

# 個別損傷に着目した統計的劣化予測モデルに基づく 大規模更新・修繕計画の最適化

大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻  
社会基盤マネジメント学領域

二宮 陽平

## 1. はじめに

2012年12月に発生した中央自動車道笹子トンネル事故に代表されるように、我が国の高速道路においては近年、構造物の老朽化が社会問題となっている。それに伴って、社会基盤施設の維持管理の重要性が改めて認識されている。一方で、人口減少や少子高齢化が進む中、社会基盤施設の維持管理予算の逼迫が生じている我が国の社会的背景を勘案すると、事故のリスクを一定以下に抑えつつ、維持管理費用の低減が可能な維持管理施策を意思決定していくことが、社会基盤施設の管理者にとって喫緊の課題である。

このような背景のもと、我が国の高速道路会社においては近年、高速道路橋に対する大規模更新事業・大規模修繕事業が検討されている。大規模更新事業とは、損傷が顕在化し、繰り返し補修を行ったとしても改善が期待できない橋梁に対して、橋梁の全体的な取り替えを行うこと、と定義される。一方で、高速道路橋に対する大規模修繕事業とは、損傷が顕在化しているものの、大規模更新を必要としないレベルの構造物に対して、主要構造の全体的な補修を行うこと、と定義されている。この大規模修繕事業の具体的な例として、疲労き裂によって剛性低下が顕在化している鋼床版に関して、床版上面のアスファルト舗装をコンクリート舗装に置き換え、床版の剛性を高める鋼床版の大規模修繕が検討されている。このような背景を踏まえると、大規模更新・修繕を代替案として考慮した高速道路橋に対する維持管理施策の最適化システムが必要になっていることが示唆される。

## 2. 本研究の基本的な考え方

都市高速道路高架橋の鋼床版では、大型車両の繰り返し载荷に起因する疲労き裂が顕在化している<sup>1)</sup>。鋼床版に多数の疲労き裂が発生すると、疲労耐久性が低下して構造物の安全性が大きく損なわれるほか、路面の陥没など、道路利用者の重大事故に繋がる危険性がある。そのため、道路管理者は目視点検や非破壊検査を実施して、疲労き裂が発生した鋼床版に対して詳細なデータの記録、継続的な監視、適切な

タイミングでの修繕を実施している。疲労き裂は疲労設計を行うことでその発生を根源的に抑えることができる。その一方で、疲労き裂が発生した後にストップホールや当て板補修を実施しても新たな疲労き裂の抑制には必ずしも効果はない。高架橋の老朽化に伴って、このような疲労き裂が今後加速的に発生することも想定されるなかで、事後保全型の修繕を継続した場合の維持管理費用の飛躍的な増加が懸念されている。したがって、疲労き裂がある程度発生している鋼床版に対しては、疲労設計を考慮した大規模修繕や更新を実施して、疲労耐久性を供用開始以上の水準にまで回復させるなど、疲労き裂の発生を根源的に断つ修繕施策、すなわち大規模修繕施策を検討していかなければならない。

疲労き裂の発生および進展の力学的メカニズムは理論的にも実験的にも解明されている。しかし本研究で対象とする鋼床版においても、施工（溶接）の品質、高架橋の使用・環境条件などの相違により、同形式であるにもかかわらず疲労き裂の発生・進展は多様に異なる。したがってこれまで蓄積されてきた点検データを用いて、対象路線の疲労き裂の発生・進展過程を統計的に分析し、予測することも重要であると考えられる。しかし、定期点検では、疲労き裂の有無やき裂長を観測することは可能であるが、発生時点を観測することは不可能である。この発生時点の不可観測性に起因して、従来の統計的劣化予測手法をそのまま適用した場合には、疲労き裂の発生数や進展速度を過小あるいは過大評価してしまう可能性がある。また、個々の鋼床版に対する疲労き裂の発生・進展過程を用いて修繕施策を立案する際には、個々の鋼床版に関する分析結果を集約して、対象路線全体、あるいは高速道路ネットワーク全体として補修優先順位の決定や修繕費用の最小化を図っていく必要がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では、疲労き裂に着目し、点検データに基づいて疲労き裂の発生を予測する方法論を提案する。その際には、疲労き裂の発生の特徴に着目し、鋼床版において疲労荷重を直接受ける溶接部、すなわち輪荷重直下に位置する図-1

