の劣化過程に着目する。部材  $k$  の健全度  $i$  ( $i = 1, \dots, M-1$ ) の寿命(その健全度が継続する時間長)を確率変数  $\zeta_i^k$  で表す。健全度  $i$  の寿命が、確率密度関数  $f_i^k(\zeta_i^k)$ 、分布関数  $F_i^k(\zeta_i^k)$  に従うと仮定する。対象とする部材において、健全度が変化した時刻  $t_i^k$  ( $i = 0, \dots, M-1$ ) を起点とする時間軸(以下、サンプル時間軸と呼ぶ)を考える。健全度  $i$  のサンプル時間軸上で、カレンダー時刻  $t_{i-1}^k$  からの経過時間を  $y_i^k$  と表記する。定義より、時刻  $t_{i-1}^k$  では  $y_i^k = 0$  となる。ここで、時刻  $t_{i-1}^k$  に健全度が  $i$  となり、そこから時間  $y_i^k$  が経過した時刻において健全度が  $i+1$  に変化する確率密度を指数ハザード関数

$$\lambda_i^k(y_i^k) = \lambda_i^k \quad (7)$$

を用いて表現する。指数ハザード関数を用いることにより、劣化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できる。指数ハザード関数を用いれば、健全度  $i$  の寿命が  $y_i^k$  以上となる確率  $\tilde{F}_i^k(y_i^k)$  は、

$$\tilde{F}_i^k(y_i^k) = \exp(-\lambda_i^k y_i^k) \quad (8)$$

と表現できる。したがって、時刻  $t_{r_k}$  において健全度が  $i$  と判定され、次の点検時刻  $t_{r_{k+1}} = t_{r_k} + z_{r_k}$  においても健全度が  $i$  と判定される確率は、

$$p_{ii}^k = \exp(-\lambda_i^k z_{r_k}) \quad (9)$$

となる。ただし、 $z_{r_k}$  は2つの点検・補修時刻の間隔を表す。さらに、点検時刻  $t_{r_k}$  と  $t_{r_{k+1}}$  の間で健全度が  $i$  から  $j$  ( $j > i$ ) に推移するマルコフ推移確率  $p_{ij}^k(z_{r_k})$  ( $i =$

$1, \dots, M-1; j = i, \dots, M$ ) は、

$$\begin{aligned} p_{ij}^k(z_{r_k}) &= \text{Prob}[h(t_{r_k}) = j | h(t_{r_k-1}) = i] \\ &= \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_s^k - \lambda_m^k} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_{s+1}^k - \lambda_m^k} \exp(-\lambda_m^k z_{r_k}) \\ &\quad (i = 1, \dots, M-1; j = i+1, \dots, M) \end{aligned} \quad (10)$$

と表すことができる<sup>4)</sup>。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_s^k - \lambda_m^k} = 1 & (m = i \text{ の時}) \\ \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_{s+1}^k - \lambda_m^k} = 1 & (m = j \text{ の時}) \end{cases}$$

が成立すると考える。さらに、表記の便宜上、

$$\begin{aligned} &\prod_{s=i, s \neq m}^{j-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_s^k - \lambda_m^k} \exp(-\lambda_m^k z_{r_k}) \\ &= \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_s^k - \lambda_m^k} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s^k}{\lambda_{s+1}^k - \lambda_m^k} \exp(-\lambda_m^k z_{r_k}) \end{aligned}$$

と簡略化する。また、 $p_{iM}^k(z_{r_k})$  に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$p_{iM}^k(z_{r_k}) = 1 - \sum_{j=i}^{M-1} p_{ij}^k(z_{r_k}) \quad (11)$$

$(i = 1, \dots, M-1)$

### (4) モデルの推計方法

マルコフ劣化ハザードモデル(9),(10)を、点検履歴情報  $\Theta$  を用いて推計する方法を提案する。再び、部材  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) に着目する。部材  $k$  の劣化過程を特徴づけるハザード率  $\lambda_i^k$  ( $i = 1, \dots, I-1; k = 1, \dots, K$ ) は施設の特性ベクトルに依存して変化すると考え、ハザード率  $\lambda_i^k$  を特性ベクトル  $\mathbf{x}^k$  を用いて

$$\lambda_i^k = \mathbf{x}^k \boldsymbol{\beta}_i^k \quad (12)$$

と表す。ただし、 $\boldsymbol{\beta}_i^k = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,H})$  は未知パラメータ  $\beta_{i,h}$  ( $h = 1, \dots, H$ ) による行ベクトル、記号「 $\cdot$ 」は転置操作を表す。また、 $x_1^k = 1$  より、 $\beta_{i,1}$  は定数項を表すので、特性変数の数は  $H-1$  となる。ここで、前回の点検時刻  $\bar{t}_{r_{k-1}}$  における健全度分布を

$$\bar{\boldsymbol{\pi}}^{r_k-1} = (\bar{\pi}_1^{r_k-1}, \dots, \bar{\pi}_M^{r_k-1}) \quad (13)$$

と表す。ただし、 $\bar{\pi}_i^{r_k-1}$  ( $i = 1, \dots, M$ ) は、点検時刻  $\bar{t}_{r_{k-1}}$  において、部材  $k$  の全部材数に対して健全度  $i$  の部材数が占める割合を表す。また、 $\bar{\cdot}$  は観測値であることを意味する。時刻  $\bar{t}_{r_{k-1}}$  と時刻  $\bar{t}_{r_k} = \bar{t}_{r_{k-1}} + \bar{z}_{r_k}$  において点検・補修間隔  $\bar{z}_{r_k}$  における推移確率行列を

$$\mathbf{p}^k(\bar{z}_{r_k}) = \begin{pmatrix} p_{11}^k(\bar{z}_{r_k}) & \cdots & p_{M1}^k(\bar{z}_{r_k}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{M1}^k(\bar{z}_{r_k}) & \cdots & p_{MM}^k(\bar{z}_{r_k}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

と表せば、時刻  $\bar{t}_{r_{k-1}}$  で評価した時刻  $\bar{t}_{r_k}$  における健全度別相対頻度の予測値  $\boldsymbol{\pi}_i^{r_k}$  は、

$$\boldsymbol{\pi}_i^{r_k} = \bar{\boldsymbol{\pi}}^{r_k-1} \mathbf{p}^k(\bar{z}_{r_k}) \quad (15)$$

と表される. 式 (15) を具体的に書けば,

$$\pi_j^{r_k} = \sum_{i=1}^j \bar{\pi}_i^{r_k-1} p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k}) \quad (r=1, \dots, I) \quad (16)$$

となる. 行和と列和の順序を入れ替えれば, 相対頻度  $\pi_j^{r_k}$  に関して,

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^I \pi_j^{r_k} &= \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^j \bar{\pi}_i^{r_k-1} p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k}) \\ &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=i}^I \bar{\pi}_i^{r_k-1} p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k}) = \sum_{i=1}^I \bar{\pi}_i^{r_k-1} = 1 \end{aligned}$$

が成立する. ここで, 時刻  $t_{r_k}$  において観測された健全度分布の観測値を  $\bar{e}_j^{r_k}$  と表す. このとき, 観測値ベクトル

$$\mathbf{e}_{r_k} = (\bar{e}_1^{r_k}, \dots, \bar{e}_M^{r_k}) \quad (17)$$

が生起する確率密度 (尤度)  $\mathcal{L}_{r_k}(\boldsymbol{\theta}_{r_k} : \boldsymbol{\beta})$  は, 多項分布

$$\mathcal{L}_{r_k}(\boldsymbol{\theta}_{r_k}) = f(\bar{\mathbf{e}}_{r_k}) = \frac{S^{r_k}!}{\bar{e}_1^{r_k}! \dots \bar{e}_M^{r_k}!} \prod_{j=1}^M (\pi_j^{r_k})^{\bar{e}_j^{r_k}} \quad (18)$$

と表される. したがって, 観測値が生起する同時生起分布は

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\Theta}_{r_k}) = \prod_{k=1}^K \prod_{r_k=1}^{T^k} f(\bar{\mathbf{e}}_{r_k}) \propto \prod_{k=1}^K \prod_{r_k=1}^{T^k} \prod_{j=1}^M (\pi_j^{r_k})^{\bar{e}_j^{r_k}} \quad (19)$$

