

# 鋼材腐食ハイブリッド劣化予測とフォルト・ツリー分析を用いた長大橋の最適点検間隔

貝戸清之<sup>1</sup>・金治英貞<sup>2</sup>・杉岡弘一<sup>3</sup>・大石秀雄<sup>4</sup>・松岡弘大<sup>5</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 阪神高速技研株式会社 技術部 設計課 (〒 550-0011 大阪市西区阿波座 1-3-15)

E-mail: koichi-sugioka@hanshin-exp.co.jp

<sup>4</sup>非会員 一般財団法人 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>5</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費用の総和で定義されるトータル費用最小化に基づき、長大橋の最適点検間隔を決定するための方法論を構築する。具体的な劣化事象として鋼材腐食に着目する。はじめに、腐食理論式を用いて、部材ごとに鋼材腐食過程のサンプルパスを発生させ、同時に構造解析により腐食量の限界値を算出する。つぎに、サンプルパスの荷重平均に基づく腐食統計モデルを定式化し、それを目視点検データで修正するようなハイブリッド劣化予測手法を提示する。さらに、この劣化予測結果に基づき、1) ライフサイクル費用、2) フォルト・ツリー分析による落橋相当リスクの発生確率およびリスク費用を算出し、最適点検間隔を決定する。最後に、提案手法を実際の長大橋の点検間隔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, hybrid deterioration prediction method, long span bridge, optimum inspection interval, asset management*

## 1. はじめに

多種多様な部材で構成される複雑な構造システムを対象として維持管理に関する意思決定を行う場合には、1) 一部材の劣化・損傷が進展する過程、2) それらが集約化されることによって構造システム全体の安全性に影響を及ぼす過程（以下、リスク発生過程）をモデル化することが重要となる。複雑な構造システムのリスク発生過程を表現する一手法としてフォルト・ツリー分析<sup>1)</sup>がある。フォルト・ツリーを構築することで、リスク発生過程の論理的順序を俯瞰的に把握できる。さらに、末端事象の生起確率を論理的規則に従って集計化することで、頂上事象の生起確率を算出することが可能である。

本研究では具体的な構造システムとして長大橋を取り上げ、その点検間隔に関する意思決定問題を扱う。現状の点検は目視を主体として、基準類や体制が整備されている。そのような状況を踏まえ、すでに貝戸等<sup>2)</sup>は目視点検データを用いた長大橋の最適点検間隔の決定手法を提案している。しかし、目視点検は部材の劣化をその外観状態に基づいて部材個々に独立に評価するものであり、膨大な部材の中から長大橋全体の構造安

全性に影響を及ぼす重要部材を定量的指標に基づき選定することはできない（もちろん、点検者等の経験・技術的判断に基づき選定することは可能であり、貝戸等<sup>2)</sup>も技術的判断により重要部材の選定とフォルト・ツリーの構築を行っている）。さらに、そのような重要部材に対する目視点検の判定結果が仮に最低ランクに到達したとしても、現実的には構造安全性に影響を及ぼすほど劣化が進行していないことが少なくない（例えば、腐食に関しては目視点検で最低ランクであると判断されたとしても、板厚の減少率は局部的に10%程度である<sup>3)</sup>）。長大橋の管理者においては、橋梁全体としての構造安全性の確保を重要視し、維持管理の経済的効率性も同時に考慮した性能ベースの維持管理のあり方を模索することも重要である。そのような意味において著者等は、現状の点検が目視主体であることを認識し、目視点検データに基づく最適点検間隔を重要視しつつも、長大橋全体の構造安全性と、それに寄与する重要部材の限界状態を把握した上で、最適点検間隔を決定することも同様に重要であると考える。

以上のような問題意識の下、本研究では構造安全性を考慮したフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検間隔の決定手法を提案する。具体的には、はじめ

に長大橋全体モデルを用いた有限要素法(以下, FEM)による解析結果, 蓄積された目視点検データおよび技術的判断に基づいて, 重要部材の抽出とフォルト・ツリーの構築を行う。ただし, このとき対象橋梁の構造安全性に影響を及ぼす損傷を鋼材腐食に特定化する。構造解析において, 腐食を想定し, 設計時の母材板厚および補剛材の板厚を徐々に減厚させ, 橋梁が構造不安定な状態に陥いたとき, あるいは鋼部材以外の部位が許容値(支承の移動量など)に達したときの腐食量を解析上での限界値として定義する。なお, 以降では腐食量に関する解析上での限界値を腐食限界値と称する。さらに, 各部材が腐食限界値に至るまでの期待寿命を予測するために, 1) 腐食理論式によるサンプルパスの発生, 2) FEM 解析を通じた対象部材の腐食限界値の算出, 3) サンプルパスの荷重平均に基づく腐食劣化統計モデルの定式化, 4) 目視点検データを用いた統計モデルの推計, 5) 腐食限界値に達する時間の確率分布(腐食寿命分布)の算出, を実現するようなハイブリッド劣化予測モデルを開発する。さらに劣化予測結果と連動したライフサイクル費用と, フォルト・ツリー分析と連動したリスク費用という2種類の費用の総和として与えられるトータル費用を算出し, その最小化を達成する点検間隔を最適点検間隔として決定する。以下, **2.**で本研究の基本的な考え方を述べる。**3.**ではハイブリッド劣化予測手法を詳述する。**4.**でフォルト・ツリー分析を利用した長大橋の最適点検間隔を決定する。最後に**5.**で実用化への示唆を述べる。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) アセットマネジメントと意思決定

目視点検データを用いた統計的劣化予測手法<sup>4)~6)</sup>の飛躍的な発展により, 劣化予測と連動する形でライフサイクル費用評価<sup>7)~10)</sup>が可能となり, 実践的なアセットマネジメントが提案されている<sup>11), 12)</sup>。特にライフサイクル費用の最小化を達成するような最適点検間隔の決定は実務的ニーズの高い研究課題である。さらに, 利用者や第三者への安全性, あるいは社会的影響といったリスクを定量的に評価し, リスク最小化の観点から点検間隔を決定している研究事例もある。貝戸等<sup>13)</sup>は路上障害物の発生過程をポアソンガンマ発生モデルで定式化し, VaR 指標に基づいて道路巡回間隔を決定するための方法論を開発している。また, ライフサイクル費用とリスクに基づいて最適点検間隔を決定する研究も蓄積されているが, このとき, リスクを費用換算できるか否かで方法論が大別される。リスクを費用換算できない場合には, リスク発生確率などを用いてリスク評価指標を設定し, リスク評価指標とライフサイク

ル費用という2つの評価軸に基づき, 最適点検間隔をヒューリスティックに決定する<sup>14)</sup>。この場合, 点検間隔の相対評価を行うことは可能であるが, 最適点検間隔を一意に決定することはできない。一方で, リスクを費用換算することが可能な場合には, ライフサイクル費用とリスク費用の総和で定義されるトータル費用を算出することとなる<sup>15)</sup>。点検間隔に対するトータル費用は凸関数となり, トータル費用を最小化する点検間隔が一意に定まる。このトータル費用最小化を達成する点検間隔を最適点検間隔と決定することができる。後に述べるように, 後者の方法は最適点検間隔が一意に定まるために利便性の高い方法であるが, 逆に一意に定まった最適点検間隔に対して, 技術者がそれ以上の検討を放棄してしまうことが懸念される。この点について少し補足的に説明を加える。

**1.**で述べたように, 貝戸等<sup>2)</sup>は目視点検データを用いて長大橋の最適点検間隔を決定する方法論を提示している。基本的な方法論は, ライフサイクル費用と, フォルト・ツリー分析により算出された期待リスク確率という2つの評価軸を設定し, 実際の点検間隔と代替案との相対比較を通して最適点検間隔を決定するものであった。これは現行の点検が目視を主体として整備されていることを踏まえてのことであった。一方で, 1) 部材管理から構造物管理へという視点, 2) 仕様ベースから性能ベースの維持管理へという視点, 3) 厳しい予算制約下において維持管理の効率性を追求するという視点に立てば, 構造安全性を考慮したフォルト・ツリー分析を用いて最適点検間隔を検討することも重要であると考えられる。この点の重要性については貝戸等も指摘していることから, 本研究は貝戸等の研究成果の延長線上に位置づけることができる。ただし, 著者等は, 両者のうち, いずれかが不要であるとか, いずれか一方のみの検討で十分であると主張しているのではない。むしろ, 両者によって算出された最適点検間隔を基礎情報として, それらをもとに技術者が議論を交わし, 実務上の制約条件なども勘案した上で実際の点検間隔を決定していくプロセスこそが重要であると考えている。したがって, 本研究中の**4.**では, トータル費用最小化を達成する具体的な点検間隔を算出するが, 点検間隔そのものは一試算例であって, 本研究の重点は方法論の開発にある。

### (2) 提案手法の概要

本研究で提案する最適点検間隔の決定手法の概要を述べる。読者の便宜を図るために, **図-1**にフローを示す。はじめに, 対象橋梁に対して構造安全性を検討する上で重要となる部材と損傷を抽出する。このとき, 長大橋全体モデルを用いた FEM 解析, 過去の目視点検

