

地震リスク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

貝戸清之¹・松岡弘大²・金治英貞³・杉岡弘一⁴・大石秀雄⁵

¹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

²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

³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

⁴正会員 阪神高速道路株式会社 大阪管理部 保全技術課 (〒552-0006 大阪市港区石田 3-1-25)

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

⁵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

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終局限界値を算出する。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出する。

Key Words : *fault tree analysis, visual inspection, 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¹⁾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²⁾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、目視点検は部材個々の劣化状態を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²⁾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最低ランクであったとしても、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10%程度である)。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者判断に基づいて、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。構造安全性を長大橋のスパン中央の変位量で規定し、設

定した荷重条件下で変位量が限界値に到達するまで鋼材を減厚させ、到達時点の腐食量を限界値として定義する。なお、2つの限界値という用語を区別するために、前者を構造安全限界値、後者を腐食限界値と呼ぶ。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) 統計モデルの目視点検データによる推計、5) 腐食限界値への到達時間分布の算出、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。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 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。この際には、長大橋全体モデルを用いたFEM解析、過去の目視点検データやその経験を踏まえた技術的判断（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。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。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。図から明らかのように、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。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。

(2) 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）を援用し、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的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モデルと定義する。このようなハイブリッド劣化モデルは、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³⁾。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確率分布に基づいて、フォルト・ツリー分析における末端事象の生起確率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計算フローを示す。各ステップの具体的な内容については3.で詳細

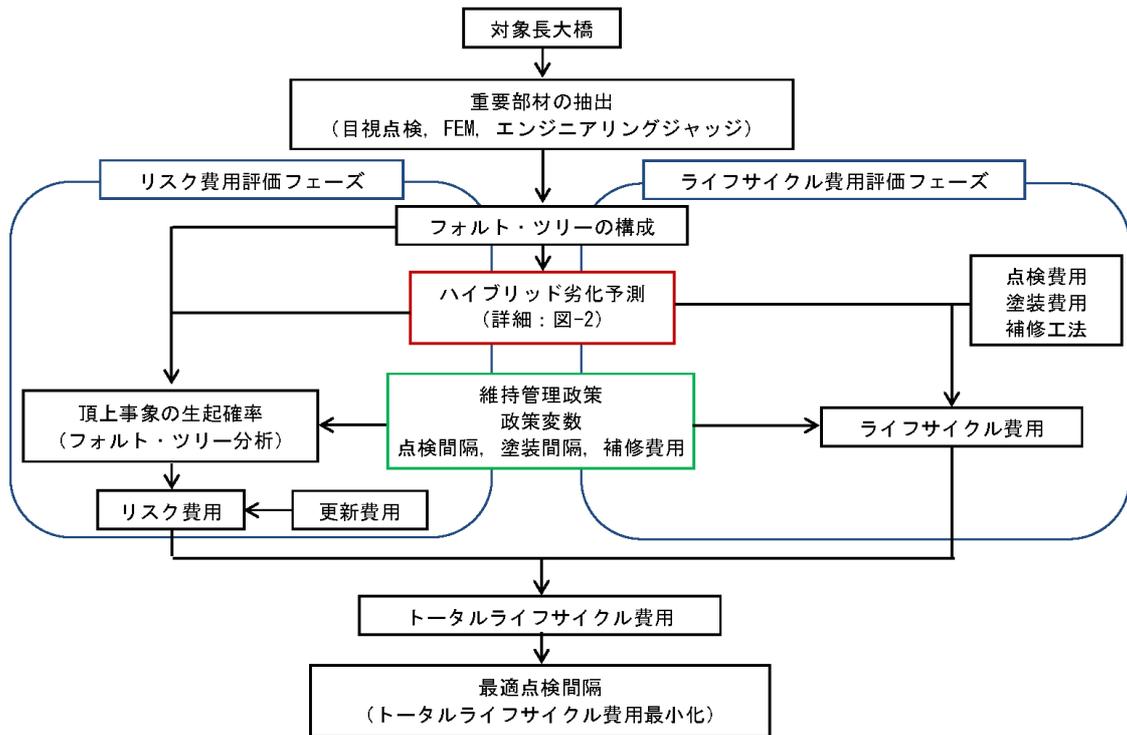


図-1 本研究のフロー

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、腐食劣化パスを設定する。ここで腐食劣化パスは時間と腐食量の関係で表す。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、サンプルパスは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)。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。第3ステップでは、統計モデルをサンプルパスの荷重和として定義する。図中のサンプルパスが2本であるので、重み係数は ω_1 と ω_2 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²⁾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、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が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組の重み係数に対して、10,000本の劣化パスを発生させ、限界腐食量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、時間経過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。この累積確率を用いてライフサイクル費用を算出したり、フォルト・ツリーの末端事象の生起確率を算出する。