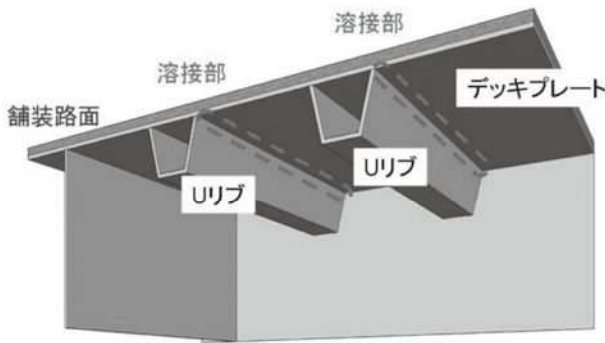


図-1 鋼床版の概要図

に示すような溶接部を疲労き裂の発生・進展予測の最小単位とする。具体的には、対象とする鋼床版の全ての溶接部における疲労き裂の発生と進展の過程をハザードモデルを援用してモデル化し、点検データに基づいてモデルを推定することにより、疲労き裂の発生と進展を再現する。ただし、どの溶接部においても最大で1つの疲労き裂しか発生しないこととする。

### 3. モデルの定式化

#### (1) 疲労き裂発生モデル

鋼床版における溶接部に疲労き裂が発生するまでの過程を表現するための疲労き裂発生モデルを、ワイブル劣化ハザードモデル<sup>2)</sup>に基づいて定式化する。いま、任意の鋼床版内に存在するある単一の溶接部に着目する。当該溶接部が属している鋼床版の供用開始時点を開始点とする時間軸を導入し、時点  $t \in [0, \infty]$  をこの時間軸上において定義する。鋼床版の供用開始時点から任意の時点  $t$  まで、当該溶接部に疲労き裂が発生しない確率  $S_1(t)$  は、

$$S_1(t) = \exp(-\lambda t^\alpha) \quad (1)$$

と導出できる。

#### (2) 疲労き裂進展モデル

鋼床版における溶接部に発生する疲労き裂の進展過程を表現するための疲労き裂進展モデルを、連続量を用いた劣化ハザードモデル<sup>3)</sup>に基づいて定式化する。いま、任意の鋼床版内に存在するある単一の溶接部に着目する。当該溶接部における疲労き裂の発生時点を原点とする時間軸を導入する。この時間軸上の任意時点において、疲労き裂が長さ  $r$  に達していない確率  $S_2(t, x)$  は、

$$S_2(t, x) = 1 - \exp \left\{ - \exp \left( - \frac{\ln f(t) - \ln x}{\sigma} \right) \right\} \quad (2)$$

と定義できる。

### 4. 大規模修繕箇所の選定手法

管理する複数の鋼床版それぞれに対して、修繕費用の観点から最適な修繕施策を決定する最適化問題を考える。最適修繕施策の候補として、1) 通常修繕施策と 2) 大規模修繕施策の2つを定義する。鋼床版の修繕施策を決定する単位として個々の径間の個々の車線単位（以下、修繕単位）で、通常修繕か大規模修繕かを選定できるとする。