と表される. ただし,  $\pi_j^{r_k}$  は式 (16) で表される. さらに, 式 (16) に含まれる推移確率  $p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k})$  が, マルコフ劣化ハザードモデル (9),(10) を用いて表現されることに着目する. 推移確率  $p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k})$  が, ハザード率 (12) の未知パラメータ  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_{M-1})$  の関数であることを明示的に示すために  $p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k} : \boldsymbol{\beta})$  と表記する. したがって, 対数尤度関数は (定数項を省略すれば),

$$\begin{aligned} \ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\Theta} : \boldsymbol{\beta}) &= \sum_{k=1}^K \sum_{r_k=1}^{T^k} \sum_{j=1}^M \bar{e}_j^{r_k} \ln \pi_j^{r_k} \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{r_k=1}^{T^k} \sum_{j=1}^M \bar{e}_j^{r_k} \ln \left\{ \sum_{i=1}^j \bar{\pi}_i^{r_k-1} p_{ij}^k(\bar{z}_{r_k} : \boldsymbol{\beta}) \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

と表される. 対数尤度関数 (20) を最大にするようなパラメータ値  $\boldsymbol{\beta}$  の最尤推定量は,

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\Theta} : \hat{\boldsymbol{\beta}})}{\partial \beta_{ih}} = 0 \quad (21)$$

$$(i=1, \dots, M-1; h=1, \dots, H)$$

を同時に満足する  $\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\hat{\beta}_{1,1}, \dots, \hat{\beta}_{i,h}, \dots, \hat{\beta}_{M-1,H})$  とし与えられる. さらに, パラメータの漸近的な共分散行列の推定量  $\hat{\Sigma}(\hat{\boldsymbol{\beta}})$  は,

$$\hat{\Sigma}(\hat{\boldsymbol{\beta}}) = \left[ \frac{\partial^2 \ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\Theta} : \hat{\boldsymbol{\beta}})}{\partial \beta_{ih} \partial \beta_{i'h'}} \right]^{-1} \quad (22)$$

と表すことができる<sup>36),37)</sup>. ただし, 上式の右辺の逆行列は  $\partial^2 \ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\Theta} : \hat{\boldsymbol{\beta}}) / \partial \beta_{ih} \partial \beta_{i'h'}$  を要素とする ( $M -$

1) $H \times (M-1)H$  次の Fisher 情報行列<sup>37)</sup>の逆行列である. パラメータの最尤推定量は,  $(M-1)H$  次元の非線形連立方程式 (21) を解くことにより得られる. 本研究では, ニュートン・ラフソン法により最尤推定量を求めることとした. 最尤推定量  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  を求めれば, 共分散行列の推定量  $\hat{\Sigma}(\hat{\boldsymbol{\beta}})$  を用いて  $t$ -検定統計量を推定できる.

## 4. ライフサイクル費用最小化モデル

### (1) 補修政策

「補修政策」の内容は, 長大橋を構成する主要部材  $k$  の各健全度  $j$  ( $j=1, \dots, M$ ) に対して選定された補修工法に基づいた「補修アクション」と「補修費用」の組により記述される.

管理者は, 劣化した部材の健全度を回復するために補修工法を選定する. 健全度に応じて補修工法を決定するルールを「補修アクション」と呼ぶ. いま, 部材  $k$  の補修アクションベクトル  $\boldsymbol{\eta}^\xi$  を,

$$\boldsymbol{\eta}^\xi = (\eta^\xi(1), \dots, \eta^\xi(M)) \quad (23)$$

と表す. ここに, 補修政策  $\xi \in \Xi$  は, 各健全度  $j$  に対して, その時点で実施する補修アクションを指定する一連のルールを表す. また,  $\Xi$  は部材  $k$  に対して適用可能な補修政策の集合を表す. 補修政策  $\xi$  を構成する補修アクション  $\eta^\xi(j) \in \eta(j)$  は, 健全度  $j$  に対して補修を実施し, 健全度が  $\eta^\xi(j)$  に推移することを意味する. 例えば,  $\eta^\xi(j) = j'$  は健全度  $j$  が観測された時に補修を実施し, 健全度  $j'$  まで回復するというアクションを表現する.  $\eta(j)$  は健全度  $j$  の部材  $k$  に対して採用可能な補修アクションの集合を表し, 補修アクション集合と呼ぶ. 補修アクション集合には, 「補修をしない」というアクションも含まれ,  $\eta^\xi(j) = j$  と表される. いま, 時刻  $t_r^z$  において点検・補修が実施された直後の部材  $k$  の健全度を状態変数  $\tilde{h}_k(t_r^z)$  を用いて表す. つぎに, 時刻  $t_{r+1}^z$  に点検が実施される. 点検後 (補修アクションが実施される前) の施設状態を  $h_k(t_{r+1}^z)$  と表す. つぎに, 補修政策  $\xi \in \Xi$  に従って, 補修アクションが実施された後の状態変数は  $\tilde{h}_k(t_{r+1}^z) = \eta^\xi(h_k(t_{r+1}^z))$  と表される. このとき, 部材の劣化・補修過程は, 1) 時刻  $t_r^z$  の補修後の状態変数ベクトル  $\tilde{\mathbf{h}}(t_r^z) = \{\tilde{h}_k(t_r^z) : k=1, \dots, K\}$ , 2) 時刻  $t_{r+1}^z$  の点検後に観測される状態変数ベクトル  $\mathbf{h}(t_{r+1}^z) = \{h_k(t_{r+1}^z) : k=1, \dots, K\}$ , 3) 時刻  $t_{r+1}^z$  の補修後に定義される状態変数ベクトル  $\tilde{\mathbf{h}}(t_{r+1}^z) = \{\tilde{h}_k(t_{r+1}^z) : k=1, \dots, K\}$  を用いて記述できる.

つぎに, 補修アクション  $\boldsymbol{\eta}^\xi$  に必要となる部材  $k$  の補修費用を費用ベクトル  $\mathbf{c}^\xi = (c^\xi(1), \dots, c^\xi(M))$  により表す. 部材  $k$  の健全度を  $j$  から  $j'$  ( $1 \leq j' \leq j$ ) へ回復させるための補修費用を  $c_j^{j'}$  と表せば,  $\eta^\xi(j) = j'$  の時,

$c^\xi(j) = c_j^{j'}$  が成立する. このとき, 補修費用は条件

$$c_j^{j'} \leq \dots \leq c_m^{j'} \leq \dots \leq c_M^{j'} \quad (24)$$

$$(j \leq m \leq M; j' = 1, \dots, j)$$

を満足すると仮定する. このことは補修前の健全度が悪い方が同一の健全度に回復するための費用が大きくなることを意味する. さらに, 部材  $k$  の補修政策  $\xi \in \Xi$  の内容は, 各健全度  $j$  に対して採用する補修アクション  $\eta^\xi(j)$  と補修費用  $c^\xi(j)$  の組  $(\eta^\xi(j), c^\xi(j))$  ( $j = 1, \dots, M$ ) により記述される. ただし, 社会基盤施設の任意部材の損傷に対して補修工法が豊富に存在していることは希であり, 現実的に設定することができる補修政策はたかだか有限個である.

## (2) 劣化・補修過程のモデル化

補修政策  $\xi \in \Xi$  に基づく補修アクションの内容は, 部材  $k$  の健全度  $h_k(t_{r+1}^z)$  に対して, 上述した補修アクションルールによって記述される. いま, 点検後の部材  $k$  の状態を  $h_k(t_{r+1}^z) = j$  とする. さらに, 補修政策  $\xi$  を適用することにより, 補修前後の当該部材の損傷状態は変化するが, このような損傷状態の推移関係を

$$q_{jj'}^\xi = \begin{cases} 1 & \eta^\xi(j) = j' \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases}$$

$$(j = 1, \dots, M; j' = 1, \dots, j) \quad (25)$$

と定義する. つまり, 補修が実施された後の健全度は確率 1 で健全度  $j'$  に推移し, 補修が実施されない場合は, 確率 1 で健全度  $j$  に止まることを示している. 以上の推移確率を  $Q^\xi$  として整理することにより, 次式を得る.

$$Q^\xi = \begin{pmatrix} q_{11}^\xi & q_{12}^\xi & \dots & q_{1M}^\xi \\ q_{21}^\xi & q_{22}^\xi & \dots & q_{2M}^\xi \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{M1}^\xi & q_{M2}^\xi & \dots & q_{MM}^\xi \end{pmatrix} \quad (26)$$

以上のような補修政策の下で管理される長大橋部材  $k$  の劣化・補修過程を健全度分布の推移として表現する. 部材  $k$  に対する目視点検が  $z$  期ごとに実施されると想定する. このとき, 基本期間 ( $t \leq z$  が成立する, 例えば  $t = 1$  期間) のマルコフ推移確率行列を用いて, 任意時点  $T$  における健全度分布  $s_k^{T,\xi}$  は,

$$s_k^{T,\xi} = s_k^{0,\xi} P^{z-1} \{QP^z\}^{\ell-1} QP^{\tau+1} \quad (27)$$

と表される (ただし,  $P$  はマルコフ推移確率行列であり,  $P$  と  $Q$  の添字  $k$  と  $\xi$  は略記している). ここで健全度分布  $s_k^{T,\xi}$  は, 補修政策  $\xi$  を採用したときに, 時点  $t = T$  における健全度分布を示した行ベクトルである. また, 上式中の  $\ell$  は時点  $T$  までの点検回数,  $\tau$  は最終点検の実施時点から時点  $T$  までの期間であり,  $T = \ell \cdot z + \tau$  が成立する. ただし, 初期時点  $t = 0$  において目視点

