

# FTAを用いた道路橋の経年劣化に伴うリスクの評価手法

玉越隆史・横井芳輝・山崎健次郎・水口知樹

## 1. はじめに

我が国では、高度経済成長期頃より多くの道路橋が整備され、その数は現在約70万橋<sup>1)</sup>に達している。将来に亘って、これらの道路橋を適切に維持管理して道路ネットワークの機能の支障とならないようにしていくことは極めて重要である。

国土交通省では、2004年にそれまでの直轄管理橋の定期点検要領<sup>2)</sup>を刷新して、道路橋の劣化特性や損傷実態の解明にも有効なデータの収集を進めてきた。国総研では蓄積された点検データの分析を行い、架橋環境や適用基準の違い、構造形式など様々な条件に着目して部材毎の劣化の進展速度の違いなどの劣化の特徴の解明を進めている。他方、道路橋ではその形式や構造によっては、一部の部材の損傷によっても落橋に至るなど、橋全体に致命的な影響を及ぼす可能性があり、実例も報告されている<sup>3),4)</sup>。そのため、道路橋の維持管理にあたって、劣化特性と冗長性などの構造的特徴を考慮したリスク評価の実現が望まれている。

これまでにも道路橋のリスク評価については、フォルトツリー解析（以下、FTAという）を用いたリスク構造の分析などが行われている。

例えば、貝戸らは、長大橋の腐食に着目し最適点検間隔を決定するための方法論としてFTA解析による落橋相当リスクの発生確率と対象橋梁の更新費用の積で定義されるリスク費用と、劣化予測結果に基づいたライフサイクル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最小化を図る方法の実現性についての検討を行っている<sup>5)</sup>。

例えば海外では、米国連邦道路庁が、代表的な道路橋の形式を対象に、部材が橋全体の構造安全性にどのような位置付けで関わっているのかをフォルトツリーで表現した例などを公開している<sup>6)</sup>。また、Kearyらは、洗掘で崩壊した橋を例にFTAによる分析を行い、階層化したリスク構造に部材等の破壊確

率などを組み合わせてリダンダンシーの有無やリスクの定量的評価が行いうることを示している<sup>7)</sup>。

このように、実際の構造物に関する維持管理計画の最適化または合理化を目的として、リスク評価の導入に関する検討も行われており、今後、道路橋に対する戦略的な維持管理計画にリスク評価の導入が期待される。

我が国では、直轄管理の道路橋については、橋梁定期点検要領による点検が概ね2巡しており、大半の道路橋において2回分の定期点検のデータが蓄積されている。そのデータを統計的手法を用いて劣化特性の定量的な評価の実施<sup>8)</sup>と道路橋の点検データに基づく鋼橋及びコンクリート部材について劣化の特徴の分析<sup>9),10)</sup>が行われている。

本稿では、既往の研究も参考にしつつ、定期点検結果の実データを用いた劣化予測式から部材や要素ごとの劣化特性と、道路橋の構造系の階層化を組み合わせて、道路橋が致命的となる状態のリスクを定量的に推定し、道路橋の戦略的な維持管理計画へのリスク評価の導入の可能性について、基礎的な検討を行った研究について紹介する。

## 2. リスク評価方法の検討

リスク評価は、ハザードを特定し、その生起確率と影響度の解析によってリスクを算定することと定義される<sup>11)</sup>。リスク評価におけるハザードの特定方法としては、原因から結果へのイベントの連鎖と進展を考慮したシナリオ解析手法が有効であると考えられ、複雑な事故の原因究明に有用なFTAや起回事象に続く潜在的なシナリオ分析に有用なイベントツリー解析（ETA）などが事故や事象の定量的なリスク評価ができることからよく用いられている。

本稿では、既往の研究<sup>5)-7)</sup>も参考に、リスク評価の対象を道路橋が落橋に至る事象とした場合に、一部の部材の損傷が複雑な構造を有する橋梁全体の安定性に影響を与えるシナリオが検討できる方法として、FTAを用いたリスク評価手法の導入に関する検討を行った。

FTAは、システムの構成部品の故障（道路橋では部材レベルの変状事象の発生）がシステム全体の故障（橋全体の劣化）に発展するメカニズムを階層的に表現し、下位レベルにある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故障発生リスクを評価する手法である。