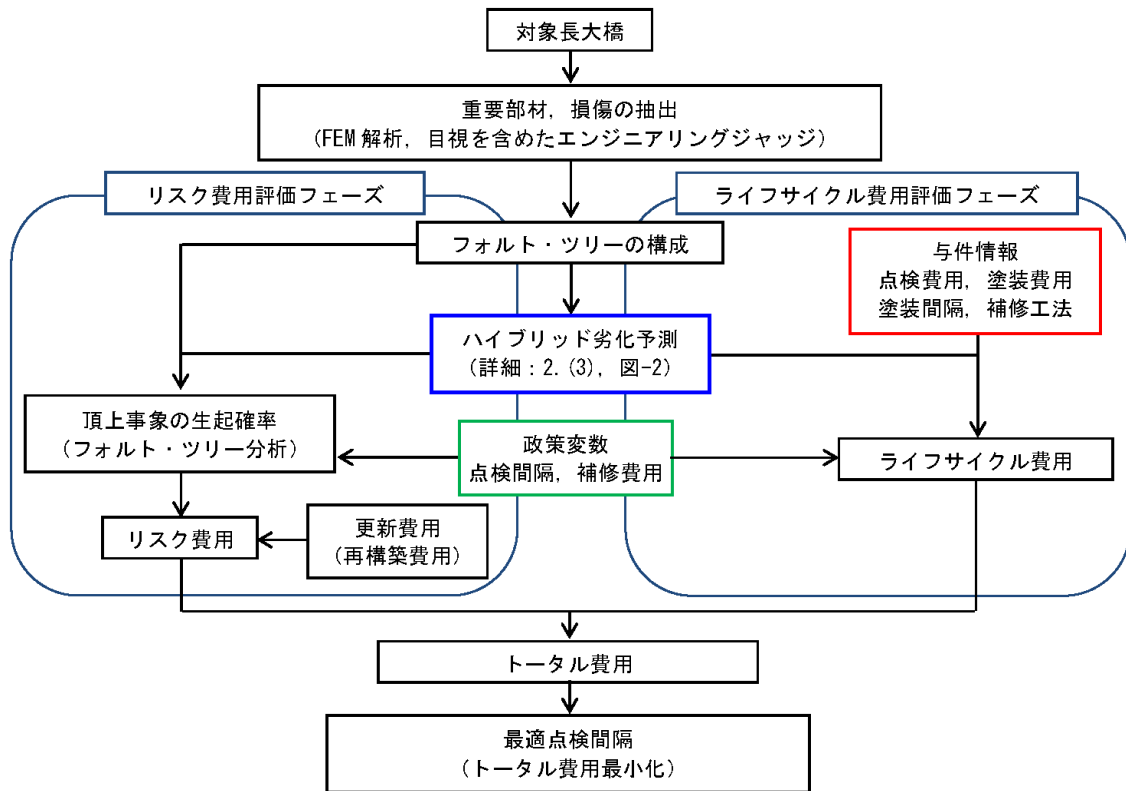


図-1 本研究のフロー

データやその判定に際した実務者の経験を踏まえ、長大橋の頂上事象（本研究では落橋リスク）に寄与するか否かを基準として技術的判断（エンジニアリングジャッジ）によって、重要部材を抽出することになる。つぎに、選定された重要部材に基づきフォルト・ツリーを構成する。フォルト・ツリーを構成する部材の劣化・損傷事象（末端事象）が生起する確率をハイブリッド劣化予測モデルを用いて推計する。ハイブリッド劣化予測モデルは本研究における基幹技術であり、詳細については2.(3)と図-2で述べる。ハイブリッド劣化予測で推計された重要部材の劣化予測結果（劣化・損傷の生起確率）を論理的規則に従って集計化し、フォルト・ツリーで設定した頂上事象（本研究においては落橋相当リスク）の生起確率を算出するとともに、ライフサイクル費用を算出する。前者がリスク費用評価フェーズ、後者がライフサイクル費用評価フェーズである。図から明らかなように、ハイブリッド劣化予測の推計精度が両フェーズの推計精度に直結することが理解できる。このとき、本研究においては、政策変数として、点検間隔、補修費用を設定した（図中の緑囲い）。その一方で、図中の赤囲いの数値や条件（点検費用、塗装費用、塗装周期、補修工法）については与件情報として確定的に与えた。さらにリスク費用評価フェーズにおいては、頂上事象（落橋相当リスク）の生起確率と、対象橋梁の更新費用（再構築費用）の積によってリスク費

用を算出する。このとき、両費用間には、点検間隔が長くなるにつれ、リスク費用は大きく、ライフサイクル費用は小さくなるというトレードオフ関係が成立する。したがって、リスク費用とライフサイクル費用の総和で表されるトータル費用を定義すれば、トータル費用は点検間隔に対して最小点を持つことになる。本研究ではトータル費用最小化を達成するような点検間隔を最適点検間隔として決定する。

### (3) ハイブリッド劣化予測の概要

ハイブリッド劣化予測の概要説明に際して、1.で述べたように本研究では対象橋梁の構造安全性に影響を及ぼす部材の損傷として鋼材腐食のみに着目することを断っておく。長大橋全体モデルのFEM解析を通して、重要部材として選定される全部材の腐食限界値を得ることができる。しかし、FEM解析では構造安全限界値と各部材の腐食限界値の関係に関する情報は獲得できるものの、腐食限界値に到達するまでの年数（以下、腐食限界寿命）に関する情報を獲得できない。そこで、腐食速度に関する理論モデル（以下、理論モデル）を採用し、腐食限界寿命を算出する。ただし、実際の鋼材の腐食過程は多様である。腐食過程を確定的に与えることは不可能であり、不確実性を考慮して確率論的に予測することが望ましい。そこで、理論モデルの入力条件を複数設定し、腐食過程に関する複数の

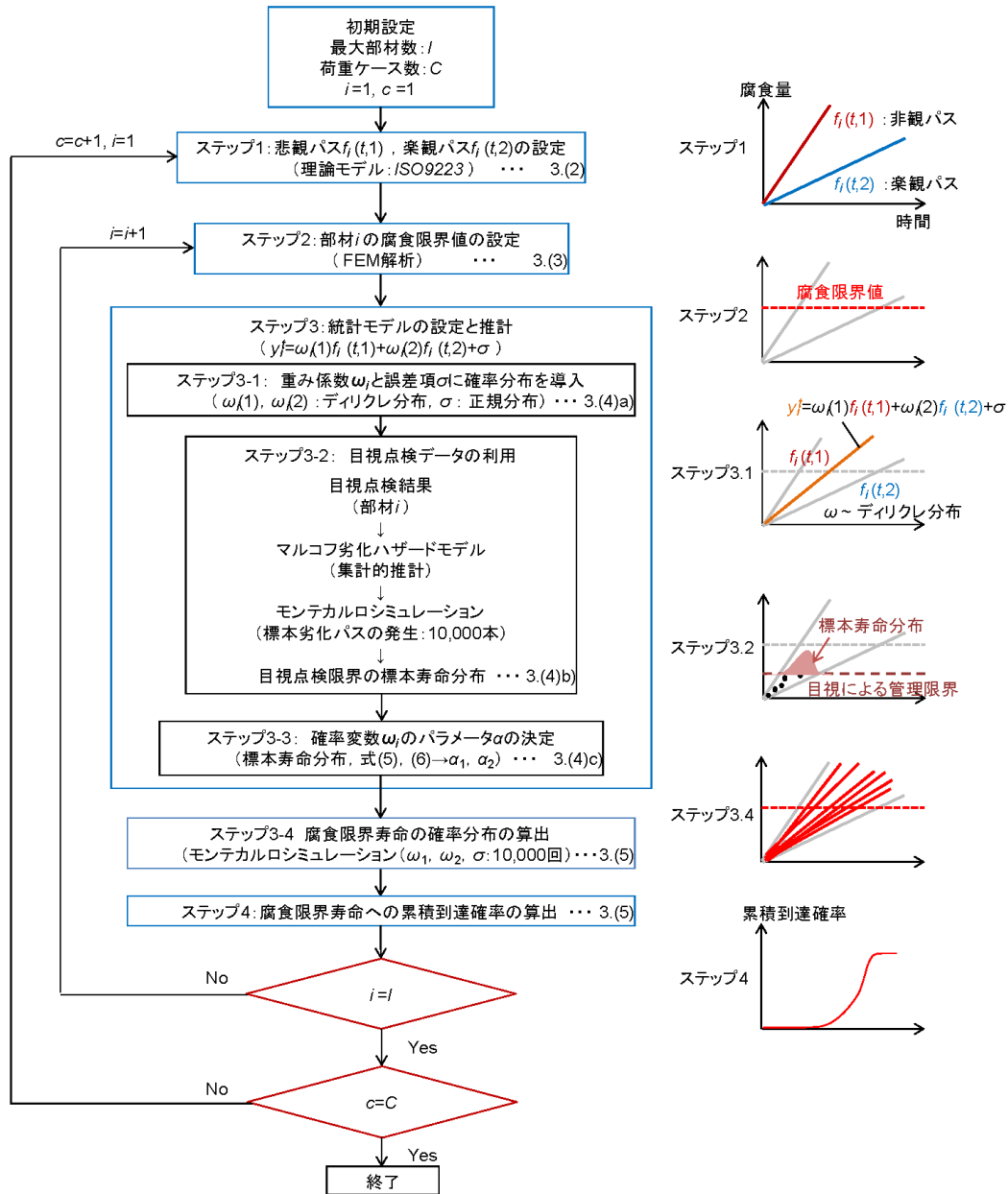


図-2 ハイブリッド劣化予測のフロー

サンプルパスを発生させる。これらのサンプルパスに基づいて腐食劣化統計モデル（以下、統計モデル）を構築する。さらに、統計モデルをこれまでに蓄積された目視点検データ（あるいは腐食量データ）を用いて推計することで、理論モデルに実際の劣化情報を反映させた形で予測精度の向上を図る。以上のように、理論モデルと、目視点検データに基づく統計モデルを有機的に融合させた劣化予測モデルをハイブリッド劣化予測モデルと定義する。このようなハイブリッド劣化予測モデルは、空港の地盤沈下過程への適用を試みた下村等による先駆的研究がある<sup>16)</sup>。以上より、長大橋を構成する各重要部材の腐食限界寿命に関する確率分布を得ることができる。ハイブリッド劣化予測モデル

によって獲得した腐食限界寿命の確率分布に基づいて、フォルト・ツリー分析の末端事象の生起確率やライフサイクル費用を算出することができる。なお、本研究では鋼材の腐食に着目することから、鋼材の腐食速度に関する理論式を用いるが、本研究で提案するハイブリッド劣化予測モデルは、後に詳述するように腐食劣化に限らず、一般的な劣化事象に適用可能な形で定式化する。

図-2 にハイブリッド劣化予測モデルの適用フローを示す。各ステップの具体的な内容については 3. で詳細に説明することとし、ここではハイブリッド劣化予測モデルの枠組みについて述べる。ハイブリッド劣化予測モデルの目的は、重要部材として選定された全ての鋼

材の腐食限界寿命を算出することにあるが、ここでは議論を簡略化するために、任意の一部材を対象とする。はじめに、理論モデルである腐食理論式を援用し、鋼材腐食過程に関するサンプルパスを設定する。ここでサンプルパスは時間と腐食量の関係を表す。理論モデルの入力条件を複数設定することにより、鋼材腐食過程に関するサンプルパスを複数本設定することができる。図中には簡単のため、また**3.**と統一するために、サンプルパスを2本(悲観パスと楽観パス)設定している(ステップ1)。理論モデルは、あくまでも初期情報という位置づけであり、目視点検データが蓄積されるに従って、その影響は次第に薄れていく。具体的に**3.**では、目視点検データが2本のサンプルパスで囲まれた領域内に位置づけられるように、腐食速度が極めて早い場合(悲観パス： $f_1$ )と遅い場合(楽観パス： $f_2$ )を設定した。つぎに、長大橋全体モデルのFEM解析を通して、当該部材の腐食限界値を算出する(ステップ2)。想定する載荷荷重 $c$ は活荷重： $c=1$ 、風荷重： $c=2$ 、橋軸方向の地震荷重： $c=3$ 、橋軸直角方向の地震荷重： $c=4$ の4種類とする。これによりサンプルパスが腐食限界値に到達する年数(腐食限界寿命)を定義することができる。ステップ3では、サンプルパスの荷重和として統計モデルを定義する。図中のサンプルパスは2本であるので、重み係数は $\omega_1$ と $\omega_2$ の2種類となる。これらの重み係数と誤差項を確率変数として定義する。つぎに、過去に得られた目視点検データを用いてマルコフ劣化ハザードモデル<sup>5)</sup>を推計する。本研究では利用可能な目視点検データの特性により、マルコフ劣化ハザードモデルを集計的に推計する。推計したマルコフ劣化ハザードモデルからマルコフ推移確率を算出し、モンテカルロシミュレーションにより10,000本の劣化標本パスを発生させる。ただし、目視点検データで予測できるのは、目視点検で定義される最低ランクの健全度までである。本研究の場合では、目視点検における最低ランクは板厚の減少率が局部的に10%であるので、各部材厚から具体的な減少量を算出する。この10,000本の劣化標本パスを利用することで、板厚が10%減少するのに要する時間の分布(標本寿命分布)を獲得できる。この標本寿命分布と、統計モデルの重み係数の確率分布が同一であるという仮定のもと、確率分布を特徴づける母数を算出し、具体的な確率分布を決定する。詳細については後述するが、目視点検データを利用してこれらのパラメータを推計することにより、実態に則した劣化予測が可能となる。最後に、確定された重み係数の確率分布から、再び10,000回のモンテカルロシミュレーションを実施し、重み係数サンプルを獲得する。10,000組の重み係数に対応した10,000本の劣化パスを発生させ、腐食限界値に到達するまでの腐食寿