検と補修が実施されるものとする (この初回目視点検と補修は  $\ell$  にはカウントしない). さらに, 本研究においてはより単純化するために, 1) 健全度 1 では補修を実施しない;  $\eta^\xi(1) = 1$ , 2) いずれの補修工法を用いた場合であっても健全度は 1 に完全に回復する;  $\eta^\xi(j) = 1$  ( $j = 2, \dots, J$ ) という 2 つの仮定を設ける. なお, このような仮定を設けたとしても 6. の適用事例も含めて大半の問題に対しては実用性を損なうほどの影響はないものと考えている. 上記の仮定を設けない一般的な劣化・補修過程に関しては参考文献<sup>5)</sup>を参照されたい. ちなみに補修政策を考慮しない単純な劣化過程を健全度分布の推移で表現する場合には,  $Q$  を単位行列と考え, 次式を得る.

$$s_k^T = s_k^0 P^{z-1} \{P^z\}^{\ell-1} P^{\tau+1}$$

$$= s_k^0 P^{\ell z + \tau} = s_k^0 P^T \quad (28)$$

## (3) ライフサイクル費用の算出

現在時点における健全度分布  $s_k^{0,\xi}$ , 劣化過程に関する推移確率行列  $P_k$ , 補修政策  $\xi$ , 目視点検・補修の実施間隔  $z$  が決まれば, 将来時点  $t$  の健全度分布  $s_k^{t,\xi}$  を求めることができる. さらに, この健全度分布に対し, 各部材の補修費用を用いることで, 対象期間におけるライフサイクル費用を算出することが可能となる. 対象とする  $K$  個の部材全てに対して補修戦略  $\xi \in \Xi$ , 目視点検・補修の間隔  $z$  を採用した場合を想定する. 任意の部材  $k$  に対する現在時点の健全度分布を  $s_k^{0,\xi}$ , 劣化過程に関する推移確率行列を  $P_k$  とすると, 将来時点  $t$  の健全度分布  $s_k^{t,\xi}$  が前節の方法により求まる.

ここで, 時点  $t$  において補修が実施される場合に生じる費用に着目する. 補修戦略  $\xi \in \Xi$  に基づいて各健全度における補修の実施の有無, 補修工法が決まり, 各健全度における補修費用  $c_k^\xi = (c_1^\xi, \dots, c_j^\xi)$  が定まる. このとき, 部材  $k$  の時点  $t$  における期待補修費用は,

$$CM_k^{t,\xi} = \delta^{t,z} s_k^{t,\xi} \{c_k^\xi\}^T \quad (29)$$

となる. 式中  $\delta^{t,z}$  は, 点検・補修の実施の有無を表すダミー変数であり,

$$\delta^{t,z} = \begin{cases} 1 & \text{点検・補修が実施される場合} \\ 0 & \text{点検・補修が実施されない場合} \end{cases} \quad (30)$$

と定義できる. ここで 3.(2) で略記した部材グループに対する添え字  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) を再び考慮する. 合計  $L$  の部材グループで構成される長大橋の  $T$  期間のライフサイクル費用は,

$$LCC^{T,\xi}(z, w)$$

$$= \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+\rho)^t} [\delta^{t,z} \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{k_l=1}^{K_l} s_{k_l}^{t,\xi_l} \{c_{k_l}^{\xi_l}\}^T + w \right\}]$$

$$+ \sum_{u=1}^U \delta^{t,u} C_u \quad (31)$$

と表せる。ただし、式中  $\rho$  は割引率、 $w$  は1回あたりの長大橋の目視点検費用であり、 $C_u$  は目視点検以外に定期的に必要な費用、例えば塗装費用等である。また、 $\delta^{t,u}$  は式(30)と同様のダミー変数であり、当該費用  $C_u$  の発生を示す。以上より、ライフサイクル費用最小化を達成する点検間隔、補修政策を求める最適点検・補修政策モデルは、

$$\min_{z,w,\xi} \left\{ LCC^T \cdot \xi(z,w) \right\} \quad (32)$$

と定式化できる。通常、最適点検・補修政策を考える場合には、点検政策として点検間隔  $z$ 、補修政策として  $\xi$  を決定する問題に帰着できる。ただし、本研究のような長大橋の場合には後に6.で示すように点検手法も複数考えられる。したがって、モデルの定式化において点検費用  $w$  も政策変数として採用していることに留意されたい。なお、本研究では具体的な点検手法として、検査車を使用する場合と使用しない場合を考えているが、検査車を使用する場合を基本として、検査車を使用しない場合であっても同程度の近接目視が可能となるように点検足場費を計上することとした。そのため、点検手法の相違により損傷・劣化の検出精度に差は生じないものと考え、点検手法の相違は点検費用のみに反映させた。また、一般的には上述の方法によりライフサイクル費用最小化を達成する政策が最適点検・補修政策となるが、本研究では5.で述べるリスクも考慮した上で最適点検・補修政策を決定する。

## 5. フォルト・ツリー分析

### (1) フォルト・ツリー分析の目的

本研究の分析対象とする長大橋は、膨大な数の部材で構成される複雑な構造系である。これらの部材の劣化確率は時間経過とともに増加するために、長大橋全体のリスク発生確率も増加する。さらに、部材の劣化過程は多様に異なるために、劣化過程の不確実性を考慮した劣化予測を行う必要がある。したがって、現状の長大橋および部材の劣化発生過程をモデル化して、フォルト・ツリー分析を通して目視点検上の管理限界リスクの計量化を行うことで、将来の長大橋の点検・補修計画を立案するための基礎的情報を提供することができる。

本研究では、ある特定の長大橋を対象としたフォルト・ツリーを構築する。その際に、目視点検における管理限界リスクの発生をフォルト・ツリーの頂上事象として設定する。なお、本研究では、長大橋の常時の点検政策を対象としている。地震や事故などの突発的事

象に起因するリスク発生は考慮しない。突発的事象を考慮したリスク分析を行うためには、構造安全性の評価が不可欠であり、本研究の域を大きく超えるために、構造安全性リスク評価とともに別の機会に発表したいと考えている。

### (2) フォルト・ツリーの構成

フォルト・ツリー分析(以下、FTAと略記)は、部材レベルの劣化事象の発生が長大橋全体のリスクに発展するメカニズムを階層的に表現し、下位のレベルにある劣化事象の発生確率に基づいて、分析対象とするシステム全体の管理限界リスクを評価するための手法である。原子炉故障解析や航空工学などの分野の設計段階において多くの適用事例が存在している<sup>24)</sup>。FTAでは、はじめに、対象とする長大橋の全体としての限界状態を表す事象(頂上事象)を設定する。さらに、下位のレベルの劣化事象の発生と、頂上事象が発生する条件や因果関係を明らかにし、下位の劣化事象の発生が頂上事象の発生に展開する可能性をフォルト・ツリーを用いて表現する。事象間の因果関係を、ANDゲートとORゲートという論理構造を用いて表現することが可能である。下位事象の発生確率を用いて、より上位の劣化事象や頂上事象の発生確率を逐次算出することができる。さらに、頂上事象とその要因である下位事象の発生確率に基づいて、システムの安全性、信頼性を向上させるための対策方法を検討することが可能である。

6.の適用事例で取り上げる長大橋Aのフォルト・ツリーを図-2に示す。同図は、長大橋の常時における目視点検上の管理限界リスクの発生過程を、管理限界に影響を及ぼす部材の劣化事象によって構成したものである。目視点検における管理限界を頂上リスクに設定すれば、目視点検対象となる部材全てが下位事象として列挙されることになるが、本研究においては最終的に長大橋の構造上の安全性にいずれ影響を及ぼすと考えられる事象のみを選定することとした(目視点検では利用者に対する走行安全性や第三者被害についても着目しているが、本研究のフォルト・ツリーではこれらを末端事象として考慮していない)。対象とした長大橋Aの例では、管理限界に影響を及ぼす部材損傷として、「支承の損傷」「タワーの損傷」「桁の損傷」「ケーブルの損傷」「下部構造の損傷」をあげ、最終的には部材レベル(末端事象)の腐食やき裂など、それ以上要因を特定できない損傷まで遡っている。同図より明らかのように、今回のフォルト・ツリーにおいて各末端事象の関係はORゲートのみにより表現されている。厳密にはANDゲートで構成される部材損傷関係もあるものと考えられるが、本研究で扱う目視点検上の管理