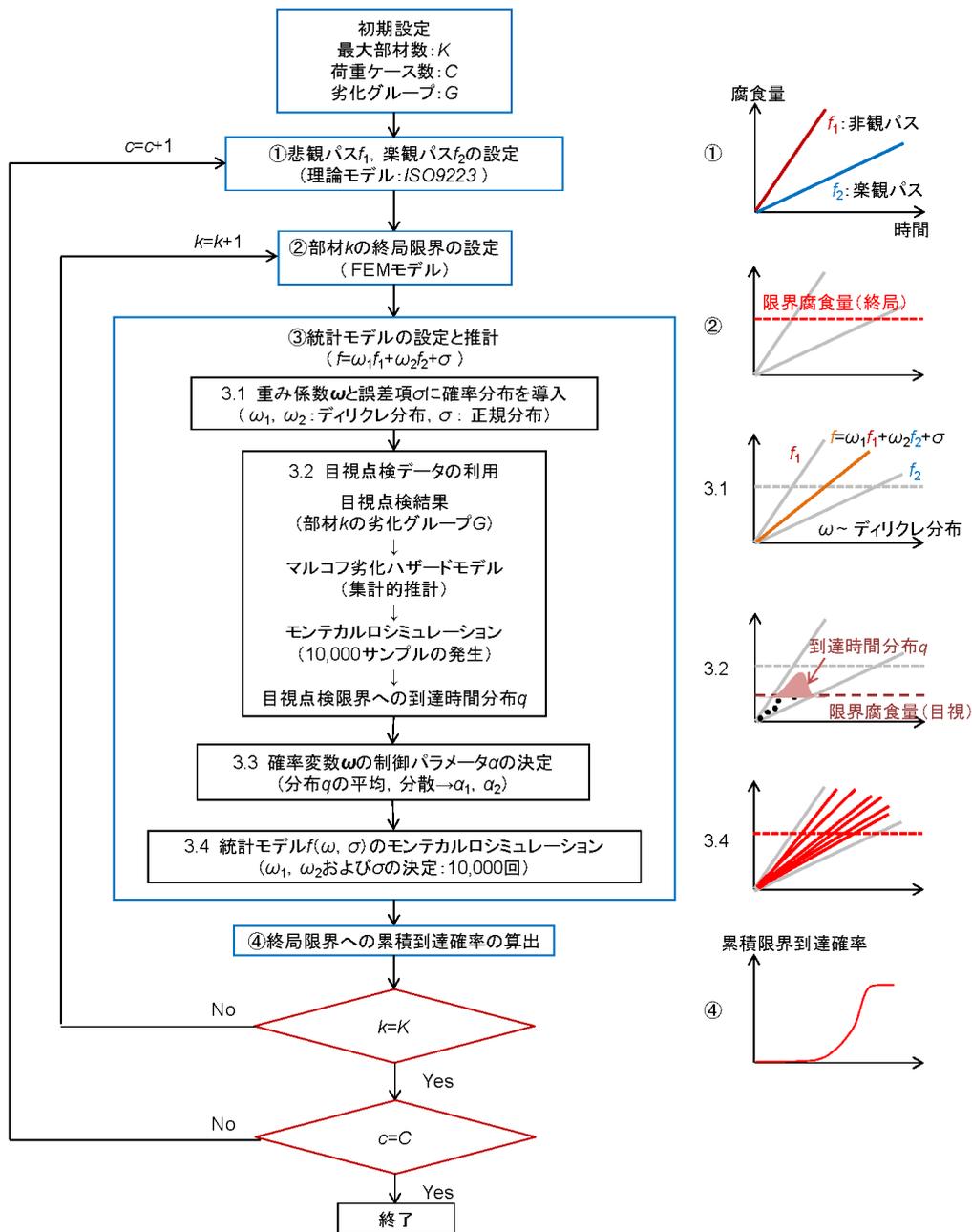


図-2 ハイブリッド劣化予測のフロー

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、それらの中の代表的な長大橋(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、前述したように各部材種別(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。港大橋のフォルト・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、2.(2)で理論モデルについて、2.(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、2.(4)で統計モデルについて詳述する。

