

特集：ストックマネジメント技術研究の最前線

# 信頼性とリスクを考慮した道路構造物資産の 予防保全的管理手法の研究

玉越隆史\* 大城 温\*\* 石尾真理\*\*\*

## 1. はじめに

我が国では、戦後の高度経済成長期に急ピッチで道路網が整備され、現在、道路橋数は約68万橋りに達している。将来に渡って、道路ネットワークの機能を良好に保持し続けることは、我が国にとって極めて重要である。

国土交通省では、橋の最新情報を的確に把握し、その分析結果を反映させて合理的で計画的な維持管理体系を構築するため、平成16年に、それまでの直轄管理橋の定期点検要領を刷新した。予防保全の実現を視野に点検の充実を図る<sup>2)</sup>とともに、戦略的なデータ収集が開始されている。国土技術政策総合研究所においても、直轄管理橋梁のための点検要領の改訂案を作成してきた。加えて、維持管理計画を支援するためのツールとして、点検結果を用いた橋梁マネジメントシステム(BMS)<sup>3)</sup>や総合評価指標<sup>4)</sup>を提案してきており、一部の管理者において試行されている。

新しい知見を考慮した点検要領の見直しや劣化予測式の見直しのための検討は平成16年以降も実施しており、様々な様態の損傷や同じ損傷でも劣化速度の違いが見られている。また、橋梁の形式や構造によっては、ごく一部の部材の損傷により橋全体の安全性が損なわれたり、通行止めを余儀なくされる状況も生じている<sup>5),6)</sup>。したがって、信頼性やリスクを考慮して維持管理計画が立案できるような維持管理体系の確立が求められる。本稿は、リスクを考慮した橋の維持管理体系の高度化に関連する最近の研究内容を概観するものである。

## 2. 道路橋が抱えるリスクの例

近年発生した、通行止めを余儀なくされたような道路橋の重大損傷は、維持管理の観点から、次のような特徴を有している。

- 1)建設当時十分な知見がない

- 2)現象解明が十分でなく未然の対策が困難
- 3)特殊な条件下に置かれている
- 4)目視点検だけでは把握が困難
- 5)予防保全措置では防ぐことが困難

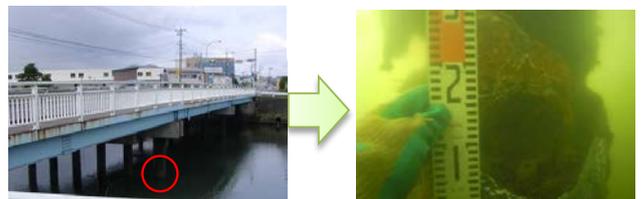
代表的な事例を図-1に示す。図-1(a)は、主桁に設けた隙間に他の部材を貫通させ溶接した部分か



(a) 鋼橋主桁の疲労亀裂の例



(b) コンクリート部材内部で生じた局部腐食の例



(c) 鋼製のパイルベント橋脚の異常腐食の例



(d) 雪崩や津波による損傷の例



(e) 補修補強材料等により覆われ、その後床版内部の劣化状態の把握が困難である例

図-1 近年の損傷事例

ら亀裂が発生し、主桁を破断させる寸前にまで伸びた事例である。道路橋では一部の例外を除き、平成13年の道路橋示方書（道路橋の設計基準）の改定まで疲労については一般に考慮されていなかった。図-1(b)は、トラス橋の斜材がコンクリート中で腐食していた事例である。建設当時の防水措置が結果として有効でなかった。また、定期点検においても、外観目視ではコンクリート部材の内部で生じていた局部腐食の極端な進行が正確に評価できなかった。図-1(c)は、鋼製のパイロメントの没水部で局部的に異常腐食が進行し、一部完全に断面が無くなるほどの大きな欠損を生じた例である。この例では、塗装による防食が施されていたものの、河口近くの汽水環境下という特定の条件により異常腐食が生じたものである。図-1(d)は、雪崩及び津波による被害を受けたものである。構造物に影響を与える全ての外力を予測することの限界を示唆している。図-1(e)は、RC床版を補修した後も大型車の繰返し载荷や雨水の影響を受けて劣化が進み抜け落ちた例である。このように全面に張り付けた補修方法の場合、母材の劣化の把握ができなくなる。点検手法の改善を進めても、今後もこのような未知もしくは事前把握困難な損傷例は生じると考えられる。