図-2 (a)には、ある鋼床版における通常修繕施策を採用した場合の疲労き裂発生済み溶接部の数の時間的推移を表現した概念図を示している。同図に示すように、最新点検時刻直前における疲労き裂発生済み溶接部数が疲労き裂発生済み溶接部数の許容値  $M$  以上である場合、当該鋼床版に対して一斉当て板補修を実施する。ここで、一斉当て板補修とは、当該鋼床版の全ての疲労き裂発生済み溶接部に対して一斉に当て板補修を行い、当該鋼床版の疲労き裂発生済み溶接部をゼロとする補修である。最新点検時刻  $T_p$  の後は、時間の経過に伴って、疲労き裂未発生溶接部において疲労き裂の発生が始まり、当該鋼床版の疲労き裂発生済み溶接部数が疲労き裂発生済み溶接部数の許容値  $M$  に達した時刻で、一斉当て板補修を実施する。その後は再び、疲労き裂の発生が始まり、必要な時刻での一斉当て板補修を高速道路の償還時刻  $T_e$  直前まで繰り返す。高速道路の償還時刻  $T_e$  では、疲労き裂発生済み溶接部数に関わらず一斉当て板補修を行い、償還時刻  $T_e$  直後の疲労き裂発生済み溶接部数がゼロであるようにする。以上のような鋼床版の修繕施策を通常修繕施策と考える。

一方で、図-2 (b)には、ある鋼床版における大規模修繕施策を採用した場合の疲労き裂発生済み溶接部の数の時間的推移を表現した概念図を示している。同図に示すように、大規模修繕の実施時刻  $T_l$  直前までは、通常修繕施策と同様の修繕が実施される。大規模修繕の実施時刻  $T_l$  においては、疲労き裂発生済み溶接部数に関わらず一斉当て板補修を行い、大規模修繕の実施時刻直後の疲労き裂発生済み溶接部数がゼロであるようにする。その上で、同時に舗装路面に対して、コンクリート舗装を施工する。コンクリート舗装の施工後には、疲労き裂は発生せず、償還時刻  $T_e$  まで疲労き裂発生済み溶接部の数がゼロのまま維持されると考える。このような鋼床版の修繕施策を大規模修繕施策と考える。

### 5. 実証分析

実在する高速道路鋼橋の点検データを用いた実証分析を行う。表-1に本実証分析で用いた点検データの概要を示す。対象とする高速道路橋においては定期的な点検が実施され、各溶接部におけるき裂の発

生の有無および長さに関する点検データが記録されている。本研究では、径間の特性を表現するデータを説明変数としてモデルに考慮し、説明変数間の相関係数や赤池情報量基準をもとに最適なワイブル劣化ハザードモデルのパラメータを、

$$\lambda = \exp(-15.670 + 11.069x_1 - 1.082x_2 - 0.764x_3 + 1.627x_4 + 0.919x_5) \quad (3)$$

$$\alpha = \exp(-0.479 + 0.484x_2 + 0.209x_3 - 1.926x_4 - 0.773x_5) \quad (4)$$

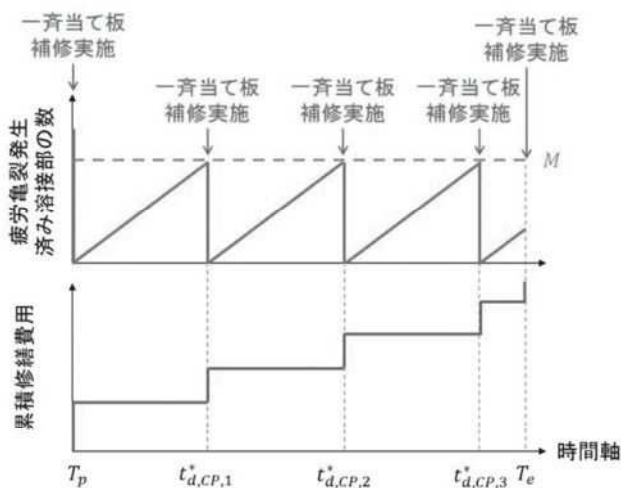
と判断した。ただし、 $x_1, \dots, x_5$ はダミー変数であり、具体的に表-2に示す。さらに最適モデルを用いたき裂の発生予測を実施し、実際に点検データとして記録されている観測値との比較を実施した。その結果を図-3に示す。同図は、横軸を最新の点検データと