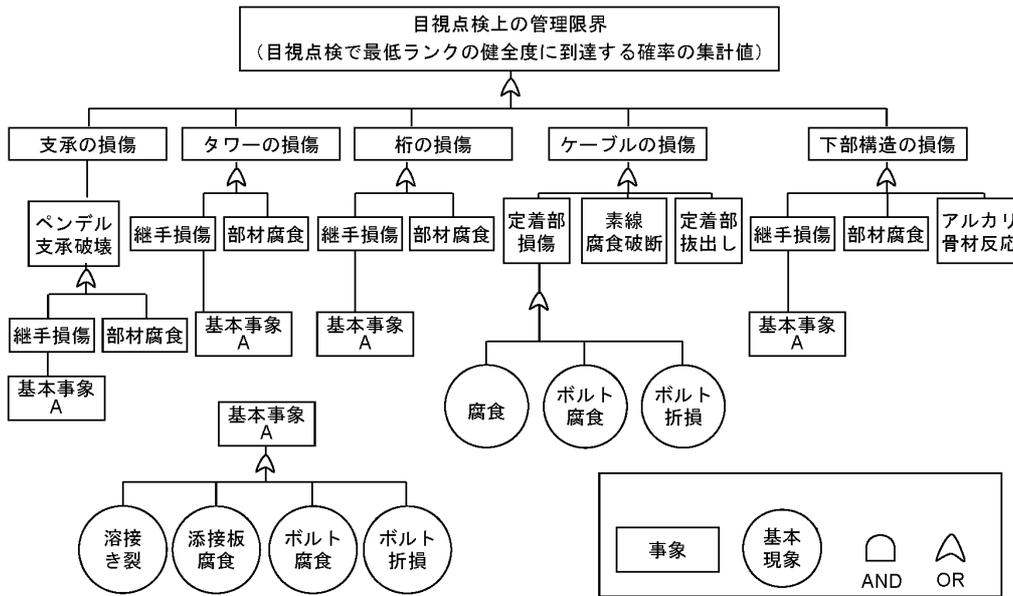


図-2 長大橋 A のフォルト・ツリー

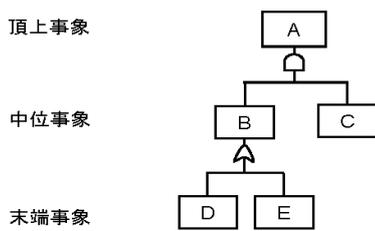


図-3 フォルト・ツリーの基本事例

限界の範囲内では OR ゲートのみで整理することが可能であった。ただし、より精緻なフォルト・ツリーについても、同様の手順を繰り返すことによってモデル化可能である。

### (3) 頂上事象の発生確率と期待影響度算定

静学的 FTA では、フォルト・ツリーを構成する部材レベルにおける損傷発生確率を与件として、長大橋の管理限界（頂上現象）の発生確率を計算することが重要な課題となる。いま、図-3 に示すような単純なフォルト・ツリーに着目し、より上位の故障事象が発生する確率の計算方法を説明する。

頂上事象として A、中位事象として B、C、末端事象として D、E を考える。いま、末端の損傷事象 D と E の損傷状態を、それぞれ状態変数  $\delta_D$ 、 $\delta_E$  を用いて表す。ただし、 $\delta_D$ 、 $\delta_E$  は、それぞれ損傷事象 D、E が管理限界に到達している（補修対象となっている）場合に 1 を、そうでない場合に 0 となるダミー変数である。このとき、一階層上位の中間事象 B の発生事象を表す

状態変数（ダミー変数） $\delta_B$  が、劣化事象 D と E に関する「OR 事象（事象 D と E のどちらか一方が生じた場合に生起する事象）」の場合

$$\delta_B = \delta_D + \delta_E \quad (33)$$

と表される。ただし、演算子「+」はブール則に従い、 $1+1=1$  が成立する。つぎに、頂上事象 A は、中間事象 B と C に関する「AND 事象（事象 B と C の両方が生じた場合に生起する事象）」であり、

$$\delta_A = \delta_B \times \delta_C \quad (34)$$

と表される。また、事象 A と事象 B が生起する確率  $P(A)$ 、 $P(B)$  は、それぞれ

$$P(A) = P(B)P(C) \quad (35a)$$

$$P(B) = P(D) + P(E) - P(D \cap E) \quad (35b)$$

と表される。

本件で対象とするような OR 事象で構成されるフォルト・ツリーに関しては、式 (35b) で表される同時生起確率を計算する必要がある。特に長大橋は数多くの部材で構成されることから、式 (35b) を直接計算した場合、非常に煩雑となる。そこで、 $K$  個の末端事象（同一部材グループの損傷）で構成されるフォルト・ツリーの中間事象、例えば図-3 の事象 B の発生確率を  $P(B)$  として、次のように定式化する。任意の部材  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) の劣化確率を  $P(k)$  とすると、式 (35b) で表される同時生起確率  $P(B)$  は、

$$P(B) = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - P(k)) \quad (36)$$

と表すことができる。

長大橋の末端事象（部材の損傷）の発生確率を与件として、以上の演算ルールを用いて、長大橋の頂上事象が発生する確率を計算することができる。しかし、部材劣化の累積的な発生確率は、初期時点からの経過時間とともに動的に変化する。したがって、長大橋の頂上事象の発生確率も時間とともに変化する。さらに、部材が劣化した場合には、適宜補修され、健全度が回復することになる。このような長大橋を構成する部材の劣化・補修過程と、それに伴う長大橋のリスク発生確率の動的変化を解析的に分析することが課題となる。この点に関して、本研究ではすでに4.で、補修政策 $\xi$ の下で部材 $k$ を管理したときの時点 $t$ における健全度分布 $s_k^{t,\xi}$ を算出する方法を示した。末端事象である部材 $k$ の目視点検による管理限界リスクの発生確率が目視点検で設定された最も健全性の劣る健全度 $M$ の発生確率と等価であることを考慮すると、上式 $P(B)$ に相当する部材グループ $l$ のリスク発生確率 $\mathfrak{R}_l^{t,\xi}$ は、

$$\mathfrak{R}_l^{t,\xi} = 1 - \prod_{k_l=1}^{K_l} (1 - s_{k_l}^{t,\xi}(M)) \quad (37)$$

と表せ、その時間的変化を把握することができる。フォルト・ツリーがORゲートのみで構成されている場合には、これ以外の部材グループはもとより、より上位事象や頂上事象のリスク発生確率も上式と同様の手順で算出することができる。

## 6. 適用事例

### (1) 解析の概要と条件

阪神高速道路では、昭和49年に供用を開始した港大橋を始めとして、合計19橋の長大橋を管理している。これらは建設年代や構造形式が多様多様であり、アセットマネジメントを考える上で特殊橋梁として位置づけられている。本研究では、それらのうちの一つである長大橋A（鋼斜張橋：1本柱1面ケーブル箱桁形式、支間長149m+355m+149m=653m、片側3車線）を対象として、そのライフサイクル費用と、目視点検上の管理限界リスクの発生確率を勘案しながら、最適な点検政策を決定する。ライフサイクル費用に関しては4.で、リスク発生確率に関しては5.で提案した方法論により算出する。ライフサイクル費用評価およびフォルト・ツリーの末端事象における損傷の発生確率は、3.で示したマルコフ劣化ハザードモデルをベースとし、同モデルを長大橋に対して実施された目視点検データを用いて推計する（ただし、今回対象とした長大橋Aにおいては、腐食に対する目視点検データはある程度蓄積されていたが、点検データが全くない損傷に対しては、技術者の主観的判断により劣化モデルを作成したことを予め断っておく）。

表-1 費用内訳（補修関連）

支承の損傷	溶接き裂	258
	添接腐食	66
	ボルト腐食	57
	ボルト折損	57
	部材腐食	400
タワーの損傷	溶接き裂	2,068
	添接腐食	527
	ボルト腐食	459
	ボルト折損	459
	部材腐食	3,200
桁の損傷	溶接き裂	24,036
	添接腐食	6,129
	ボルト腐食	5,334
	ボルト折損	5,334
	部材腐食	37,200
ケーブルの損傷	腐食	791
	ボルト腐食	688
	ボルト折損	688
	素線腐食破断	50,000
	定着部抜け出し	50,000
下部構造の損傷	溶接き裂	646
	添接腐食	165
	ボルト腐食	143
	ボルト折損	143
	部材腐食	1,000
	アルカリ骨材反応	2,000