そして、近年、橋の形式や損傷部位によっては、一部の部材の損傷が落橋につながることも認識されている。図-2は米国ミネソタ州が管理する幹線道路I-35Wの鋼トラス道路橋が突如崩壊したものである<sup>8)</sup>。ある格点の破壊が、全体の崩壊につながったとされる。また、本橋の点検レポートからは、当該橋は2年に1度の定期点検や疲労に関する特別な点検も実施されており、当該橋が以前より深刻な劣化状態に陥りつつあったことがうかがわれる。それが認識されつつも結果的に崩壊事故に至った点は、維持管理システムに改善すべき点が無かったのかどうかという点で課題を残した。

### 3. マネジメントシステムが抱えるリスク

国総研では、全国の直轄道路橋（約 22,000 橋）で蓄積された定期点検のデータの分析を行っている。特に、直轄の定期点検の場合、部材をさらに細分化した「要素」単位で点検結果が記録されるため、部材の位置ごと、部材の中でもたとえば桁端と桁中央というように、細かな環境要因の

違いによる劣化状況の違いも分析可能である。

劣化速度のばらつきの例として、一般塗装系の塗装を施した鋼主桁の腐食の進行に関する劣化曲線を算出した事例を図-3 に示す。劣化曲線は、それぞれの橋梁の同一箇所に対して異なる時期に行われた2回の定期点検結果から、マルコフ遷移モデルを求めたものである。損傷程度 a(損傷程度小)~e(損傷程度大)を 1.0~0.0 の数値に置き換えた上で求めた各年の平均とその近似曲線を、標準偏差を含めて示している。全体として、経過年に応じて劣化が進展することは明らかであること、また、劣化予測精度が向上するように、桁端部と桁中間部に区分して算出すると、位置ごとに腐食の進行に差があることが分かる。したがって、劣化予測式に基づいて管理橋梁の状態を把握し、予防保全計画を立案することが有効である。

しかし、このように精緻なデータ、詳細な分類に基づき劣化曲線を求めても、個々の橋梁の劣化速度は、劣化曲線に対して非常に大きなばらつき（標準偏差）を有することがわかる。例えば桁端部においては、仮に平均を劣化曲線に採用すると、25年後の予測は 0.5 弱 (=「c」) となる。しかし、全ての橋梁で 25 年後に確実に「c」になるのではなく、期待値として「c」程度になることを表しているに過ぎない。

前述のように、橋の形式や損傷部位によっては、一部の劣化損傷が橋全体系の安定に重大な影響を及ぼす可能性もある。そのため、より着実な予防保全を行うためには、劣化予測のばらつきを減らすことだけでなく、ばらつきがあることを前提に、それが与える影響やリスクを考慮した維持管理計画策定方法の確立が課題であることが認識される。



図-2 事故橋梁の状況（米国I-35W橋梁）

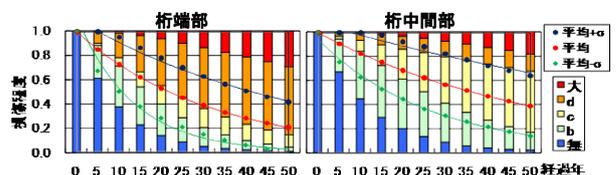


図-3 鋼桁橋の主桁腐食の劣化曲線

#### 4. 個別の橋梁における致命的事象の評価

リスク管理のためには、橋ごとに、一部の部材の損傷が全体安定に与える影響の差を相互比較する方法が必要である。そこで、過去に主構が破断した例があるトラス橋を対象に、構造的な冗長性（リダンダンシーと呼ばれることも多い）を評価する方法に関する検討を行っているので、一例を紹介する。

検討に用いた有限要素モデルの概要を図-4～図-6に示す。主構、床組をモデル化し、実際の挙動に近くなるよう、全ての格点部をシェル要素に、それ以外の部材を梁要素でモデル化した。境界条件は単純支持とした。斜材については図-6に示すとおり非線形ばね要素を挿入した。破断ひずみに達したとき、剛性0に近い値に低下する。