命分布を獲得する。この腐食寿命分布から寿命分布関数を算出することで、経過時間と腐食寿命の累積確率との関係を把握することができる(ステップ4)。この累積確率を用いてライフサイクル費用を算出するとともに、フォルト・ツリーの末端事象の生起確率を算出する。以上を全ての重要部材に対して適用し、フォルト・ツリー分析を行った上で最適点検間隔を決定する。

### 3. ハイブリッド劣化予測

#### (1) 対象橋梁

本研究は数多くの要素技術で構成される体系的な方法論の提案を目的としている。したがって、研究の見通しを良くするために、具体的事例を通してハイブリッド劣化モデルの説明を行う方が良いと判断した。なお、これ以降に具体的な方法論を提示していくが、方法論は必ずしも提示した手法に限定されない。

阪神高速道路では、昭和49年に供用を開始したA橋を始めとして、合計15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、それらのうちの代表的な長大橋であるA橋(3径間ゲルバートラス：支間長235m+510m+235m=980m)を対象とする。同橋は供用開始後約40年が経過しており、蓄積された利用可能な目視点検データは過去3回分である。ただし、目視点検データは、各部材種別(上弦材、下弦材、鉛直材、斜材、横桁)における集計的なデータしか残されていない。A橋のフォルト・ツリーを構成する重要部材に対してハイブリッド劣化予測を実施するために、以下、**3.(2)**で理論モデルについて、**3.(3)**でFEM解析による腐食限界値の算出について概要を述べ、**3.(4)**で統計モデルについて詳述する。最後に**3.(5)**で腐食限界寿命の累積確率(分布関数)を算出する。

#### (2) 理論モデル

本研究では、対象橋梁の劣化事象として、維持管理の上で最も重要となる鋼材腐食に着目する。これにより、ハイブリッド劣化予測の第1ステップを構成する理論モデルとして、腐食速度に関する腐食理論式を援用する。腐食劣化に関する理論モデルとしては、鋼材の環境腐食速度についての規格であるISO9223(Corrosion of metals and alloys -corrosivity of atmospheres-Classification)が存在する。ISO9223においては、水分や塩分、排気ガスなどの影響をそれぞれ複数のカテゴリー(分類)に区分しており、各分類の組合せにより、対象とする鋼材の環境腐食速度を定めている。具体的にISO9223を表-1として示す。表中のSO<sub>2</sub>は排気ガ

表-1 腐食速度に関する理論式 (ISO9223)

結露時間 hour/year	分類	SO <sub>2</sub> 付着速度 mg/(m <sup>2</sup> · day)	分類	塩分付着速度 mg/(m <sup>2</sup> · day)	分類	
$T \leq 10$	$T_1$	$P_d \leq 10$	$P_0$	$S \leq 3$	$S_0$	
$10 \leq T \leq 250$	$T_2$	$10 \leq P_d \leq 35$	$P_1$	$3 \leq S \leq 60$	$S_1$	
$250 \leq T \leq 2500$	$T_3$	$35 \leq P_d \leq 80$	$P_2$	$60 \leq S \leq 300$	$S_2$	
$2500 \leq T \leq 5500$	$T_4$	$80 \leq P_d \leq 200$	$P_3$	$60 \leq S \leq 300$	$S_3$	
	$T_1$			$T_3$		
	$S_0 - S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_0 - S_1$	$S_2$	$S_3$
$P_0 - P_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$ or $C_2$	$C_2$ or $C_3$	$C_3$ or $C_4$	$C_4$
$P_2$	$C_1$	$C_1$	$C_1$ or $C_2$	$C_2$ or $C_3$	$C_3$ or $C_4$	$C_4$ or $C_5$
$P_3$	$C_1$ or $C_2$	$C_1$ or $C_2$	$C_2$	$C_4$	$C_4$ or $C_5$	$C_5$
	分類	腐食速度 ( $\mu\text{m}/\text{year}$ )				
	$C_1$	$r_{corr} \leq 1.3$				
	$C_2$	$1.3 \leq r_{corr} \leq 25$				
	$C_3$	$25 \leq r_{corr} \leq 50$				
	$C_4$	$50 \leq r_{corr} \leq 80$				
	$C_5$	$80 \leq r_{corr} \leq 200$				

スなどによる環境腐食を、塩分については海浜環境における腐食を想定している。例えば、年間の総結露時間が400時間、SO<sub>2</sub>の付着速度が1日20mg/m<sup>2</sup>、塩分の付着速度が1日1mg/m<sup>2</sup>のような比較的交通量の少ない、山間部における鋼材の腐食速度を推計してみる。結露の影響については分類T<sub>3</sub>に、SO<sub>2</sub>の影響については分類P<sub>1</sub>に、塩分の影響については分類S<sub>0</sub>にそれぞれ分類される。これらの各影響因子の分類から、当該環境における鋼材の大気腐食性は、分類C<sub>2</sub>もしくは分類C<sub>3</sub>となり、腐食速度は1年間に1.3μmから50μmと定めることができる。このように、ISO9223に従って鋼材の腐食環境に応じた腐食速度を推計することが可能となっている。しかしながら、当該規格は、大気環境腐食性の評価規格であるために、本研究で対象する長大橋の鋼材の一部で確認できるような滞水の影響を考慮していないことに留意する必要がある。

ハイブリッド劣化予測モデルにおいて、理論モデルが果たす役割は、1) 目視点検データが十分に蓄積されていない状況で劣化予測の初期情報を与えること、2) 腐食速度の不確実性を評価するために、条件の相違が予測結果にもたらす影響を定量的に評価することである。具体的に本研究では腐食速度の上下限值という2本のサンプルパスを設定する。2本のサンプルパスを悲観パスと楽観パスと定義し、悲観パスとして分類C<sub>5</sub>の上限値の2倍に相当する400μm/年を、楽観パスとして分類C<sub>1</sub>の上限値である1.3μm/年を採用することとする。悲観パスのみにC<sub>5</sub>の上限値の2倍を設定した理由は、滞水の影響を考慮することを意図している。なお、本研究においては腐食速度の理論モデルとして線形モデルを採用したが、これらの悲観パスと楽観パスは後に目視点検データの蓄積に応じてその影響が薄れてい

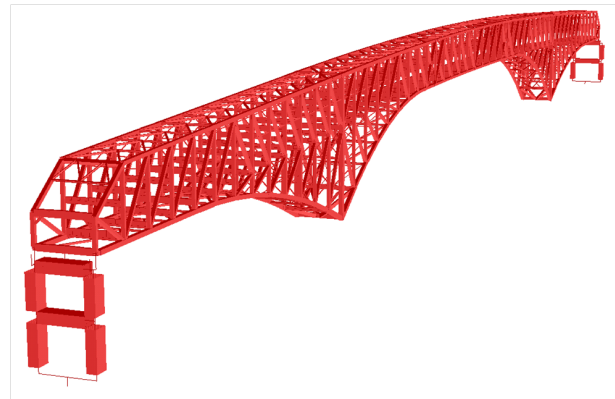


図-3 長大橋 A の解析モデル

く。したがって、設定時点において実際の腐食速度と一致している必要はない。むしろ、3.(4)で詳述するように、悲観パスと楽観パスで囲まれた領域から逸脱するような現象が顕在化しない(目視点検データが存在しない)ように、それぞれのサンプルパスを設定することが重要である。最終的に、長大橋を構成する部材*i*に対して、理論モデルに基づいて設定される2本の悲観・楽観パス  $f_i(t, 1)$ ,  $f_i(t, 2)$  は、

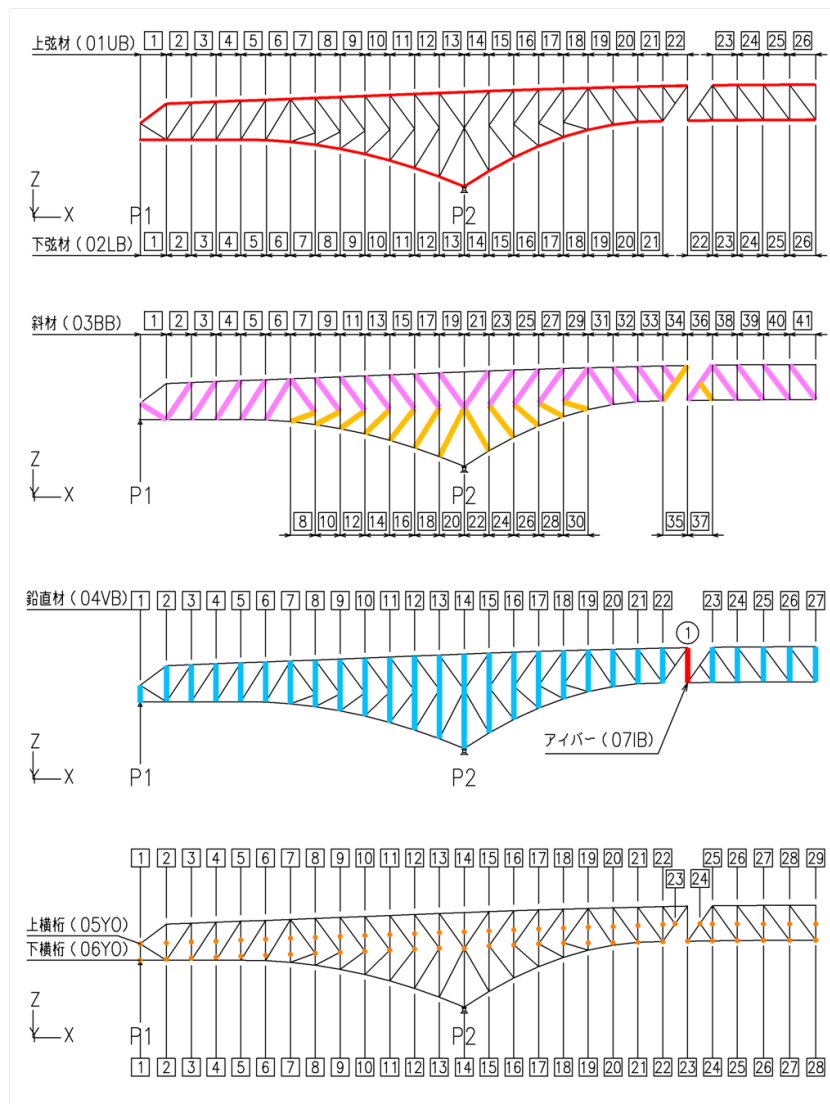
$$f_i(t, 1) = 0.4t \tag{1a}$$

$$f_i(t, 2) = 0.0013t \tag{1b}$$

と定義することができる。

### (3) FEM 解析による腐食限界値の算出

ハイブリッド劣化予測の第2ステップでは、各部材の腐食限界値を把握することを目的として、FEMモデルによる解析を実施する。対象橋梁であるA橋の解析モデルを図-3に示す。FEMモデルとしてファイバーモ



注) 図中の赤は上弦材 (01UB) と下弦材 (02LB) を, 紫と黄は斜材 (03BB) を, 青は鉛直材 (04VB) を, 赤太線はアイバー (07IB) を, 橙は上横桁 (05YO) と下横桁 (06YO) をそれぞれ表す. また, 各部材は図中に示すように分割されており, 四角囲みの番号がラベル付けされている.