注) 単位は千円で、損傷一箇所当たりの費用を計上した。例えば、溶接き裂の場合、き裂長が10cm~50cmの損傷に対して、当板補強を行うことを想定している。同じ溶接き裂であっても部位によって補修費用が異なるのは、補修足場等を考慮したためである。

ライフサイクル費用評価において、既に述べたように通常は補修政策の決定が主要な課題である。しかし本橋では、ある部材に生じた各種損傷に対する補修実績を反映し、補修単価に関しては実績値の平均を用いることとした。したがって、部材と損傷を特定した補修政策は現時点では固定的となるために、本研究は最適点検政策（点検手法と点検間隔）の決定問題に帰着される。点検政策に関しては、現状設置されている検査車および検査用エレベータ（以下、検査車と略記）を継続的に使用し、今後も検査車の使用を前提とした点検を実施するか否か、さらに点検間隔を何年にするか、という点検手法と点検間隔を決定することが実務上の課題となっている。そこで点検政策1として検査車使用、点検政策2として検査車不使用の2案を設定した。さらに、両政策において点検間隔は政策変数となる。ライフサイクル費用評価において計上する費用は、補修費用、点検費用： $w$ 、塗装費用： $C_1$ 、初期投資費用（設置から25年が経過し、老朽化した検査車の初期時点における撤去・新設費）： $C_2$ 、中期投資費用（検査車の初期時点以降の撤去・更新費用）： $C_3$ 、メンテナンス費用（検査車の点検・補修費用）： $C_4$ である。

各費用項目ごとに詳述する。なお、以下の各費用に

表-2 費用内訳 (点検, 塗装および検査車関連)

	点検政策 1 検査車あり	点検政策 2 検査車なし
点検費用: $w$ (そのうちの足場費用)	16,880 (0)	71,924 (42,144)
塗装費用: $C_1$	186,495	186,495
初期投資費用: $C_2$	179,950	20,410
中期投資費用: $C_3$	179,950	—
メンテナンス費用: $C_4$	2,085	—

注) 単位は千円。括弧内は点検に要する足場費用で、点検費用は足場費用を含んだ金額である。また、塗装費用には足場費用を含んでいないが、点検政策 2 で塗装を実施する場合には点検時と同額の足場費用を計上した。

関しては過去の実績等を参考にしたものであるが、今回の分析のために改めて便宜的に試算した結果であることを断っておく。本研究では点検政策 1 と点検政策 2 のいずれを採用したとしても損傷の検出精度は同じであると仮定した。したがって、同一の点検間隔のもとでは、両政策の補修費用は同額となる。ライフサイクル費用評価で必要となる補修費用の内訳を表-1 に示す。なお、表-1 においては既述のとおり、各損傷に対して補修工法は 1 種類しか設定していない。さらにそれらの補修工法はいずれも最も健全性の劣るランクの健全度に到達した時点で実施するものと考えた。したがって、ある部材の損傷に対する補修政策は 1 種類のみを設定となった。

また、補修費用以外に必要な各費用を表-2 に計上するが、点検費用:  $w$  には点検用の足場費用も含む。足場費用に関しては、点検政策 1 の場合には検査車の使用が可能であるので点検足場の設置が不要となるために、点検費用総額を点検政策 2 よりも低く抑えることができる。また、足場費用を除いた点検費用も点検政策 1 の方が低くなっているが、これは検査車を使用しない場合には、箱桁外面や張出し床版の点検に特殊検査車が必要となるためである。

塗装費用:  $C_1$  に関しては、点検手法によらず、定期的に支出が必要となる費用であるので、両政策で同額とした。ただし、 $C_1$  には足場費用を含んでおらず、点検政策 2 においては点検に要する足場費用と同額を別途計上した。一方、点検政策 1 に関しては、検査車の利用ではカバーできない部材に対する足場費用のみを計上した。なお、具体的な塗装周期を 10 年と設定し、点検と塗装が同年に実施される場合には塗装足場費用は計上しないこととした。

点検政策 1 には、検査車を保有することに伴う費用が発生する。初期投資費用:  $C_2$  は老朽化した検査車を撤去し、新しい検査車を新設するための費用である。中長期投資費用:  $C_3$  は検査車を 30 年ごとに更新する費用であり、初期投資費用と同額に設定した。また、メ

表-3 定期点検の判定区分<sup>38)</sup>

判定区分	損傷状況	適用
S1	機能低下が著しく、道路構造物の安全性から緊急に対策が必要である場合。	緊急に対策を実施すべきである。それが出来ない場合は、少なくとも応急的な処置を行い当面の安全性を講ずる必要がある。
S2	第三者への影響があると考えられ、緊急に対策の必要がある場合。	同上。
A	機能低下があり、対策の必要がある場合。	実務的に可能な限り早急に対策を講ずる必要がある。
B	損傷の状態を観察する必要がある場合。	原則として次回点検までに対策を実施する必要はないが、他の補修計画を考慮したうえで計画的に補修するのが良い。
C	損傷が軽微である。	
OK	上記以外の場合。	

注) S1 と S2 は緊急に対策を実施する必要があるという点においては、同じ意味であるので本研究では単に S として統一的に記載する。

表-4 鋼構造物の判定区分 (さびおよび腐食)<sup>38)</sup>

工種	鋼桁および鋼製橋脚
S	損傷が著しく、落橋など、重大事故に結び付く危険性、および第三者障害を招く可能性がある損傷。
A	断面欠損が部材厚の 10% 以上ある。
B	1. 広い範囲にさびが発生している。 2. 点在した腐食が発生している。
C	点在したさびが発生している。

ンテナンス費用:  $C_4$  は毎年計上される費用である。なお、点検政策 2 は初期時点において既設の検査車を撤去するための撤去費用のみが初期投資費用として計上される。

## (2) ハザードモデルの推計結果

目視点検データを利用してマルコフ劣化ハザードモデルを推計する。阪神高速道路では、長大橋に対する目視点検に関して、同社「道路構造物の点検要領」<sup>38)</sup>に基づき部材の健全度を 5 段階 (OK, C, B, A, S) で評価している (表-3, 表-4 に抜粋)。しかしながら、長大橋は数量が少ないために、統計的推計を行うのに十分な健全度 (サンプル数) を蓄積することが困難であり、通常マルコフ劣化ハザードモデルの非集計的推計法を適用することは現実的ではない。そこで、3. で提案した集計的推計法を適用することにより、ハザードモデルの推計を試みる。また、サンプル数の確保という観点から現行の 5 段階評価に対して、健全度 A と S を同一ランクとした 4 段階評価を採用する。実務的に

表-5 長大橋 A の桁の腐食に対する目視点検結果

	OK	C	B	A&S
供用開始時点	186	0	0	0
0年経過	(1.0)	(0)	(0)	(0)
第1回点検	139	39	8	0
5年経過	(0.747)	(0.210)	(0.043)	(0)
第2回点検	127	32	27	0
11年経過	(0.683)	(0.172)	(0.145)	(0)
第3回点検	106	32	47	1
21年経過	(0.570)	(0.172)	(0.253)	(0.005)

注)( )内は各点検時点におけるそれぞれの健全度の相対頻度(健全度分布)を表す。また、これらには補修により健全度が回復した部材も含んでいるが、ハザードモデルの推計ではそれらを除外した健全度分布を用いた。

表-6 ハザードモデルの推計結果

	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
推計値	0.087	0.140	0.018
t-値	49.6	37.2	18.1

は、健全度 A と S は、いずれの場合であっても補修を実施する必要があるという意味においては同じであるが、補修の実施時期(緊急性)に差異がある。しかし、本研究では点検時に検出された A, S ランクの損傷に対しては、その直後に補修を行うことを仮定したために、両者を統合的に考えることに支障はないと判断した。

長大橋 A の各損傷のうち、例えば「腐食」に着目する。長大橋 A では、これまで合計 3 回の目視点検が実施されている(第 1 回: 5 年経過時点, 第 2 回: 11 年経過時点, 第 3 回: 21 年経過時点)。また、供用開始から 2010 年時点において 25 年が経過していることから、健全度 A&S に相当するような腐食損傷もごく少数ではあるが、確認されている。表-5 に一例として、桁構造に対する 3 回の目視点検の結果を示す。同表から読み取れるように、目視点検の対象部材総数は 186 部材である(当該橋梁は 1BOX 構造であるため、橋軸方向には主桁ダイヤフラムで 62 分割、橋軸直角方向には主桁腹板で 3 分割して総区分数を 186 と設定し、これを部材数と定義した)。供用開始時点では点検対象とした全部材の健全度が OK であるのに対して、経年とともに徐々に腐食損傷が進行していることが確認できる。また、同表中の括弧内は、各点検時点におけるそれぞれの健全度の相対頻度(健全度分布)を示している。