解析の手順は、以下の通りである。①死荷重及びB活荷重を載荷後、応力が最大の部材を次に破断させる部材として特定する。②特定した部材を破断させたモデルに、死荷重及びB活荷重を載荷して再計算し、応力が最大となる部材を特定する。そして、その部材が最も厳しくなるようにB活荷重を載荷し、徐々に増加させ、次に破断する部材を特定する。③以後、橋が不安定になるまで、すなわち、橋全体の剛性がゼロまたは負になる直前まで上記手順②を繰り返す。

破断箇所数と破断が生じたときの活荷重倍率を表-1に示す。斜材4本を破断させると（ステップ4）、死荷重及びB活荷重の載荷に対して非線形計算が収束しなかった。このときの格点の応力分布は図-8に示すとおり、非常に大きな局部応力が発生していた。このように、表-1のステップ数、もしくはある破断箇所数xに対する $\alpha$ の値を指標として構造的な冗長性が定量的に評価できるものと考えられる。

他機関においても構造的な冗長性の評価解析方法について研究がなされている。現在、当研究室では、他機関の研究成果をふまえつつ冗長性の評価方法についてさらなる検討を行っているとともに、多様な橋梁条件、例えば、上部形式、主桁数や構造的な冗長性の定量比較を進めている。

#### 5. リスクアナリシス手法の道路橋維持管理への導入

主桁間隔、単純桁と連続桁の違いなどに対する劣化進展のばらつき大きさや、橋梁ごとの構造的な冗長性の違いを考慮して維持管理計画を策定する手法として、リスクアナリシスの導入を目指している。既存のリスク評価項目抽出手法、ハザード特定手法、リスク算定手法について適用性の検討を行った結果、いくつかの手法を組み合わせることで、橋梁形式・部材・損傷種別の条件ごとにパターン化した管理リスクを比較できる可能性があることが分かった。

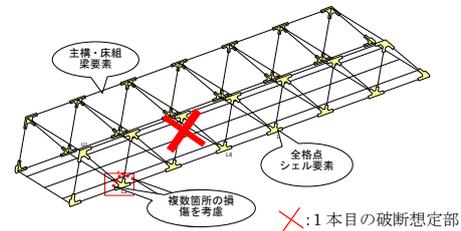


図-4 解析モデルの設定方法

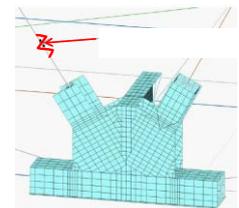
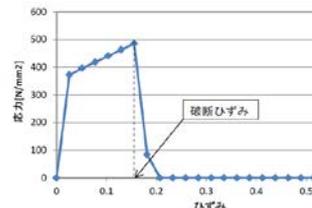


図-5 鋼材の材料構成則 図-6 非線形ばね要素

表-1 解析結果（トラス橋）

ステップ	初期破断箇所数x	解析が収束する限界荷重 (死荷重+B活荷重× $\alpha$ )
1	1箇所	$\alpha=6.6$
2	2箇所	$\alpha=4.0$
3	3箇所	$\alpha=3.1$
4	4箇所	破断した段階で収束しない