最後に 2.(5) で腐食限界寿命の累積確率を算出する。

(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に区分しており、各カテゴリーの組合せにより、対象とする鋼材の環境腐食速度を定めている。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楽観パスと悲観パスと定義し、楽観パスとして $1.3\mu\text{m}/\text{年}$ を、悲観パスとして上限値の 2 倍に相当する $200\mu\text{m}/\text{年}$ を採用することとする。悲観パスのみに上限値の 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、これらの楽観パスと悲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、2.(4) で詳述するように、楽観パスと悲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 本の楽観・悲観パス $f_i(t, 1)$, $f_i(t, 2)$ は、

$$f_i(t, 1) = 0.0013t \quad (1a)$$

$$f_i(t, 2) = 0.4t \quad (1b)$$

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、鋼材腐食による構造安全限界値を把握することを目的として、FEM モデルによって各部材の腐食限界値を算出する。

FEM モデルとしてファイバーモデルに基づく橋梁全体系モデルを用いる。局部座屈といった断面変形を伴う座屈を表現するために、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。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として考えてほしい。

FEM 解析は、想定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(面内), 地震荷重(面外))を一定とし、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。減厚は対象部材ごとに一様とした。これにより、部材ごとの腐食限界値を把握した。なお、終局状態として、変位(たわみ)や降伏状態、解析限界を採用している。対象部材は、上弦材, 下弦材, 鉛直材, 斜材, 上横桁, 下横桁, アイバーとし、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。

(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、楽観パスと悲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構造安全限界値とそのときの腐食限界値を算出した。さらに、第 1 ステップと第 2 ステップを総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、実際の劣化現象 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³⁾。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、

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

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 ω_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、 ε_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。統計モデル(2)の重み行列 ω_i と確率誤差項 ε_i は確率変数である。これら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、 ω_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。この初期データにおける定数パラメータベクトルに目視点検結果を反映させることで、実現象に則したディリクレ分布を求めることができる。

目視点検結果を反映した定数パラメータベクトル $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_K)$ の設定方法について述べる。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 σ^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 $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_K)$ の制約条件を表すとともに、この制約条件を通じて点検結果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用いている。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 $D(\omega_i|\alpha)$ における期待値 $E(\omega_i)$ 、および分散 σ^2 を推計する問題へと帰着する。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(劣化後期に腐食速度が増すような状況が反映されない)。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

表-1 長大橋の腐食に対する目視点検結果

	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。

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。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っておく。そこで、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、目視点検における管理限界時点でのサンプル平均、および分散をディリクレ分布 $D(\omega_i|\alpha)$ における期待値 $E(\omega_i)$ 、および分散 σ^2 として用いることを提案する。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-1に示す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。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。しかしながら、集計的マルコフ劣化ハザードモデルに関しては、堀等⁴⁾の論文において詳述されているために、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-1のA&S)に到達する時間を求めるために、目視点検データから各健全土間の推移確率を算出する。対象橋梁である港大橋においては、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

表-2 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

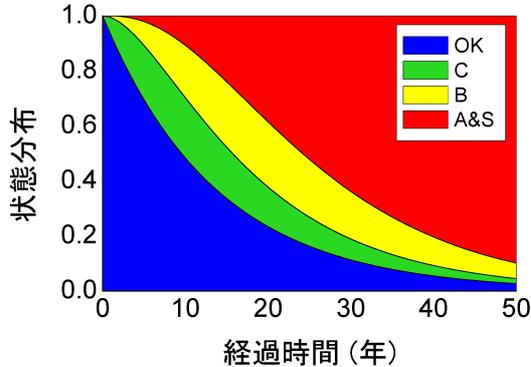


図-3 腐食の健全度分布（上下弦材）

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、鉛直材、斜材、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-1に示す。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、腐食による母材板厚が10%程度減少している状態を示している。B、Cについては、これらの中間状態となっている。目視点検データから、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-1の点検結果に基づいて、上下弦材のマルコフ劣化モデルを集計的に推計した。表-2に、目視点検データから推計したマルコフ推移確率を示す。さらに、表-2に基づいて算出した上下弦材の健全度分布を図-3に併せて示す。健全度OKの部材の割合は、約10年で半数近くになることが見て取れる。さらに、25年程度で、状態A&Sの部材が半数以上を占めているとともに、40年を過ぎると全上下弦材の80%程度が状態A&Sとなってしまう。

c) 統計モデルの推計

以上のように算出したマルコフ推移確率を用いて、状態が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を算出し、期待値 $E(\omega_i)$ 、および分散 σ^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、初期状態として状態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-2に示され