表-5 に示した健全度分布(厳密には、補修により健全度が回復した部材を除外した後の健全度分布であり、表-5 とは異なる)とそれぞれの目視点検間隔という情報を利用して、ハザードモデルを集計的に推計した結果を表-6 に示す。いずれの未知パラメータに対する推計結果の t-値は 1.96 以上であり、有意水準 5% のもとで統計的に有意性が確保されている。また、この結果か

表-7 マルコフ推移確率

	OK	C	B	A&S
OK	0.916	0.078	0.0057	0.000
C	0	0.869	0.131	0.001
B	0	0	0.981	0.018
A&S	0	0	0	1

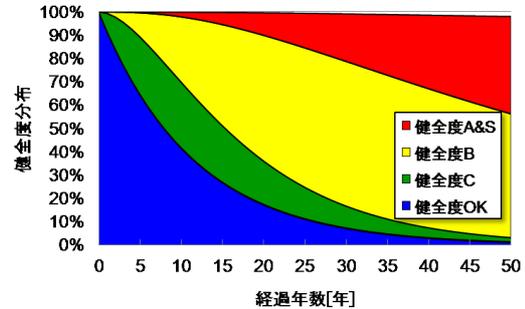


図-4 腐食の健全度分布

ら算出したマルコフ推移確率を表-6 に示す。表-7 のマルコフ推移確率は点検間隔を 1 年 ( $z = 1$ ) としたときの推移確率を表している。例えば、推移確率行列の左上の値が 0.916 となっているが、これは現在健全度 OK と評価された部材が 1 年後に再び健全度 OK と評価される確率が 0.916 であることを意味している。また、いずれの健全度においても行列の対角成分が最も大きな確率を与えることがわかる。これは、1 年という期間を考えると、腐食の進行は相対的に緩やかであり、ほとんどの部材が前回と同様の健全度を維持する傾向にあると言える。一方、マルコフ推移確率に基づいて健全度分布を算出した結果を図-4 に示す。これから、長大橋 A における腐食は、健全度 A&S が現在時点(経年 25 年時点)で 15% 程度発生していることがわかる。その後、健全度 A & S は経年 50 年で 40% 程度発生することになる。また同図より、腐食損傷においては健全度 OK という最も良い状態にある部材が約 10 年程度で 50% 程度に低下すること、50 年経過時点では大半の部材が健全度 B となってしまうことが読み取れる。なお、同図は、初期時点  $r_k = 0$  とした健全度分布  $\pi_k^0$  を

$$\pi_k^0 = (1, 0, 0, 0) \quad (38)$$

と設定し、式(28)に基づいてそれ以降の健全度  $\pi_k^t$  を算出した。

今回のライフサイクル費用およびリスクの評価においては、健全度 A & S の発生確率が、要補修部材およびフォルト・ツリーの末端事象の発生確率に相当する。このように目視点検データに基づいた劣化予測が最適点検・補修政策の意思決定における基礎情報となっている。

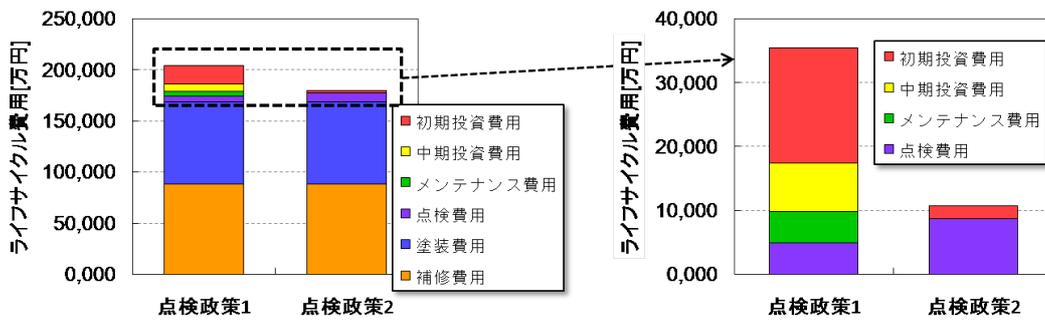


図-5 ライフサイクル費用の比較 (点検間隔 7年)

### (3) ライフサイクル費用評価

ライフサイクル費用を算出するに際して使用した全ての費用は表-1と表-2に示した通りである。今回のライフサイクル費用評価では、点検方法として検査車と検査用エレベータ（以下、単に検査車と略記）を使用する場合（点検政策1）と、検査車を使用しない場合（点検政策2）に着目する。当然ながら、検査車を使用する場合には、点検時に足場を組む必要がないために、1回の点検費用は検査車を使用しない場合と比較して小さくなる。しかしながら、検査車を使用する場合には、検査車のメンテナンスのための費用が毎年定期的に必要なとなる。また、検査車も老朽劣化するために、30年に一度更新を行うと仮定した。更新には既設の検査車の撤去費用と新しい検査車の新設費用が必要となる。検査車を使用しない場合であっても、長大橋Aには現状で検査車が設置されているので、検査車を撤去する費用が初期時点で必要となる。なお、本来であれば、点検手法の相違により、劣化や損傷に対する検出可能性が異なってくる。しかし4.(3)で述べたように、本研究ではそのような影響を考慮せず、いずれの点検手法でも劣化や損傷は全て検出可能と考える（逆に対象部材を全て点検可能となるように検査車を使用しない場合の費用を積算している）。これらの費用に関する条件のもとで、長大橋を永続的に管理していくためのライフサイクル費用を算出した。なお、ライフサイクル費用の評価に際しては割引率を4% ( $\rho = 0.04$ ) と設定している。以上の条件のもとで、検査車を使用する場合（点検政策1）、使用しない場合（点検政策2）のライフサイクル費用を、点検間隔を政策変数として算出した。

長大橋Aの永続的使用を前提とし、さらに点検間隔を7年とした時の点検政策1と2のライフサイクル費用を一例として図-5に示す。なお、本橋における目視点検とは接近目視であり、点検間隔は社会・経済情勢を踏まえ、実際の損傷特性や当該部材へのアクセスの容易さなどを考慮して決定している。阪神高速道路では、点検要領<sup>38)</sup>において定期点検（接近目視を主体とした

点検）の頻度を5~8年に1回と定めているが、損傷が進行した部材やアクセスが容易な重要部材に対しては1年に数回の目視点検を実施する場合もある。一方で、提示した点検間隔7年は、以上の条件を勘案して決定した、桁外面（検査車による点検対象部材）に対する現行の実質的な点検間隔である。本研究では、さらに点検間隔7年と既設の検査車を使用する点検政策1との組み合わせをベンチマークと考える。この解析結果では、検査車を使用しない点検政策2のライフサイクル費用の方が小さいとの結果を得た。塗装費用と補修費用は両政策において同額であるので、それら以外の費用のみを抽出し、比較した結果も同図に併せて示す。事前に想定したとおり、検査車を使用する場合には足場を設置する必要がないために、目視点検そのものに要する費用は低減される。しかしながら、長大橋Aは供用開始から25年が経過しており、既設の検査車の更新を初期時点で実施しなければならず、初期投資が検査車を使用しない点検政策2と比較して大きくなってしまふ。また、検査車の更新（中期投資費用）やメンテナンス費用についても一定の割合を占めており、ライフサイクル費用を増大させる原因となっている。最終的に、検査車に投資する費用負担が大きく、検査車を使用しない場合の方がライフサイクル費用の観点からは有利となる。さらに、この傾向は点検間隔を3年、5年、10年、15年、20年と変化させていった場合（点検間隔が塗装間隔の倍数でない場合も含む）でも同様であった。また、今回の分析では同額とした塗装費用と補修費用に関しても、重防食系の塗装を使用することで塗装周期を延伸させたり、点検手法の相違による損傷の検出能力の差異を評価することで、分析結果の精度の高度化を図ることは可能である。