図-4 FEM 解析の対象部材

デルに基づく橋梁全体系モデルを用いる<sup>17)</sup>. 製作時残留応力や施工誤差などの初期不整を考慮しており, さらに局部座屈といった断面変形を伴う座屈を評価するために, 近似的に軸圧縮強度が局部座屈強度となるような解析手法を用いている. なお, 本解析で使用したソフトには SeanFEM ver.1.22 を用いて, 複合非線形解析を実施しており, 幾何学的非線形性は有限変位・有限ひずみ・有限回転までを考慮している. ただし, 先ほどの理論モデルと同様に本研究では点検間隔の決定手法を提示することに主眼を置いているために, 取り上げた FEM モデルはあくまでも一例である. また, 解析手法の詳細については文献<sup>17)</sup>の第 3 章を参照されたい.

FEM 解析は, 対象とした各荷重状態に対して, 想定荷重 (活荷重, 風荷重, 地震荷重 (橋軸), 地震荷重 (橋軸直角)) を一定に荷重し, 設計時の母材板厚を徐々に減

厚させる方法を採用した. 健全時の母材板厚を 100%とし, 板厚を 10%ごとに減厚させている. 減厚は安全側の観点より対象部材の全長において一様とした. これにより, 部材ごとの腐食限界値を把握した. 減厚によって, 構造不安定となるか, 支承などの非線形特性を考慮していない部位の応答値が常時換算した許容値に達するか, 橋梁全体として構造不安定になる場合のいずれかに到達したときの腐食量を腐食限界値に採用している. 対象部材は, 上弦材, 下弦材, 斜材, 鉛直材, アイバー, 上横桁, 下横桁とし, 図-4 に示す全 179 部材についてそれぞれ解析を実施し, 腐食限界値の算出を行った.

一例として, 上弦材に関する解析結果を図-5 に示す. 図中には各荷重が荷重された状態において, 母材板厚を徐々に減少させた際の腐食限界値を示している. 想定

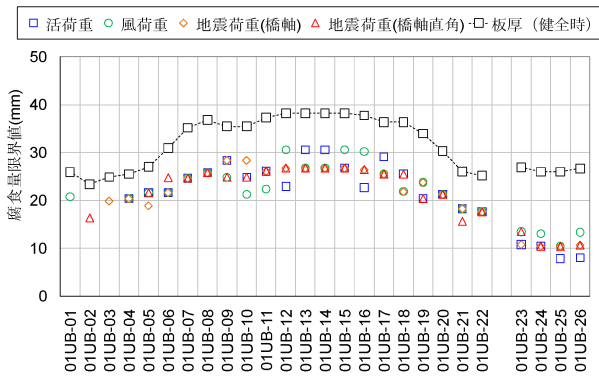


図-5 FEM 解析による腐食限界値 (上弦材)

する荷重の種類によって腐食限界値が異なるとともに、地震や風などの非常時を想定した場合よりも、常時として想定した活荷重の方が腐食限界値が小さいケースが存在する。腐食限界値が小さい場合、腐食による減厚が少ない場合でも終局限界に達することを意味しており、同じ腐食速度であれば、これらの部材では、腐食限界値が大きな部材よりも早い期間で限界値に達する。他の部材についても同様の解析によって腐食限界値を把握した。

#### (4) 統計モデル

##### a) 統計モデルの基本構造

第1ステップでは理論モデルにより腐食速度を算出し、悲観パスと楽観パスに基づく腐食量と経過時間の関係を提示した。第2ステップでは、フォルト・ツリーを構成する全179部材を対象に鋼材腐食による腐食限界値を算出した。さらに、第1ステップと第2ステップを複合的に考えることで、179部材のそれぞれが腐食限界値に到達するまでの時間を予測することができる。第3ステップでは、蓄積された目視点検データに基づき、実際の腐食速度を考慮した統計モデルを提案する。

はじめに、腐食速度の理論モデルに基づいて、任意部材  $i$  に対して  $K$  本のサンプルパスが得られていると考える。このとき、実際の腐食過程  $y_i^t$  を  $K$  本のサンプルパス  $f_i(t, k)$  の線形結合、

$$y_i^t = \sum_{k=1}^K \omega_i(k) f_i(t, k) + \varepsilon_i \quad (2)$$

として表現する<sup>16)</sup>。ここに、 $\omega_i(k)$  は、部材  $i$  のサンプルパス  $k$  に対して割り当てられた重みであり、

$$\sum_{k=1}^K \omega_i(k) = 1 \quad (i = 1, \dots, I) \quad (3)$$

が成立する。サンプルパスとして悲観パスと楽観パスを設定した **3.(2)** の理論モデルの場合では  $K = 2$  となる。ここで、部材  $i$  の重みベクトルを  $\omega_i =$

$(\omega_i(1), \dots, \omega_i(K))$  と表す。重みベクトル  $\omega_i$  は、制約条件 (3) を満足するような確率変数である。つぎに、 $\varepsilon_i$  は、測定誤差を表す確率変数であり、それぞれ独立に1次元正規分布  $N(0, \sigma_i^2)$  に従うと仮定する。重み行列  $\omega_i$  と確率誤差項  $\varepsilon_i$  の確率分布を特定化すれば、具体的な腐食劣化パスを得ることができる。ここで、 $\omega_i$  の確率密度関数が、ディリクレ分布に従うと仮定する。ディリクレ分布の確率密度関数は、

$$D(\omega_i | \alpha) = \Psi(\alpha) \prod_{k=1}^K \{\omega_i(k)\}^{\alpha_k - 1} \quad (4a)$$

$$\Psi(\alpha) = \frac{\Gamma(\sum_{k=1}^K \alpha_k)}{\prod_{k=1}^K \Gamma(\alpha_k)} \quad (4b)$$

で与えられる。ただし、 $\Gamma(\cdot)$  はガンマ関数であり、 $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_K)$  は初期データにおける定数パラメータベクトルである。定数パラメータベクトル  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_K)$  はディリクレ分布  $D(\omega_i | \alpha)$  の期待値  $E(\omega_i)$ 、および分散  $\sigma^2$  と以下のような関係を有している。

$$E(\omega_i) = \frac{\alpha_i}{\sum_{k=1}^K \alpha_k} \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha_i \sum_{j \neq i} \alpha_j}{\left(\sum_{k=1}^K \alpha_k\right)^2 \left(1 + \sum_{k=1}^K \alpha_k\right)} \quad (6)$$

式 (5) と (6) は定数パラメータベクトル  $\alpha$  の制約条件を表すと同時に、この制約条件を通じて目視点検データを反映させることができる。

統計モデルを推計するための具体的な手順を述べる。既述したように、本研究ではサンプルパス総数を  $K = 2$  として、悲観パスと楽観パスを採用している。すなわち、統計モデルを推計するためには、未知パラメータである定数パラメータベクトル  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$  を目視点検データを用いて推計すればよい。さらに、式 (5)、(6) の関係から、定数パラメータベクトル  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$  の推計は、ディリクレ分布  $D(\omega_i | \alpha)$  の期待値  $E(\omega_i)$ 、および分散  $\sigma^2$  を推計する問題と直接的に関連している。これに対して最も簡易な推計方法として、目視点検データから直接期待値と分散を求めることが考えられる。しかしながら、目視点検データを直接利用する場合、点検誤差や、異常サンプルなどの影響を大きく受けることになるとともに、目視点検データが相対的に豊富にある供用開始直後の健全なデータの影響が支配的となってしまうことが懸念される。最終的に腐食限界寿命の算出を目的とすると、腐食劣化のより進行した状態における情報こそが、統計モデルの推計にとって重要であることは述べるまでもない。実際にデータの蓄積に応じて劣化予測モデルを逐次更新可能なベイズ更新モデルがすでに提案されている<sup>16), 18)</sup>。本研究ではあくまでも劣化初期の一部の目視点検データを用いて簡易に統計モデルを推計するための方法論を示すことを断つ



表-2 定期点検の判定区分 (健全度)<sup>3)</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.

ておく. そこで、部材腐食に関する目視点検データからマルコフ劣化ハザードモデルを用いて、各健全度間の推移確率を算出し、モンテカルロシミュレーションにより、劣化標本パスを 10,000 本発生させる. 劣化標本パスで構成される、目視点検における管理限界 (健全度 A&S<sup>3)</sup>) での標本寿命分布のサンプル平均、および分散をディリクレ分布  $D(\omega_i|\alpha)$  の期待値  $E(\omega_i)$ 、および分散  $\sigma^2$  として用いることとする. 以下では議論を単純化するために、対象とする長大橋の特定部材を例として取り上げ、蓄積された目視点検データからマルコフ劣化ハザードモデルを推計したのち、推計したマルコフ劣化ハザードモデルに基づいて統計モデルを推計する.

b) マルコフ劣化モデルの集計的推計

本研究で対象とするような長大橋のアセットマネジメントにおいては、部材の目視点検データが表-2 に示すような多段階の健全度として蓄積されているものの、表-3 に示されるような健全度の割合といった集計的情報としてのみ利用可能である場合が少なくない<sup>15)</sup>. このため、ある単一の部材や部位に着目し、その劣化状態を状態変数として記述するという非集計的手法を採用することができない. マルコフ劣化ハザードモデルの状態変数として、各劣化状態にある健全度が部材総数に占める割合という集計的状态変数を用いることが必要となる. 本研究ではこのマルコフ劣化ハザードモ

表-3 A 橋上下弦材の腐食に対する目視点検結果

判定区分	OK	C	B	A&S
供用開始時点	216	0	0	0
0 年経過	(1.0)	(0)	(0)	(0)
第 1 回点検	148	33	31	4
18 年経過	(0.685)	(0.210)	(0.043)	(0.019)
第 2 回点検	47	80	70	19
22 年経過	(0.218)	(0.370)	(0.324)	(0.088)
第 3 回点検	0	13	30	71
32 年経過	(0.000)	(0.090)	(0.208)	(0.493)

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. 第 3 回点検のサンプル数のみ合計 114 となっている. これは長大橋 A の目視点検が塗装足場設置時に並行して実施され、塗装業務が数年間に亘って実施されるために、本研究時点で第 3 回点検が完了していなかったことが原因である. また、点検箇所数は FEM 解析の部材数とは対応していない.

表-4 A 橋鉛直材・斜材の腐食に対する目視点検結果

判定区分	OK	C	B	A&S
供用開始時点	130	0	0	0
0 年経過	(1.0)	(0)	(0)	(0)
第 1 回点検	130	0	0	0
18 年経過	(1.0)	(0)	(0)	(0)
第 2 回点検	130	0	0	0
22 年経過	(1.0)	(0)	(0)	(0)
第 3 回点検	56	0	0	2
32 年経過	(0.966)	(0)	(0)	(0.034)

注) 表-2 と同様の理由から第 3 回点検のサンプル数のみ合計 58 となっている.

デルの集計的推計手法を用いて目視点検データからマルコフ推移確率を算出する. しかし、集計的マルコフ劣化ハザードモデルに関しては、貝戸等<sup>2)</sup>、堀等<sup>15)</sup>の論文において詳述されているので、本研究では概要を述べるにとどめる.