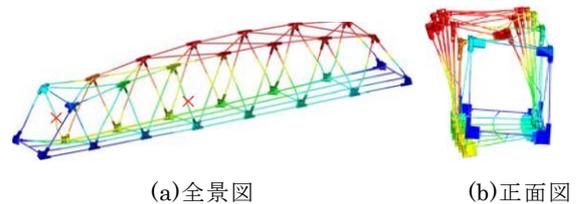


図-7 変形図の例（ステップ2）

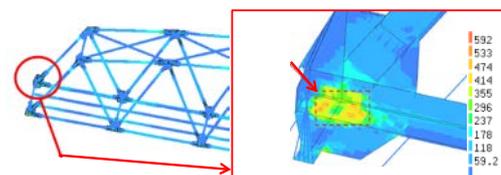


図-8 Von-Mises 応力分布図（ステップ4）

例えば、FMEA<sup>\*</sup>、FTA<sup>\*</sup>及びETA<sup>\*</sup>等を活用して、一部の部材の損傷が橋全体系の安定に影響を及ぼす観点でリスクマトリックスを形成すべき橋梁形式・部材・損傷種別ごとの条件を絞り込んだうえで、その条件ごとのリスクマトリックスを作成することが考えられる。ここで、リスクとして、部材における損傷の発生確率とその推定精度、当該部材の損傷が橋全体系の安定や車両通行に与える影響度、及び路線の重要度等の関数が想定される。そして、リスクが高いと判定された部材や橋梁については、優先的に補修を行うだけでなく、点検頻度を増やす、モニタリングを実施する、部材損傷が生じた場合に備えてフェールセーフを実施するなどの多様な対策を計画できるようにする。

リスクマトリックスの評価軸である損傷「発生頻度」は、国土交通省の直轄国道定期点検データを活用し、そのばらつきも考慮したうえで設定することが考えられる。また、橋の形式や部材ごとに異なる損傷が橋全体系の安定に与える「影響度」は前項の構造冗長性の計算を様々な形式の橋に対して実施することで定量化することが考えられる。さらに、「影響度」は路線の重要度に応じて重み付けすることが考えられ、他研究室の知見も活用しながら検討していく予定である。例えば、迂回路の有無や緊急輸送路に指定されているかどうかといった事項がパラメータになると考えられる。

## 6. まとめ

平成24年に改訂された道路橋示方書でも、計画から設計に至るまでの維持管理への配慮事項が組み込まれた。維持管理の確実性と容易さの考慮による個々の橋の高齢化・老朽化対策（長寿命化）に加えて、橋の構造設計においては一部の部材の損傷や異常によって橋全体が不安定となった

り、連鎖的に損傷範囲が拡大して橋全体が致命的な状態に至らないように構造的な配慮を行うことを求めた。また、津波被害等を考慮した地域の防災計画などもふまえ、橋単体の対策のみによらずネットワークを念頭に単体の設計もあるべきとの思想が反映された。これらの思想を具現化するためにも、リスク水準を構造物の一つの性能として定量的に評価できるための検討を引き続き進めていく予定である。

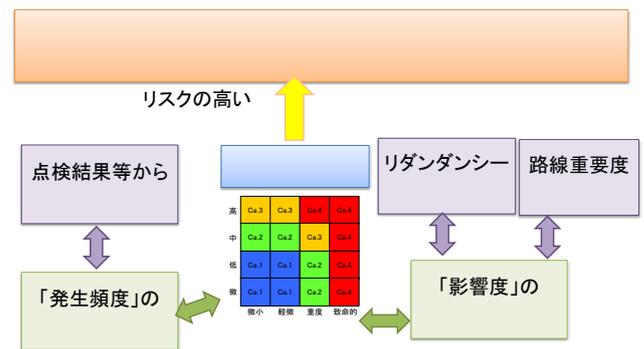


図-9 リスク評価手法の活用イメージ

## 参考文献

- 1) 平成23年度道路構造物に関する基本データ集、国土技術政策総合研究所資料第693号、2012。  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0693.htm>
- 2) 国土交通省道路局、橋梁定期点検要領(案)、平成16年3月。
- 3) 道路橋の計画的管理に関する調査研究 - 橋梁マネジメントシステム(BMS) -、国土技術政策総合研究所資料第523号、2009。  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0523.htm>
- 4) 玉越隆史：道路橋の計画的管理に向けて - 総合評価指標の開発と点検データ分析から見た損傷の特徴 -、建設物価、2007.12。
- 5) 玉越隆史：近年発生した橋梁の重大損傷の概要、道路、Vol.816、pp.28~32、2009。
- 6) 玉越隆史：米国橋梁崩壊事故に関する技術調査団の調査結果について -、建設マネジメント技術、pp.39~44、2008.1。

玉越隆史\*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室長  
Takashi TAMAKOSHI

大城 温\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室 主任研究官  
Nodoka OSHIRO

石尾真理\*\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室 主任研究官  
Mari ISHIO

\*土木用語解説：FMEA、FTA、ETA