表-1 点検データ概要

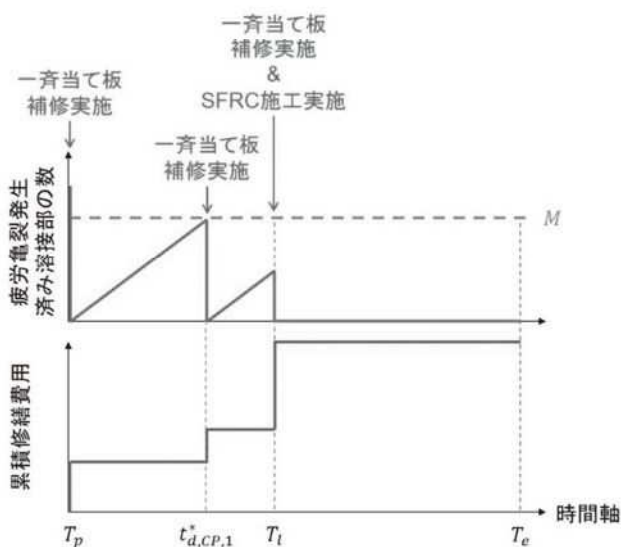
車線数	1,700
竣工年度	1983-1997
点検年度	2006-2015
領域数	227,910
点検データ数	5,828

表-2 モデルに採用した説明変数

説明変数	特性変数	ダミー変数の設定	
		2015年時点でのき裂発生の有無	$x_1$
桁種別	$x_2$	1: 箱桁 0: I桁	
連続径間	$x_3$	1: 連続径間 0: 単純径間	
主桁形状	$x_4$	1: 曲線主桁 0: 直線主桁	
パチ桁・斜形状	$x_5$	1: パチ桁・斜形状 0: それ以外の形状	



(a) 通常修繕施策を採用した場合



(b) 大規模修繕施策を採用した場合

図-2 鋼床版における疲労き裂発生済み溶接部の数と累積修繕費用の時間的推移を表現した概念図

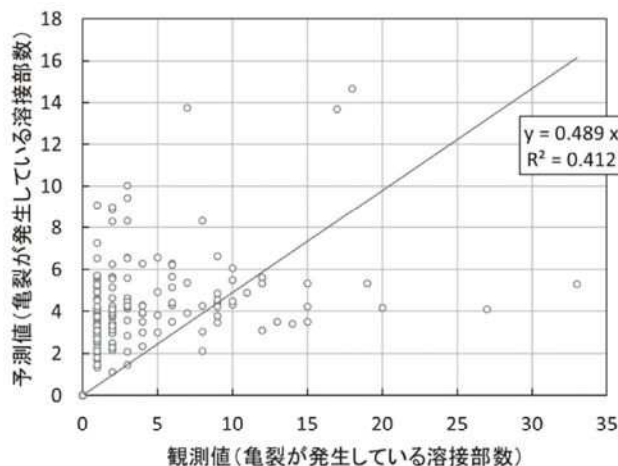


図-3 観測値と予測値の整合性

して記録されている観測値、縦軸を最適モデルを用いて予測した予測値としたグラフであり、本研究で用いた1,700車線をプロットしている。さらに、切片を0とした回帰直線、決定係数も示している。同図から、最適モデルがき裂の発生をおおむねよく予測できていることが確認できる。

そこで、最適なワイブル劣化ハザードモデルを用いたき裂発生の将来予測を実施し、1) 通常修繕シナリオ、2) 大規模修繕シナリオの2シナリオをそれぞれ各車線に設定し、シナリオごとに平均費用<sup>4)</sup>を試算した。2シナリオに共通の条件設定として、平均費用の計算期間を2115年までの100年間(ライフサイクル期間長)とした。