### (4) フォルト・ツリー分析の結果

フォルト・ツリーの頂上事象の発生確率を算出する。すでに述べた通り、末端事象の発生確率（各損傷の健全度A&Sの発生確率）は経年的に変化する。さらにフォ

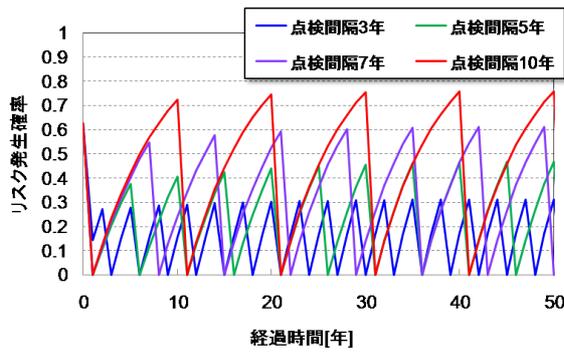


図-6 管理限界リスク（頂上事象）の発生確率

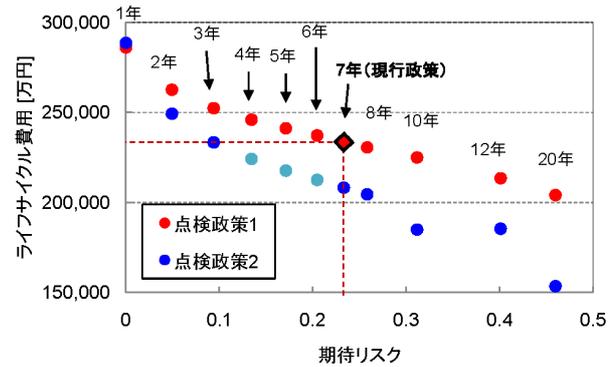


図-7 最適点検政策

ルト・ツリーの構成が異なれば、頂上事象の発生確率は当然変化する。ここでは、長大橋 A の目視点検上の管理限界リスクを頂上事象として捉え、その発生確率の期待値の時間的変化を分析する。今回の分析においては地震や事故などの突発的事象を考慮していない。また、それぞれの下位事象（部材の劣化）は目視点検によって検出され、適宜補修されることから、当該の末端事象の発生確率は目視点検間隔に依存することになる。したがって、設定した目視点検間隔の数だけ頂上事象の発生確率パスを得ることができる。図-6には長大橋 A に対するフォルト・ツリーの頂上事象の発生確率とその時間的変化を示す。図中には、目視点検間隔が 3, 5, 7, 10 年の合計 4 ケースを示している。頂上事象の発生確率は目視点検が実施される（補修が実施される）までは上昇しつづけ、補修と同時に 0 となる。これは今回の補修に対して予算制約を設定していないことから、発見された損傷は全て補修されることに起因している。しかし、その一方で例えば各リスク発生確率のピーク値に着目すると、時間の経過とともに緩やかながら増加傾向にあることが読み取れる。また、点検間隔の相違で比較すると、当然ながら、点検間隔が大きくなると、頂上事象の発生確率は高くなる。リスク発生確率という観点のみを考慮すれば、長大橋 A の点検間隔が短ければ短いほどリスク発生確率が低減されることになる。なお、末端事象は部材に対する目視点検の結果に基づいている。したがって、部材レベルでは補修が必要な損傷（目視点検マニュアルでは補修が必要な損傷）であっても、その影響は長大橋全体の構造安全性という視点においては極めて限定的である。そのような末端事象で構成されたフォルト・ツリーの頂上事象は橋梁全体の構造安全性とは直接的にリンクしないことを改めて述べておきたい。

### (5) 最適点検政策の評価

検査車を使用する点検政策 1、使用しない点検政策 2 のそれぞれに対して、点検間隔ごとに 6.(3) のライフサイクル費用と 6.(4) のフォルト・ツリー分析の結果（図-6 の各リスク発生確率の期待値）を 2 次的に図-7 に整理した。同図は縦軸にライフサイクル費用を、横軸にリスク発生確率の期待値を取っている。点検手法の相違、さらには点検間隔の相違がライフサイクル費用とリスク発生確率の期待値に及ぼす影響を容易に把握することができる。図中に青でプロットした点検政策 2 の場合では、塗装間隔 10 年の倍数と一致する点検間隔 10 年と 20 年においては、足場費用を縮減できることにより、ライフサイクル費用が相対的に小さくなっていることがわかる。また、2 つの点検手法を比較した場合、点検間隔 1 年を除いて、すべて検査車を使用しない点検政策 2 の方がライフサイクル費用が小さい。したがって、本研究の条件下での長大橋 A において、検査車を使用することの経済的な優位性は点検間隔を 1 年以内に設定する場合にのみ確認することができる。

図-7 中において、ライフサイクル費用とリスクを同時に最小化するケースが最適な点検政策（点検手法と点検間隔）といえる。しかしながら、一般的にライフサイクル費用とリスクの間にはトレードオフの関係が成立するために、同時に両方を最小化するような政策を一意に決定することは難しい。そこで、今回の場合は、現行の点検政策をベンチマーク（点検政策 1、点検間隔 7 年）として、ベンチマークとの相対比較により最適点検政策を決定する。具体的に図-7 で確認すると、ベンチマークよりもライフサイクル費用とリスクが両方とも小さくなる点（図中の赤枠内の点）が 3 点存在することがわかる。すなわち、点検間隔が 4 年、5 年、あるいは 6 年で、かつ検査車を使用しない場合である。これらのうちのいずれを採用するかは、ライフサイクル費用とリスク発生確率のバランスを勘案しながら、すなわち、ライフサイクル費用については予算制約を、リ

スクに関しては管理者が設定する維持管理水準を、それぞれ勘案しながら工学的な判断により決定することが必要となる。例えば、ベンチマークに着目して、現在の点検政策1を2に変更するだけでもリスク発生確率は同一であるにも拘わらず、ライフサイクル費用は約10%低減できる。また、後者と点検政策2の点検間隔3年を比較すると、ライフサイクル費用は約10%増加するが、リスク発生確率は半減以下となる。これを工学的に有意とみなすか否かは管理者個々により異なるために一意に決定できるものではない。しかしながら以上のような方法論に基づき、技術者が議論を交わすことで意思決定のプロセスが高度化され、維持管理に関する知識が形成されることになる。

なお、重複を恐れずに記述するが、本研究の目的は、1) 目視点検データ(蓄積された既存情報)を用いた劣化予測により、2) ライフサイクル費用とリスク発生確率を算出し、3) 長大橋の最適点検政策を決定するための方法論を提示することにある。この意味において著者らは設定した研究目的(方法論の枠組みの構築)を達成できたと考えている。しかし一方で、現時点で得られている情報は限定的なものであり、解析の一部においては情報不足を補うための仮定を設けざるを得なかった。当然、著者らはその仮定の設定により、解析結果および結論が変動する可能性についても認識をしている。この点に関しては新規データが蓄積された時点で再度解析を行うといった継続的な検討を通して、精緻化に努めることが必要であることは言うまでもない。また本研究においては、検査車を使用しない点検政策が最適点検政策として選定されたが、この点についても補足しておきたい。これは長大橋Aの構造的特徴、すなわち1面吊斜張橋であることが最大の要因であると考えている。これに加えて、検査車の老朽化によるそれ自身に対するメンテナンス費用が当初予想より大きくなっていること、その一方で大型橋梁点検車のような代替となる点検技術が進展してきたこと、も重要な要因としてあげられる。特に1面吊斜張橋であることから、大型橋梁点検車を全面的に活用した点検が可能(検査車による目視点検範囲である橋梁下面を点検可能)であることが、メンテナンス費用を要する検査車を保有し続けるという点検政策よりも費用とリスクの両面で有利に働いた。ちなみに、著者らはすでに同様の検討を他の長大橋にも展開している。例えば、2面吊斜張橋を対象とした分析においては、橋梁点検車による目視点検範囲が限定されることから、検査車を使用した政策の方が有利であるとの結論を得ている。本研究による最終アウトプット(点検手法や点検間隔)そのものは対象橋梁や条件設定により変動し得る。それよりはむしろ、フォルト・ツリー分析に基づく方法論を構築

した点、このような意志決定問題に対して技術者間で議論できるような基礎的情報を提示したことに本研究の価値を見いだして欲しい。

## 7. おわりに

本研究では、長大橋のような特殊構造物の最適点検政策(補修政策)を決定するための方法論を提案した。具体的には、阪神高速道路の長大橋Aに着目し、ライフサイクル費用とリスク発生確率の観点からそれらを最小化する点検政策(点検間隔と手法)を求めるものである。このとき、ライフサイクル費用とリスク発生確率を解析する上で基幹技術となる劣化予測に関しては、目視点検データに基づくマルコフ劣化ハザードモデルの集計的推計法を用いた。さらに、リスクに関しては、目視点検上の管理限界状態として想定する頂上事象を定め、頂上事象の原因となる下位事象をフォルト・ツリーで構成し、下位事象の発生確率をマルコフ劣化ハザードモデルで与えることで頂上事象の発生確率の経時変化を算出した。最後に、これらの手法を実際の長大橋へ適用し、検査車を使用する場合と使用しない場合を主たる意思決定問題として解析を行うことで、提案手法の有効性を実証的に確認した。