はじめに、目視点検による管理限界 (表-3 の A&S) に到達する時間の分布 (標本寿命分布) を求めるために、目視点検データを用いて各健全度間の推移確率を算出する. 対象橋梁である A 橋においては、供用開始後約 40 年が経過しており、目視点検データとしては 3 回分が利用可能であった. 利用可能な過去 3 回の点検データは、前述したように、部材種別ごと (上弦材、下弦材、斜材、鉛直材、アイバー、上横桁、下横桁) の集計的なデータしか残されていない. 例として、上下弦材に対する過去 3 回の目視点検データとその健全度の内訳を表-3 に、鉛直材・斜材に対する同様のデータを表-4 にそれぞれ示す. 表中の OK は腐食が全くないことを示す. また、A&S については、腐食により母材板

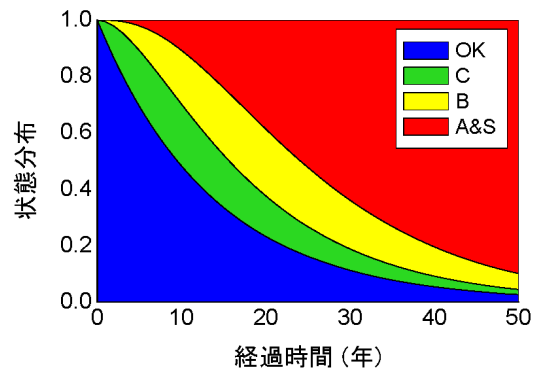
表-5 マルコフ推移確率

	OK	C	B	A&S
OK	0.930	0.064	0.0057	0.000
C	0	0.839	0.152	0.010
B	0	0	0.886	0.114
A&S	0	0	0	1

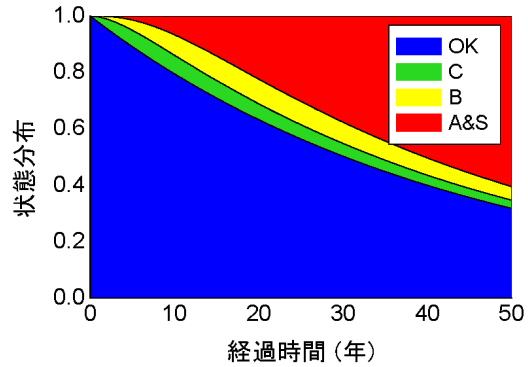
厚が一部で10%程度減少している状態(目視点検における管理限界状態)を示している。B, Cについては、これらの中間状態となっている。表-3の目視点検データを確認することで、供用開始から徐々にOKが少なくなるとともに、A&Sが増加しており、腐食による劣化が進行していることがわかる。表-3, 表-4の点検結果に基づいて、マルコフ劣化モデルをそれぞれ集計的に推計した。表-5には、特に上下弦材の目視点検データから推計したマルコフ劣化ハザードモデルを用いて算出した推移確率を示す。同表のマルコフ推移確率は1年後の推移確率であり、いずれの健全度においても対角成分の確率が最も大きくなっている。さらに、表-5に基づいて算出した上下弦材の健全度分布を図-6(a)に、鉛直材・斜材の健全度分布を図-6(b)に併せて示す。上下弦材では健全度OKの部材の割合は、約10年で50%になることが見て取れる。さらに、25年程度で、健全度A&Sの部材が局所的な腐食も含めて50%以上を占めるとともに、40年を過ぎると全上下弦材の80%程度が健全度A&Sとなってしまう。これは目視点検においては、局所的な腐食であっても、表-2に基づき、健全度A&Sと判定されるためである。一方で、鉛直材・斜材では40年時点の健全度A&Sの割合が50%程度であり、部材種別で異なる健全度分布の推移が表現されている。

c) 統計モデルの推計

マルコフ推移確率を用いて、健全度がOKからA&S(目視による管理限界)に到達するまでに要する時間の確率分布(標本寿命分布)を算出し、ディリクレ分布の期待値 $E(\omega_i)$ 、および分散 $\sigma^2$ を算出する。確率分布の算出にはマルコフ推移確率に基づいてモンテカルロシミュレーションを実施した。具体的には、初期状態として健全度OKを設定し、1年ごとに0から1の間の実数を取るような一様乱数を発生させる。発生させた乱数は表-5に示される推移確率で他の健全度(OK, C, B, A&S)へと推移する。推移後の状態を初期状態として、同様の手順を繰り返す。マルコフ推移確率に従い、健全度がA&Sへ到達した時点でシミュレーションを終了し、その時の年数を記録する。以上より算出したA&Sへの到達時間を1つの標本値とする。この操作を十分に繰り返すことで、健全度OKからA&Sへ到達する標本寿命分布を算出することができる。本研究ではモンテカルロシミュレーションによる劣化標本パ



(a) 上下弦材



(b) 鉛直材・斜材

図-6 腐食の健全度分布

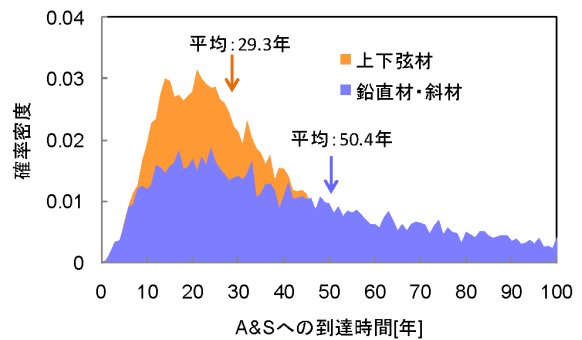


図-7 目視による管理限界への標本寿命分布

スの発生回数を10,000回とした。シミュレーション結果の例として、上下弦材と鉛直材・斜材の目視による管理限界への標本寿命分布を図-7に示す。確率分布の最頻値はいずれも約20年となっているが平均は上下弦材で約30年、鉛直材・斜材で約50年となっている。

以上より算出された目視による管理限界への到達時間の確率分布(標本寿命分布)を用いることで、ディリクレ分布の期待値 $E(\omega_i)$ 、および分散 $\sigma^2$ を算出し、式(5)、(6)を用いて定数パラメータ $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$ を推計した。なお、腐食速度に換算するためには、健全度であるA&Sから腐食量へと変換する必要がある。本研究では点検要領<sup>3)</sup>に従い、状態A&Sは対象部材の母材

板厚が10%減厚した状態であると定義した。これにより、母材板厚の10%減厚に到達する時間の期待値と分散に基づき、定数パラメータ  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$  を推計している。したがって、時間の経過とともにディリクレ分布の特性が変化しないものと仮定している。推計した定数パラメータ  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$  は部材により異なるが、例えば、部材番号 02LB-16 の下弦材に対して推計した定数パラメータは、 $\alpha = (210.35, 76.79)$  であった。以上より、重みベクトル  $\omega_{LB-16}$  の確率密度関数が決定され、統計モデルに基づく腐食劣化のシミュレーションを実施することが可能となる。

(5) 累積確率の算出

長大橋に対するフォルト・ツリー分析を実施するためには、末端事象である鋼材の腐食に関して、部材ごとに経過時間と腐食限界寿命の累積確率（分布関数）との関係を把握する必要がある。この累積確率を算出するために、本研究では統計モデルを用いた腐食劣化シミュレーションを実施する。

長大橋を構成する部材  $i$  の統計モデルは、理論モデルに基づいて設定される2本の悲観・楽観パス  $f_i(t, 1), f_i(t, 2)$  とそれぞれに対する重みベクトル  $\omega_i(1), \omega_i(2)$ 、および確率誤差項  $\varepsilon_i$  を用いて式(2)のように表される。ここで重みベクトル  $\omega_i(1), \omega_i(2)$  と確率誤差項  $\varepsilon_i$  は部材ごとに推計した定数パラメータ  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$  により制御される確率変数である。そこで、モンテカルロシミュレーションを用いて、腐食限界寿命の累積確率を数値計算により求める。具体的には、まずディリクレ分布  $D(\omega_i|\alpha)$  に従う乱数と、1次元正規分布  $N(0, \sigma_i^2)$  に従う乱数をそれぞれ発生させる。発生させた重みベクトル  $\omega_i(1), \omega_i(2)$  と確率誤差項  $\varepsilon_i$  の実現値を用いることで、式(2)の腐食過程を具体的に記述することができる。つぎに、その腐食過程が、部材  $i$  の腐食限界値に到達する時間を求め、これを記録する。この操作を繰り返すことで、腐食限界値へ到達する時間（腐食限界寿命）の確率分布を算出することができる。また、任意の経過時間  $t$  に対する累積確率  $\tilde{F}_i(t)$  は、確率密度関数を0から  $t$  まで積分することで得られる。例として、前節と同様の下弦材（LB-16）を対象とした腐食限界値（活荷重）へ到達する腐食限界寿命分布を図-8に示す。また、図-9には、同部材の累積確率  $\tilde{F}_{LB-16}^c(t)$  を示す。下弦材（LB-16）においては、活荷重と風荷重に対する腐食限界値が同様であることから累積確率も同様となっており、約110年で累積確率50%となっている。一方で地震荷重は橋軸直角が約130年で、橋軸が約170年で累積確率50%となっている。これらの順序はFEMモデルにより把握した腐食限界値が反映された結果となっている。当該部材に関

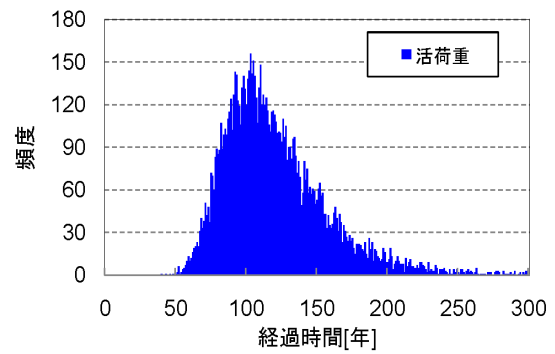


図-8 終局限界到達年数の分布 (02LB-16)

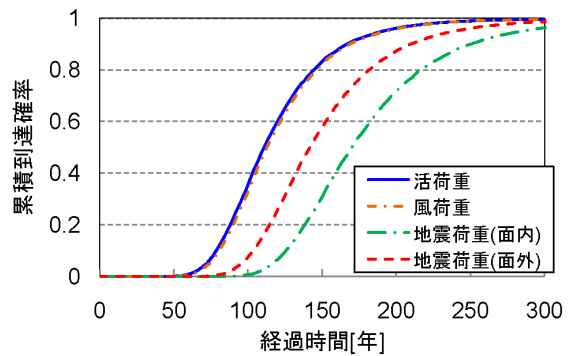


図-9 各荷重条件での累積確率 (02LB-16)