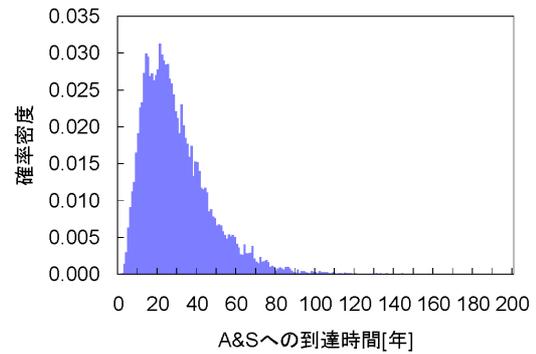


図-4 目視による管理限界への到達時間の分布（上下弦材）

る推移確率で他の状態（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、状態が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。以上より推計したマルコフ推移確率に基づくA&Sへの到達時間を1つのサンプル値とする。この操作を十分に繰り返すことで、健全度OKからA&Sへ到達する時間の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サンプルパスの発生回数を10,000回とした。シミュレーション結果の例として、上下弦材の目視による管理限界への到達時間の確率分布を図-4に示す。確率分布は20～30年でピーク値を有していることがわかる。

以上に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を用いることで、期待値 $E(\omega_i)$ 、および分散 σ^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²⁾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、下弦材(LB-16)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 ω_{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) 累積到達確率の算出

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腐食に関して、各部材に対して経過時間と限界腐食寿命の累積到達確率との関

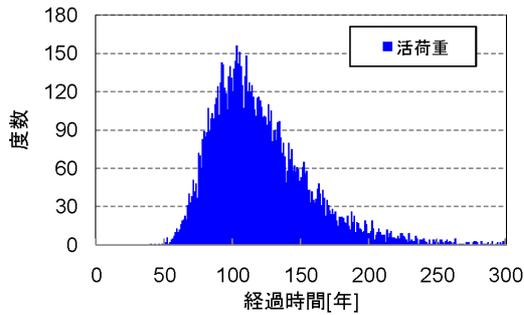


図-5 終局限界到達年数の分布 (02LB-16)

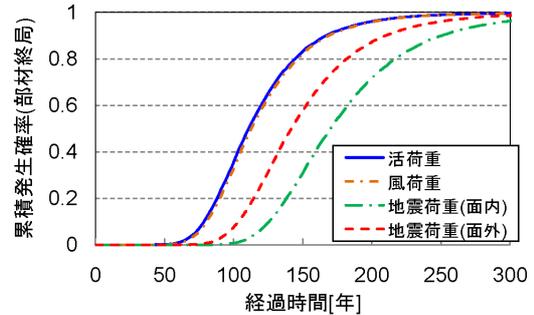


図-6 各荷重条件での累積発生確率 (02LB-16)

係を把握する必要がある。この累積到達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 ε_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 ε_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ために、モンテカルロシミュレーションを用いる。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 ε_i の実現値を用いることで、式 (2) を時間の関数として具体的に記述することができる。つぎに、算出した関数が、FEM により把握した部材 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 に対する累積到達確率は、確率密度分布を 0 から t まで積分することで得られる。例として、前節と同様に下弦材 (LB-16) を対象として算出した終局限界 (活荷重) へ到達する年数の分布を図-5 に示す。また、図-6 には、同部材の累積到達確率を示す。下弦材 (LB-16) においては、活荷重と風荷重における腐食限界値が同様であることから累積発生確率も同様となっており、約 110 年で累積発生確率 50% となっていることがわかる。一方で地震荷重は面外が約 150 年で、面内が約 180 年で累積発生確率 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。以上の計算を対象とした全 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到達確率を算出した。

4. 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。なお、講演会当日には実橋への適用を通して、本研究の有効性を実証的に検証した事例を紹介する。

参考文献

- 1) Bedford, T. and Cooke, R.: Probabilistic Risk Analysis, Cambridge University Press, 2001, 金野秀敏訳：確率的リスク解析、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、土木学会論文誌 F4, 2011.5 (登載決定)
- 3) 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、土木学会論文誌 F, Vol.64, No.4, pp.463-483, 2008。
- 4) 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。

(2011. 5. 6 受付)