本研究は現状の点検体制を通して獲得できる情報をもとに長大橋の点検政策を決定するための方法論を提案するという実用性の高い研究であると考えている。しかし、その一方で本方法論を通して得られた解析や分析の結果(数値)は、仮定や条件の設定の相違により多様に変動することに留意されたい。さらに、今後の課題として以下をあげる。第一に、方法論の高度化がある。提案手法は目視点検を主体としており、フォルト・ツリーの頂上事象に対しても目視点検による管理限界を超えるリスクと定義した。一方で構造安全性を考慮した問題に対する実務的要請が強いことも事実である。実際に目視点検で最も健全性の劣るランク(S1, S2, A)の評価となったとしても長大橋の構造安全性にはすぐに直結しない事例も多い。経済状況が回復しない状況において、団塊的に老朽化が進む社会基盤施設群を効率的に管理していくためには、構造安全リスクをフォルト・ツリーの頂上事象として設定することは極めて重要である。したがって、事前検討として有限要素モデル等を用いて部材の耐久性や耐力といった構造性能が管理限界を下回るリスクを推計することが必要となる。このような場合には、力学的手法と統計的手法を組み合わせたようなハイブリッド型の劣化予測手法<sup>39)</sup>を構築する必要がある。第二に、本研究においては常時の維持管理を対象としており、地震や事故などの突発的事象に起因するリスクは考慮していない。このような

突発的事象を考慮すれば、管理限界値を安全側に設定することになるために、最適点検政策に何らかの影響を及ぼすものと考えられる。第一の課題と同様に、有限要素モデルにより、水平方向荷重の作用に対する構造安全性を検討するとともに、地震発生を確率事象として表現したリスクシミュレーションの開発が必要となる。第三に点検手法を多様化することがあげられる。今回の解析では、検査車を使用する場合と使用しない場合の2種類を設定した。しかしながら、新しい点検手法も含めると、点検手法の組み合わせは多数あり、最適な点検間隔を決定するためには、実用性を保ちつつも、多様な点検政策を考えることが望ましい。さらに、点検手法による「点検の質」も考慮すべきであろう。点検手法によっては、検出が難しい損傷があり、見落とすリスクも伴う。また、本研究では考慮しなかった予算制約、さらには予算制約時の補修優先順位について検討することが今後必要となる。第四に異なる橋梁間の相対的なリスク評価が可能ならリスク管理指標の設定があげられる。管理者は膨大な数の社会基盤施設を管理しており、維持管理、補修・補強に関する意思決定を様々な制約のもと、実施していくことが実務上重要となる。本研究で着目したような長大橋は部材数が多く、管理面積も広い。一般的な橋梁と比較して道路ネットワークを形成する上での重要性が高く、維持管理が難しいことも管理者としては理解しているところではある。しかし、このような構造的な性能のみで決めることができない維持管理の困難さなどを橋梁間で相対的に定量評価するための方法論や指標は存在しない。

本研究を遂行するにあたり、(財)阪神高速道路管理技術センター「阪神高速道路の長大橋点検手法合理化検討会」の吉川紀委員長、長井正嗣副委員長をはじめとする委員各位から貴重な助言を賜った。ここに感謝の意を表す。本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。また、アセットマネジメント全般に関して、第一著者は日頃より京都大学経営管理大学院・小林潔司教授からご指導を賜っている。

## 参考文献

- 1) 小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集，No.793/IV-68，pp.59-71，2005.
- 2) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャのマネジメント：研究展望，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.15-27，2003.
- 3) 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.
- 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.68-82，2005.

- 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) 織田澤利守，石原克治，小林潔司，近藤佳史：経済的寿命を考慮した最適修繕政策，土木学会論文集，No.772/IV-65，pp.169-184，2004.
- 7) 青木一也，貝戸清之，小林潔司：ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響，土木計画学・研究論文集，土木学会，Vol.23，No.1，pp.39-50，2006.
- 8) 坂井康人，慈道充，貝戸清之，小林潔司：都市高速道路のアセットマネジメントーリスク評価と財務分析ー，建設マネジメント論文集，土木学会，Vol.16，pp.71-82，2009.
- 9) 保田敬，小林潔司：BMSにおける点検結果と状態推移確率がLCCに及ぼす影響，建設マネジメント論文集，Vol.11，pp.111-122，2004.
- 10) 杉崎光一，貝戸清之，小林潔司：目視検査周期の不均一性を考慮した統計的劣化予測手法の構築，構造工学論文集，Vol.52A，pp.781-790，2006.
- 11) 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.29-38，2003.
- 12) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 13) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 14) Mishalani, R. and Madanat, S.: Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, *ASCE, Journal of Infrastructure Systems*, Vol.8, No.4, 2002.
- 15) 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2005.
- 16) 貝戸清之，熊田一彦，林秀和，小林潔司：階層型指数劣化ハザードモデルによる舗装ひび割れ過程のモデル化，土木学会論文集F，Vol.63，No.3，pp.386-402，2007.
- 17) 津田尚胤，貝戸清之，山本浩司，小林潔司：ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推定法，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2006.
- 18) 貝戸清之，小林潔司：マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定，土木学会論文集A，Vol.63，No.2，pp.336-355，2007.
- 19) 小林潔司，熊田一彦，佐藤正和，岩崎洋一郎，青木一也：サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル，土木学会論文集F，Vol.63，No.1，pp.1-15，2007.
- 20) 小濱健吾，岡田貢一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，土木学会論文集A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008.
- 21) 堀倫裕，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：下水処理施設の最適点検・補修モデル，土木計画学・研究論文集，土木学会，Vol.25，No.1，pp.213-224，2008.
- 22) 貝戸清之，小林潔司，加藤俊昌，生田紀子：道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク，土木学会論文集F，Vol.63，No.1，pp.16-34，2007.
- 23) 小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，加藤俊昌，生田紀子：道路障害リスクと道路巡回の合理化方策，建設マネジメント論文集，土木学会，Vol.14，pp.87-98，2007.
- 24) Bedford, T. and Cooke, R.: *Probabilistic Risk Analysis*, Cambridge University Press, 2001, 金野秀敏訳：確率的リスク解析，基礎と方法，シュプリンガー・ジャパン，2006.
- 25) 大津宏康，大矢敏雄，水谷守，鶴沢哲夫：企業における地震時対策機能の実用性に関する検討，地震工学研究発表講演論文集，Vol.24，pp.1245-1248，1997.
- 26) 竹林亜夫，滝沢文教，木村正樹，三上元弘，奥井裕三：湧水によるトンネル切羽の不安定化に関する地震工学的

- 研究, トンネル工学報告集, Vol.14, pp.61-68, 2004.
- 27) 山本浩司, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化現象を考慮した大規模交通管制システムの動的故障解析, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.3, pp.295-310, 2008.
- 28) Dugan, J. B., Bavuso, S. J. and Boyd, M. A.: Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems, Reliability, *IEEE Transactions*, Vol.41, pp.363-377, 1992.
- 29) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research, Part B*, Vol. 27B, pp. 425-438, 1993.
- 30) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal maintenance and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- 31) Durango, P. and Madanat, S.: Optimal maintenance and repair policies for infrastructure facilities under uncertain deterioration rates: An adaptive control approach, *Transportation Research, Part A*, Vol.36, pp.763-778, 2002.
- 32) 例えば, White, D. J.: *Markov Decision Process*, Wiley, pp.130-146, 1993.
- 33) 例えば, Eckles, J. E.: Optimal maintenance with incomplete information, *Operations Research*, Vol.16, pp.1058-1067, 1968.
- 34) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-67, pp.105-116, 2005.
- 35) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修政策, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 36) 磯田和男, 大野豊: 数値計算ハンドブック, オーム社, 1990.
- 37) 森棟公夫: 計量経済学, 東洋経済新報社, 1999.
- 38) 阪神高速道路株式会社: 道路構造物の点検要領, (財) 阪神高速道路管理技術センター, 2005.
- 39) 下村泰造, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 空港舗装のアセットマネジメントのためのハイブリッド地盤沈下モデル, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.4, pp.463-483, 2008.

(2010. 5. 31 受付)

## OPTIMUM INSPECTION POLICY FOR LONG SPAN BRIDGE BASED ON FAULT TREE ANALYSIS WITH VISUAL INSPECTION DATA

Kiyoyuki KAITO, Hidesada KANAJI, Hiroshi KOBAYASHI, Nobuhiro MASHIMA,  
Hideo OHISHI and Kodai MATSUOKA

This paper proposes a decision making methodology on an optimal inspection method/cycle for long span bridges, based on the two evaluation items: lifecycle cost and risk probability. Firstly, the authors formulate the aggregative Markov deterioration hazard model using visual inspection data, and propose a model for minimizing lifecycle cost. In addition, the authors express the risk of the management limit in the visual inspection of a long bridge with a fault tree, and calculate the probabilities of events constituting the fault tree with the Markov transition probability. Then, it becomes possible to grasp the variation in risk probability due to the difference in inspection and repair policies. Finally, the proposed method is applied to the actual case of determining an optimal inspection policy, to discuss its effectiveness empirically.