しては活荷重リスクが最も高くなり、これを代表リスクとして4.のライフサイクル費用評価とフォルト・ツリー分析で用いることとする。その他の部材についても同様に代表リスクは、

$$\tilde{F}_i^*(t) = \max_c \left\{ \tilde{F}_i^c(t) \right\} \quad (7)$$

で決定することができる。以上の計算を全179部材、および想定した4つの荷重条件でそれぞれ実施することで、各部材の腐食限界寿命への累積確率を算出した。

4. 最適点検方針の検討事例

(1) 概要説明

3.のハイブリッド劣化予測手法を用いた鋼材腐食の劣化過程に基づいてライフサイクル費用とリスク費用を算出し、トータル費用最小化の観点から最適点検間隔を決定する。ただし、ライフサイクル費用に関しては、本研究で想定しているような鋼材の腐食限界値に達した段階での補修実績が存在しないために、その補修費用は仮想的に設定せざるを得ない。ここでは、補修費用として長大橋の更新費用（再構築費用：撤去費用は含まない）の10%と1%を要するものと考え、2種類のライフサイクル費用について検討を行うこととする。ただし、後述するとおり、今回の分析においては補

修費用の多寡によって点検間隔が影響を受けるようなケースを確認することはできなかった。点検間隔に対する実質的な検討期間を20年以内と考えると、ライフサイクル費用に対しては点検費用が支配的なパラメータであったことを予め断っておく。

(2) ライフサイクル費用評価

a) ライフサイクル費用の定式化

ライフサイクル費用を検討する期間を  $T$  とし、期間  $T$  中の任意時点  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) とする。部材  $i$  に対して点検間隔  $z$  で目視点検を行い、腐食限界値に到達していることが判明した場合には直ちに補修が実施される。すなわち目視点検と補修が同時点で実施されると考える。ここで部材  $i$  に要する補修費用の流列  $C_i^z(t)$  をハイブリッド劣化予測結果(腐食限界寿命の累積確率)  $\tilde{F}_i^*(t)$  を用いて、

$$C_i^z(t) = \tilde{F}_i^*(t_z^o) \times c_i \quad (8)$$

と定義する。式中、 $t_z^o$  は時点  $t$  における前回補修時点(補修実績が存在しない場合は建設時点)からの経過時間である。また、部材  $i$  の補修費用  $c_i$  は一定とする。点検と補修が同時に実施されるので、点検時点で  $\tilde{F}_i^*(t) \neq 0$  であれば、補修により  $\tilde{F}_i^*(t) = 0$  となる。したがって、補修費用流列は点検間隔  $z$  に依存する。さらに、このとき目視点検と補修の実施の有無を表すダミー変数  $\delta^{t,z}$  を、

$$\delta^{t,z} = \begin{cases} 1 & \text{点検・補修が実施される場合} \\ 0 & \text{点検・補修が実施されない場合} \end{cases} \quad (9)$$

と表す。合計  $I$  の部材で構成される長大橋の  $T$  期間のライフサイクル費用は、

$$LCC^T(z) = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+\rho)^t} \left[ \delta^{t,z} \left\{ \sum_{i=1}^I C_i^z(t) + w \right\} + \sum_{u=1}^U \delta^{t,u} C_u \right] \quad (10)$$

となる。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となる費用、例えば塗装費用等である。また、 $\delta^{t,u}$  は式(9)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な点検・補修政策モデルは、

$$\min_z \{ LCC^T(z) \} \quad (11)$$

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  $z$ 、点検費用  $w$ 、補修政策を決定する問題に帰着できる<sup>2)</sup>。ただし、本研究

表-6 費用内訳

費用項目	ケース 1	ケース 2
点検費用 (そのうちの足場費用)	464,000 (76,000)	464,000 (76,000)
塗装費用	303,000	303,000
初期費用	100,000	100,000
補修費用	3,930,000	393,000

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。

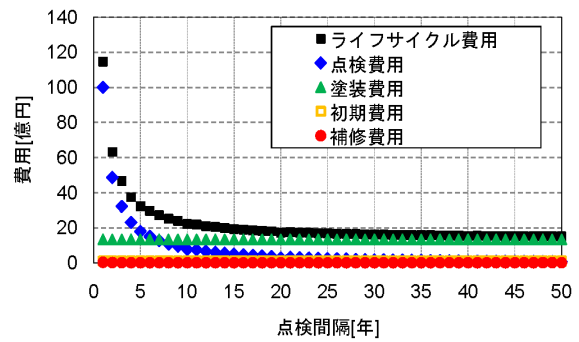


図-10 点検間隔とライフサイクル費用

では長大橋の点検間隔のみに着目し、主たる政策変数として点検間隔  $z$  のみを取り上げることとする。

b) 諸条件の設定

フォルト・ツリーが179部材により構成されるA橋のライフサイクル費用評価を実施する。179部材の劣化曲線は3.のハイブリッド劣化予測の結果を用いる。ライフサイクル費用分析において考慮すべき費用は、点検費用、塗装費用、初期費用、補修費用とした。各費用内訳を表-6に示す。補修費用以外の各費用はこれまでの実績に基づいて簡易に積算を行い、設定している。なお、A橋においては現在、検査車が設置されているが、本研究では検査車を使用しない場合を想定することとする。しかし、その場合であっても検査車使用時と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。また、表-6中に示す初期費用は、本研究で検討した点検政策を採用した初年度に必要な費用を意味する。A橋はすでに検査車が設置された状態で共用されているために、初期費用は検査車の撤去費用を表している。補修費用については、腐食限界を対象とした部材補修の実績が存在しないことから、A橋全体の再構築に要する費用の数%を1つの目安として任意に設定する。このため、補修費用については、その設定がライフサイクル費用に及ぼす影響を把握する目的で、再構築費用の10%と1%の2種類の場合について検討する。その他の解析条件について、解析対象期間は、永続的な使用を前提として300年とし、割引率

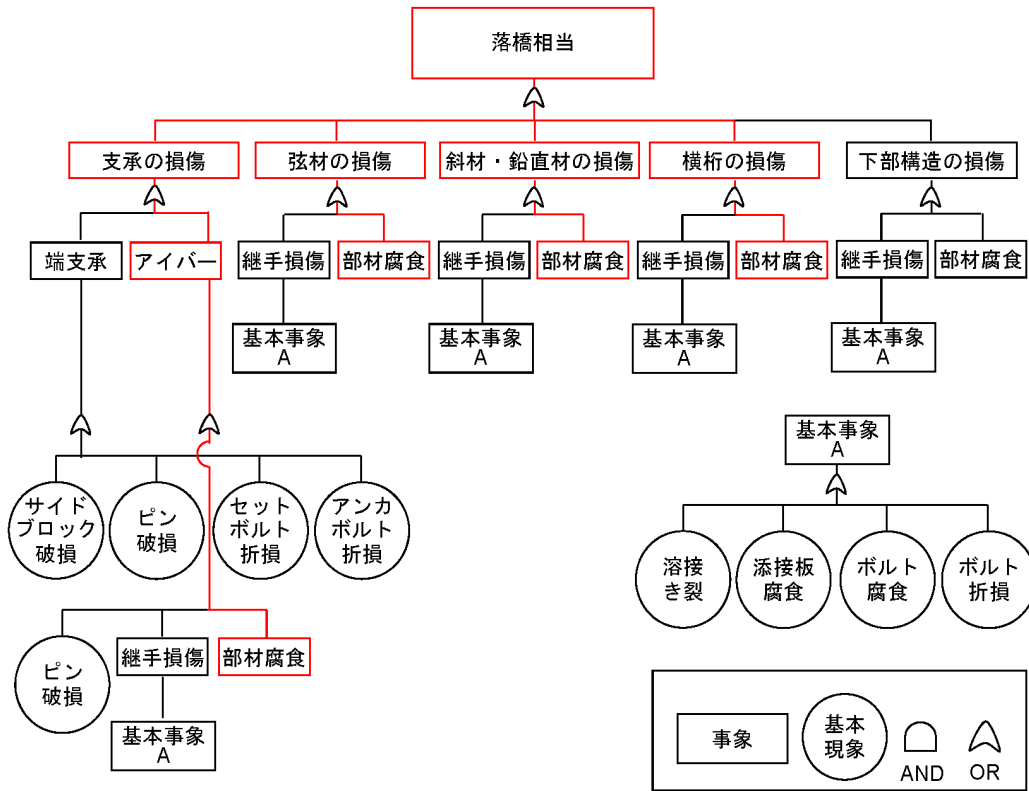


図-11 対象橋梁 A の簡潔化されたフォルト・ツリー (主に鋼材腐食に着目)

は4%とした。また、点検間隔は1年から50年まで1年刻みで設定した。なお、塗装費用は、塗装間隔が20年であることから、20年周期でポリウレタン樹脂の塗装費用および足場費用が必要であると設定している。

ライフサイクル費用の算出において、補修費用は点検ごとに期待補修費用として順次計上されることとし、期待補修費用は、補修が必要な腐食劣化が発生する確率(各部材の累積確率)と補修費用の積として表される。補修が実施された部材に関しては、補修された時点で、腐食劣化に対するリスクが  $\tilde{F}_i^*(t) = 0$  に回復するとして計算を実施した。

c) ライフサイクル費用の算出

点検間隔を1年から50年まで1年間隔で変化させたときのライフサイクル費用を図-10に示す。ライフサイクル費用は点検間隔を1年とした場合に約120億円で最大となり、点検間隔が長くなるに従って低減していき、最終的に点検間隔50年の場合に最小値(約18億円)となっている。同図には、ライフサイクル費用を構成する各費用(点検費用、塗装費用、初期費用、補修費用)の内訳も併記している。本研究では、前述の通り、塗装費用と初期費用は過去の実績に基づき確定的に与えたために、点検間隔に依存せず一定値となっている。とくに、初期費用は塗装費用と比較すると、ライフサイクル費用に占める割合が小さい。一方で、当然のこ

とながら、補修費用と点検費用は点検間隔に大きく依存する。点検間隔が長くなると、いずれの費用も小さくなるが、点検費用は特にその傾向が顕著である。点検間隔6年までは点検費用がライフサイクル費用の中でも支配的要因である。6年以降は塗装費用が最も大きな費用となり、20年以降になると塗装費用が支配的要因となる。

なお、同図において補修費用は1箇所あたり長大橋の再構築費用の10%として与えた(表-6中のケース1)。1箇所あたりの費用であるから10%という値は決して小さくない。しかし今回の分析においては、補修費用がライフサイクル費用に及ぼす影響は非常に小さいものであった(補修費用がライフサイクル費用に占める割合は最大で10%)。補修費用を再構築費用の1%に設定した場合、ライフサイクル費用に占める割合は1%以下となった。したがって、補修費用の精緻化や感度分析を行うことは不要であると判断し、以降の検討では補修費用として再構築費用の10%を用いる。

(3) フォルト・ツリーを用いたリスク発生確率の算出

図-11にA橋の簡潔化されたフォルト・ツリーを示す。本研究では、鋼材腐食に着目するために、図-11中の赤囲みの部分を対象としてリスク評価を実施する。当然ながら、同図のフォルト・ツリーによってA橋で生