通常修繕シナリオにおいては、車線内のき裂数が20に達した時点で、車線に存在する全き裂に対して一斉に修繕を行い、き裂数を0に戻す。本シナリオにおける平均費用は、1) き裂の修繕に要する100年間の費用、2) 2115年時点で残存しているき裂を修繕

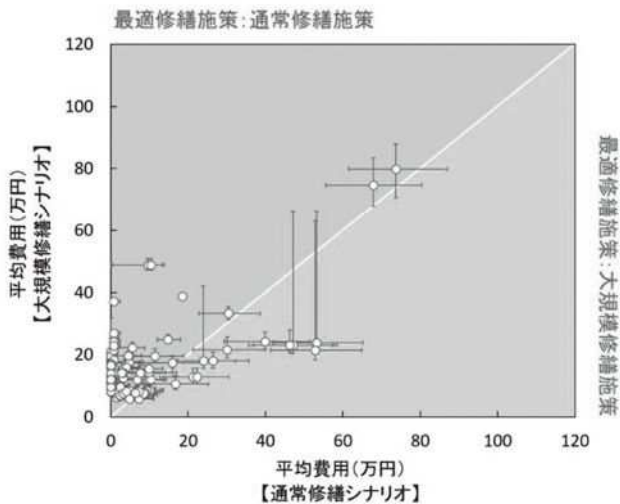


図-4 個々の鋼床版に関する修繕費用の推定結果

する費用の和で表現できる。ただし、き裂1つあたりの修繕費用を過去の修繕履歴から100万円と設定した。一方で、大規模修繕シナリオにおいては、2020年までは、通常修繕シナリオと同様の修繕を実施し、2020年時点で車線の舗装路面に対し、SFRC舗装（鋼繊維コンクリート舗装）を施工する。それ以後は、き裂は発生しないと想定した。本シナリオにおける平均費用は、1) 2020年までに発生するき裂の修繕に要する費用、2) 2020年時点で残存しているき裂を修繕する費用、3) 2020年時点でのSFRC舗装の施工費用の和で表現できる。ただし、SFRC舗装の施工費用を過去の修繕履歴から57,520(円/m<sup>2</sup>)と設定した。

以上の設定をもとに、各車線において平均費用を計算した。その結果を図-4に示す。2015年時点でき裂が発生していない1,553車線に関しては、将来のき裂発生数が極めて小さく推定されているため、通常修繕シナリオにおける平均費用が大規模修繕シナリオにおける平均費用に対して極めて小さいと算出されている。そこで、2015年時点でき裂が発生している147車線のみを同図にプロットしている。同図から、通常修繕シナリオにおける平均費用が、大規模修繕

シナリオにおける平均費用を上回っている車線に対して大規模修繕施策を適用することが、費用の観点から有利な施策であること、それ以外の車線に関しては、通常修繕施策を適用することが、費用の観点から有利な施策であると判断できる。

## 6. おわりに

本研究では、費用の観点から最適な修繕施策を決定するための方法論を提案した。今後は、大規模修繕の予算等の制約条件を考慮し、各構造物に対する最適な修繕施策や修繕実施タイミングを決定できる方法論の開発が必要となる。

## 参考文献

- [1] 土木学会鋼構造委員会鋼床版の疲労改訂小委員会編集：鋼床版の疲労(2010年改訂版)，土木学会，2010。
- [2] 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。
- [3] 水谷大二郎，小林潔司，風戸崇之，貝戸清之，松島格也：連続量を用いた劣化ハザードモデル：舗装耐力への適用，土木学会論文集 D3，Vol.72，No.2，pp.191-210，2016。
- [4] 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/VI-68，pp.59-71，2005。



大阪大学大学院工学研究科  
地球総合工学専攻  
社会基盤マネジメント学領域  
博士後期課程1年  
日本学術振興会特別研究員 DC1

人口減少や防災・減災に資する国土強靱化など、次世代の課題に対応できる社会基盤マネジメントシステムを研究しております。