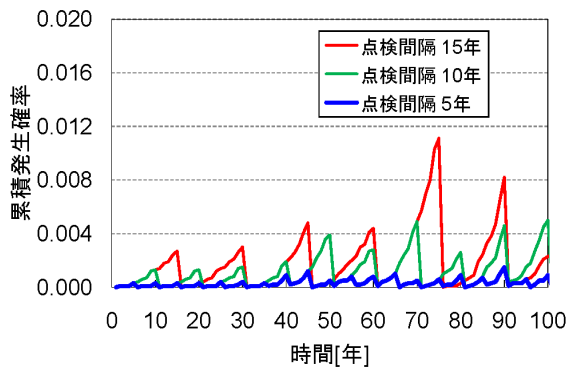


図-12 頂上事象発生リスクの時間推移

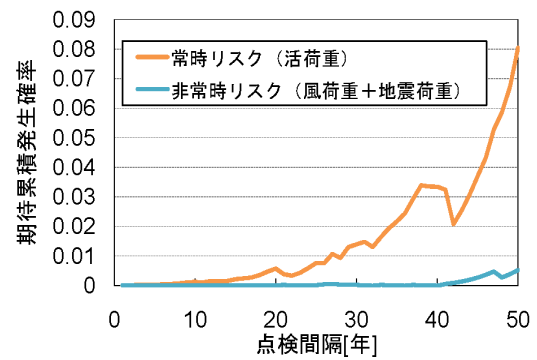


図-13 常時リスクと非常時リスクの時間推移

じうる損傷事象の全てを記載できているとは著者等は考えていない。また、本研究では統計分析を実施するに当たりある程度の点検データが蓄積されている鋼材腐食のみを対象としていることから、提示したフォルト・ツリーは簡潔化されたものであることに留意されたい。ハイブリッド劣化予測により、任意部材  $i$  が腐食限界値に到達するまでの年数に対する累積確率  $\tilde{F}_i^*(t)$  を算出することができる。この累積確率に基づいて算出した式 (8) の  $\tilde{F}_i(t_z^0)$  がフォルト・ツリーの末端事象の生起確率となる。フォルト・ツリー分析の詳細は参考文献<sup>2)</sup>に譲るが、本研究のようにフォルト・ツリーが OR ゲートのみで構成される場合には、頂上事象 (落橋相当リスク) の生起確率  $\mathfrak{R}^z(t)$  は全ての末端事象の生起確率を用いて、

$$\mathfrak{R}^z(t) = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - \tilde{F}_i^*(t_z^0)) \quad (12)$$

で表される。当然のことながら、 $\mathfrak{R}^z(t)$  は点検間隔に依存する。

点検間隔  $z$  をパラメータとして、頂上事象の累積確率の時間的推移を図-12に示す。図中の青線、緑線、赤線は点検間隔を5年、10年、15年と設定したときの落橋相当リスクの累積確率である。いずれの累積確率も時間の経過とともに増加していくが、点検実施時点で0に戻る。点検間隔が大きくなるにつれ、落橋相当リスクの累積確率の最大値および平均値が大きくなることも見て取れる。当然ながら、点検間隔を短くすることで、落橋相当リスクを抑えることが可能である。さらに、同一点検間隔に着目しても、頂上事象の累積確率のピーク値が増減していることがわかる。例えば、点検間隔15年 (赤線) の場合、15年経過時点 (1回目の点検の直前) の累積確率は約0.003であるが、45年時点 (3回目) では約0.005、75年時点 (5回目) では約0.011と大きく異なる。これは一義的にはフォルト・ツリーを構成する179部材の腐食限界値が異なること、劣化速度が異なることに起因する。その上で、点検時点で累積

確率が0以上の部材に対しては補修がなされるために、任意時点  $t$  で実施した点検後に当該部材の累積確率は  $\tilde{F}_i^*(t_z^0) = 0$  となる。しかし、点検時点で  $\tilde{F}_i^*(t_z^0) = 0$  の部材に対しては補修が実施されないために、点検以降は前回補修時点を開始時点としてそれ以降の累積確率が算出される。したがって、ある部材の累積確率が点検直前まで0で推移し、点検直後に急激に立ち上がるような場合には、次の点検時に当該部材が腐食限界値に到達する累積確率は大きくなり、結果として頂上事象の累積確率が大きくなる。このようにフォルト・ツリーに動的効果が存在する場合、最適点検間隔を決定するためには、時間依存型の点検間隔ではなく、状態依存型の点検間隔を検討する必要がある。しかし、この点については本研究の範囲を超えるために、今後の課題としたい。特に動的効果を考慮したリスク低減について検討する際には、リスク管理水準の設定が非常に重要となる。すなわち、想定供用期間の落橋相当リスクの平均値に対してリスク管理水準を設けるのか、それとも最大値に対してリスク管理水準を設けるのか、により検討すべき最適点検政策も大きく変化する。

つぎに、点検間隔を固定して、点検間隔1年から50年までの各点検間隔に対して、ライフサイクル費用の評価期間300年の頂上事象の期待累積確率を算出する。このとき、期待累積確率は累積常時リスク (活荷重) と非常時リスク (風荷重、地震荷重橋軸、橋軸直角) の和として与えられる。そこで図-13には、点検間隔と、累積常時リスクと非常時リスクの関係を示す。図-13より再現期間が長い非常時リスクは常時リスクと比較して非常に小さい値となっていることがわかる。非常時リスクがこのような小さくなる理由として、上記の再現期間の他にも各非常時のFEM解析結果が常時の場合とさほど変わらなかったことを指摘できる。

#### (4) 最適点検政策の評価

フォルト・ツリー分析を通して、長大橋の頂上事象 (落橋相当リスク) の累積確率を算出することができる。

このとき、ある時点のリスク費用は、

$$\text{リスク費用} = \text{再構築費用} \times \text{頂上事象の累積確率} \times \text{非常時リスクの発生確率} \quad (13)$$

として定義できる。本研究においては、非常時リスクの発生確率は風荷重に関しては再現確率 50 年、地震荷重に関しては再現確率 100 年として設定し、年間の発生確率はそれぞれ単純に 0.02 と 0.01 を与えた。また、頂上事象の累積確率である程度の考慮はなされているものの、定式化においては非常時リスクの発生により、各部材は 100% 落橋相当の被害を被ると仮定している。本来であれば各部材に対して fragility 曲線を設定しておくことが妥当であると考えられる。さらに非常時リスクの発生に関しても、発生確率が年度ごとに均等となるようなポアソン過程を想定している<sup>19)</sup>。地震リスクを例にとると、近い将来に発生が懸念されている東海地震、東南海・南海地震のようなプレート間地震は周期的に発生しており、発生確率が時間の経過とともに増加するという特性を持っている。このようなプレート間地震を考慮する際には、その発生過程をブラウン型経過時間モデル等の非ポアソン過程<sup>20)</sup>を用いて表現することが必要である。著者等は以上のような課題の重要性を認識しながらも、本研究ではハイブリッド劣化予測手法の開発と、最適点検間隔の決定手法の構築に重点を置くために、リスク費用を簡略化して算出していることを断っておく。なお、リスク費用算出の精緻化に関しては今後の重要な課題であることは論を俟たない。

4.(2) のライフサイクル費用と、式 (13) に基づき、トータル費用を算出し、点検間隔とトータル費用の関係を整理する。長大橋の再構築費用を 39,300 百万円としたときのトータル費用を図-14 に示す。同図からトータル費用は点検間隔 7 年から 12 年までほとんど変化せず、60 億円程度で推移していることがわかる。点検間隔が 20 年を超えたあたりから、リスク費用の影響により、トータル費用が大きくなっている。この中で特にトータル費用を最小化する点検間隔を最適点検間隔とすれば、7 年と決定することができる。2.(1) でトータル費用は凸関数となり、トータル費用を最小化する点検間隔は一意に定まると述べた。しかしながら、図-14 を確認する限りにおいて、点検間隔を一意に定めることは難しい。これはリスク費用が時間に対して緩やかに増加していることが原因である。また、例えば点検間隔が 7 年と一意に定まったとしても、それはあくまでも一試算結果であり、7 年の妥当性に関しては実務的視点から検証し、最終的な検査間隔を決定しなければならない。なお、本研究においても、本試算結果をもって、長大橋 A の点検間隔を 7 年と決定するものではな

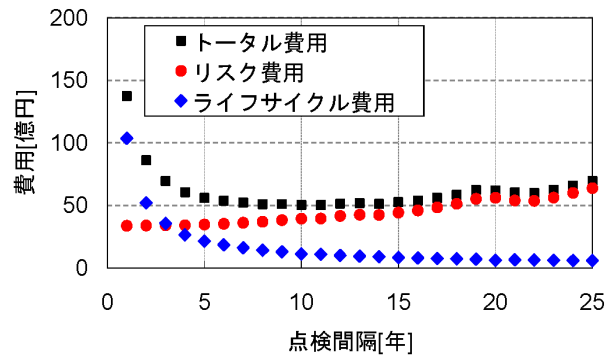


図-14 トータル費用と点検間隔

いことを断っておく。

## 5. 実用化への示唆

### (1) 留意事項

2. で述べたことでもあるが、重複を恐れずに記述する。本研究では対象橋梁の最適点検間隔は 7 年であると述べた。現行の道路橋に対する近接目視点検の間隔が概ね 5 年と定められていること、わが国の道路橋の老朽化が進展しており、その点検間隔 5 年を短縮するような流れがあることを勘案すると、それらに逆行するような問題提起を行っているようにとらえられるかもしれない。最適点検間隔 7 年は、長大橋の構造安全性に影響を及ぼすに至る程度の損傷（鋼材の腐食限界値）を対象として決定された値である。目視点検の判定基準が局部的な減厚 10% を最低ランクと設定していることから、目視点検に基づき点検間隔を決定すれば、7 年よりも短くなることは容易に想像できる。しかしながら、その一方で現行の目視点検間隔がどのように決定されたかという議論は必ずしも明確ではない。長年、実務に携わる点検員や技術者の経験や知識といった潜在的専門知に基づいて決定されたものと考えられ、それらが実務的な制約条件を加味した上で最も適切な点検間隔を与えていると推察できる。しかし、社会基盤施設の維持管理に要する費用の支出には今後一層の説明責任が問われることになる。そのときに、このような潜在的専門知をモデル化し、実務を通して蓄積された情報（目視点検データ等）を用いて最適点検間隔を決定することができる方法論を構築しておくことが重要となる。実際に、最適点検間隔 7 年という数値そのものは前提や条件を変えることで、それに連動して変わり得る。例えば、本研究で示したフォルト・ツリー（図-11）は簡潔化されたものであるとともに、分析においてもすべての事象を考慮しているわけではない。現時点で劣化が進展した点検データが得られていない末端事象、発生してもフォルト・ツリーの頂上事象（落橋

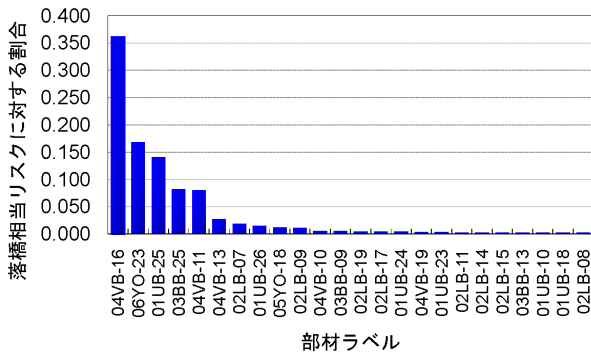


図-15 落橋相当リスクへの各部材の寄与 (点検間隔 7 年)

相当) に及ぼす影響が極めて小さい末端事象, または, 統計的劣化モデルにより予測することが困難な末端事象は, フォルト・ツリー分析において考慮していない. 今後, それらの末端事象を考慮することでリスク費用が増加し, 結果的に最適点検間隔が短縮されることが十分に考えられる. したがって, むしろ本研究で算出した最適点検間隔 7 年が議論の出発点であることを認識し, このような意思決定問題に対して技術者間で議論できるような基礎情報を提供した点に本研究の価値を見出して欲しい. また, 構造安全性を保証した上で, 合理的な点検や維持管理のあり方を体系的な枠組みの中で考えることの重要性を理解して頂きたい.

(2) リスクマネジメントの実用化に向けて

フォルト・ツリー分析を通して, 頂上事象の累積確率を算出した. その過程においては, 全ての末端事象 (全 179 部材) の腐食限界寿命の累積確率を算出し, それらを論理的規則 (OR ゲート) に従って集計化した. したがって, 点検間隔を固定したときに算出される頂上事象 (落橋相当リスク) の累積生起確率に対して, いずれの末端事象 (部材) がどの程度寄与しているかを定量的に評価することができる. 例えば, 最適点検間隔 7 年で考えると, 図-13 中の頂上事象の累積確率は 0.002 であった. この累積確率 0.002 に寄与する各部材の相対的な割合を算出し, 寄与が大きい上位 24 部材をその割合とともに図-15 に示す. 同図から, 部材 04VB-16 が全体 (累積確率 0.002) の約 36% と大きな割合を占めていることがわかる. さらに, 図-16 は, これらの上位 5 位の部材を FEM モデル上にコンター図として示したものである. 青が濃いほど当該部材の寄与が大きいことを表している. このように, ある点検間隔を採用したときに, 想定するリスク発生への寄与という視点から特に留意すべき部材を視覚化することができる. また, 部材 04VB-16 のように寄与度が高い部材に関するリスク発生を抑制することで, 長大橋全体の構造安全リスクの発生確率がどの程度低減可能かも検討するこ

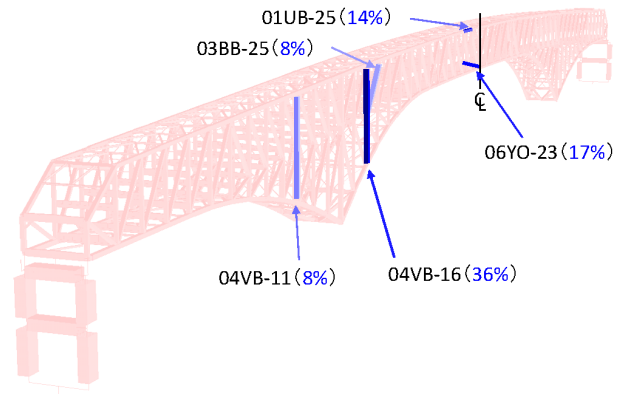


図-16 落橋相当リスクへ寄与する上位 5 部材

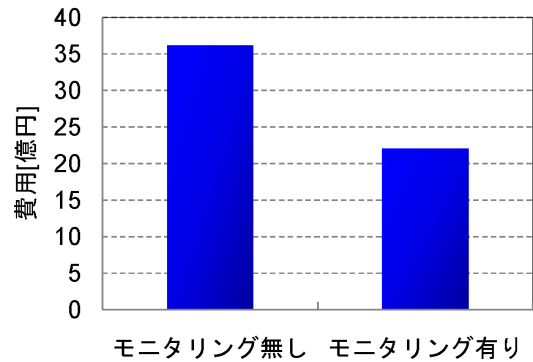


図-17 モニタリングとリスク費用 (対象部材: 04VB-16)

とができる.

具体的なリスク発生の抑制策として, モニタリング手法の導入を検討してみる. 部材 04VB-16 のリスクがモニタリングにより完全に抑制できる, すなわち当該部材の腐食限界寿命の累積確率を 0 として再度リスク費用を算出したものを図-17 に示す. 図-17 は, 部材 04VB-16 に対しても他部材と同様に点検間隔 7 年で近接目視を実施した場合の長大橋全体のリスク費用 (図-14 と同一) と, 部材 04VB-16 のリスク発生確率を常時 0 と設定した場合の長大橋全体のリスク費用を示している. 後者 (図中の右側) の方が約 14.1 億円リスク費用が小さくなった. これはリスク発生を完全に抑制したこと, すなわちモニタリングを導入したことによる経済効果 (便益) である. このことから, モニタリング手法の導入に伴う初期費用, 年間の管理費用および更新費用がどの程度であれば, モニタリング手法を導入する価値があるのかを定量的に評価することが可能である. 現在, モニタリング手法に関しては多くの手法が提案されているが, 実用化に至った事例は多くはない. それはセンサー等のハードウェアの耐久性, 情報通信システムの導入費などの問題があげられるが, モニタリング手法を導入することで定量的データが取得できる



にもかかわらず、1) モニタリングを導入すべき部材を定量的指標(重要度)に基づき評価できない、2) モニタリング導入効果(経済性)を定量的に評価できないことも大きな要因となっていると推察できる。さらに、劣化予測技術やフォルト・ツリー分析のようなマネジメント技術を組み合わせることで様々な意思決定問題への適用が可能となる。

## 6. おわりに

本研究では、ライフサイクル費用とリスク費用の総和で定義されるトータル費用を評価指標として、その最小化に基づいて長大橋の最適点検間隔を決定するための方法論を構築した。特に長大橋の構造安全性に影響を及ぼす要因として鋼材腐食に着目した。はじめに、腐食理論式を用いて、部材ごとに鋼材腐食過程のサンプルパスを発生させ、同時に構造解析により腐食量の終局限界値(腐食限界値)を算出した。つぎに、サンプルパスの荷重平均に基づく腐食劣化統計モデルを定式化し、それを目視点検データで修正するようなハイブリッド劣化予測手法を提示した。さらに、この劣化予測結果に基づき、1) ライフサイクル費用、2) フォルト・ツリー分析による落橋相当リスクの発生確率およびリスク費用を算出し、最適点検間隔を決定する方法論を提示した。最後に、提案手法を阪神高速が管理する実際の長大橋 A の点検間隔の決定問題へ適用し、実証分析を通してトータル費用最小化を達成する最適点検間隔を7年と試算した。

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構造安全性を考慮した最適点検間隔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いえる。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が必要である。さらに、今後の課題として以下をあげる。第一に、条件設定や方法論の高度化がある。例えば、本研究では長大橋の構造安全性に影響を及ぼすような損傷に対する補修費用を再構築費用の10%と設定した。これはそのような損傷に対する補修実績が存在しないためであるが、条件設定の精緻化は実務上は重要な課題である。また、リスク費用の算出に際しては、地震発生確率の与え方、地震発生時に深刻な被害の発生確率の与え方を極めて簡略化した形で扱った。このような方法論の高度化に関しても継続的な改善が必要である。第二に、非正常な補修政策の検討がある。本研究においては損傷がある程度進行した段階で事後的に補修を行うという前提を設けた。しかし、一般的には予防保全の有効性が指摘されていることから、特定の

損傷に対して、その損傷程度によって補修工法を設定し、最適な補修政策を決定することが可能である。ただし、このときには、フォルト・ツリー分析で算出される頂上事象の累積確率が非正常過程であることに留意が必要となる。非正常問題に対して最適補修政策を検討する場合には、補修政策も非正常とならざるを得ない。非正常性を考慮した最適補修政策を検討するための最適化モデルの開発が必要である。第三に、本研究ではフォルト・ツリー分析の中でも部材腐食に着目し、これを一様腐食としてモデル化した場合について検討を実施した。今後は、局部腐食やボルトの緩みなど多様な劣化事象を考慮していく必要がある。このとき、末端事象は膨大な数となるために、すべての劣化事象をFEM解析により検討していくことは困難である。これを解決するために、各下位事象が頂上リスクへ及ぼす寄与を簡易的に評価し、寄与の高い事象から順にFEM解析で詳細な検討を実施していくようなリスク評価アルゴリズムの開発が必要不可欠である。第四に、その他の社会基盤施設への適用があげられる。多種多様な部材で構成される複雑な構造システムとして長大橋に着目したが、提案した方法論の枠組みは普遍的である。したがって、目視点検データが蓄積された社会基盤施設への適用を通して、方法論の拡張と改善を行うことが重要である。また、対象とする社会基盤施設によっては目視点検データが十分に蓄積されていないケースも考えられる。そのような場合には、点検者や技術者の主観的情報を初期情報として与え、目視点検の蓄積に応じて、適宜モデルを更新していくようなベイズ更新モデルが不可欠となる。さらに、本研究では基本的に維持管理問題を想定しているが、新設橋梁に対しても本研究を応用可能であると考えている。ライフサイクル費用やリスク費用を低減する点検設備やモニタリング手法を建設当初から導入することで、構造安全性および経済性にどの程度寄与するかを予め定量的に評価することが可能である。

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) Bedford, T. and Cooke, R.: *Probabilistic Risk Analysis*, Cambridge University Press, 2001, 金野秀敏訳:

- 確率的风险解析, 基礎と方法, シュプリンガー・ジャパン, 2006.
- 2) 貝戸清之, 金治英貞, 小林寛, 間嶋信博, 大石秀雄, 松岡弘大: 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, 土木学会論文集 F4, Vol.67, No.2, pp.74-91, 2011.6
  - 3) 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.
  - 4) 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.
  - 5) 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.
  - 6) 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.
  - 7) 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.
  - 8) 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.
  - 9) 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.
  - 10) 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.
  - 11) 青木一也, 小田宏一, 児玉英二, 貝戸清之, 小林潔司: ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価, 土木技術者実践論文集, No.1, pp.40-52, 2010.
  - 12) 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 実践的アセットマネジメントと第2世代研究への展望, 土木技術者実践論文集, No.1, pp.67-82, 2010.
  - 13) 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.
  - 14) 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.
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 杉岡弘一, 松本茂, 大石秀雄, 金治英貞, 馬越一也, 長井正嗣: 局部座屈を簡易に考慮するファイバーモデルを用いた橋梁全体系解析に関する基礎的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.57A, pp.703-714, 2011.3
  - 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) 小川貴裕, 藤森裕二, 紅谷昇平, 貝戸清之, 小林潔司: 地震リスクを考慮した港湾矢板群の維持補修シミュレーションモデル, 土木学会論文集 F4, Vol.67, No.1, pp.14-32, 2011.
  - 20) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会: 長期的な地震発生確率の評価手法について, 2001.

(2011. 9. 9 受付)

## OPTIMAL INSPECTION CYCLE OF A LONG SPAN BRIDGE USING THE HYBRID DETERIORATION PREDICTION AND FAULT TREE ANALYSIS

Kiyoyuki KAITO, Hidesada KANAJI, Kouichi Sugioka, Hideo OHISHI and Kodai MATSUOKA

In this study, the authors develop a methodology for determining the optimal inspection cycle of a long span bridge, based on the minimization of total cost, which is defined as the sum of lifecycle and risk costs. As a concrete deterioration phenomenon, this study is focused on steel corrosion. Firstly, a sample path of the steel corrosion process for each member is formed with the theoretical equation for corrosion, and the ultimate limit of corrosion is calculated through structural analysis. Secondly, the authors formulate a statistical model based on the weighted average of sample paths, and propose a hybrid deterioration prediction method for modifying it with visual inspection data. Next, based on the results of the hybrid deterioration prediction, the authors calculate the probability and cost of the risk of bridge collapse with (1) lifecycle cost and (2) fault tree analysis, and determine optimal inspection cycle. In addition, the proposed method is applied to the issue of determining the inspection cycle for a long span bridge, and its effectiveness is discussed empirically.