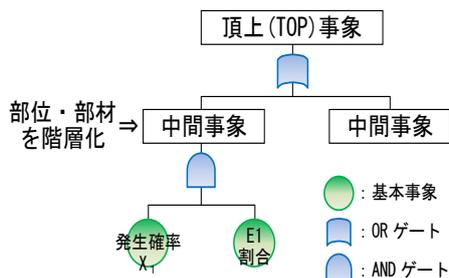
道路橋のリスク分析では、「腐食」や「破断」など構造系に影響を与えるる損傷を基本事象に、構造系の耐荷力機構の階層性に着目して頂上事象に至るまでの中間事象の階層化を行い、最終的な事象「落橋」に至るシナリオの発生確率を評価することでリスクの定量化が可能である。

### 3. FTAによる道路橋のリスク評価

FTA モデルを構築するにあたり、頂上事象を「橋梁が致命的(落橋相当)となる状態」と定義する。事象の抽出は、2011 年度までの国の道路橋の定期点検結果において構造の安全性がある程度以上損なわれている可能性が高いとされる対策区分 E1 を対

表-1 鋼桁橋のFMEAチャート

部材	潜在的故障モード	潜在的故障の影響	影響度	備考		
主桁	断面減少	腐食	致命的 4	落橋相当 主桁全数の50%以上で発生		
			重度 3	主桁全数の20%以上50%未満で発生		
		軽微 2	主桁全数の20%未満で発生			
	疲労損傷	亀裂	腐食と同様	主桁断面減少の腐食と同様		
		破断				
		耐荷力不足				
	接合部損傷	腐食	腐食と同様	主桁断面減少の腐食と同様		
ゆりみ・脱落						
横桁	分配機能逸失	腐食	軽微 2			
		ゆりみ・脱落	軽微 2			
	破断	軽微 2				
		変形・欠損	軽微 2			
床版	疲労損傷	致命的 4	落橋相当			
	抜け落ち	重度 3	損傷程度e以上は致命的に格上げ			
支承	支承本体	破断	致命的 4	落橋相当 支承全数の50%以上で発生		
			重度 3	支承全数の20%以上50%未満で発生		
	7ノカーボルトの恐れ	支持機能逸失	破断と同様	支承本体の破断と同様		
		沈下・移動・傾斜				
		移動				
		落橋の恐れ				
下部工	縦壁	変形・欠損	重度 3			
		ひびわれ	軽微 2			
	梁部・柱部・壁部・隅角部・接合部	支持機能の逸失	剥離・鉄筋露出		致命的 4	落橋相当
		変形・欠損	重度 3			
基礎	沈下・移動・傾斜	洗掘	致命的 4	落橋相当		
			致命的 4	落橋相当		



象とした。

本稿では、抽出した対策区分 E1 発生橋梁に対して、橋種、構造形式別に整理し、以下の(i)及び(ii)の橋梁形式に対して FTA を用いた橋梁全体のリスク分析を行う。

- (i) RC床版を有する4主桁橋(連続橋と単純橋)
- (ii) 2車線の桁橋で2主桁、4主桁及び6主桁

FT 構造の構築にあたっては、前述で抽出した E1 発生事象の部材・損傷種類の事例を基に、FMEA (Failure Mode Effect Analysis) によって構造部材に生じる可能性がある損傷種類と、その損傷が生じた場合の橋梁への影響度を整理する。これを表-1 に鋼桁橋を対象として整理したチャートを示す。FMEA チャートを用いて、次の 1)~3)の条件に基づいて FT 構造を作成する。

- 1) FMEAチャートにおける故障モード(損傷)の発生確率を基本事象とする
- 2) 部材部位を階層とした中間事象を設定する
- 3) 部材毎で橋梁に致命的な影響を与える損傷が発生する事象の組合せを「橋梁が致命的となる状態(落橋相当)」と定義する

図-1 に FT 図の基本的な構造例を示す。頂上事象は「橋梁が致命的となる状態(対策区分 E1)」であり、各事象を AND と OR の論理記号でつないでいる。AND でつながっている事象同士は同時に発生すると上位の頂上事象に近づく事象の発生となり、OR でつながっている事象同士は、いずれか一つでも発生すると、上位の事象の発生につながるゲートである。

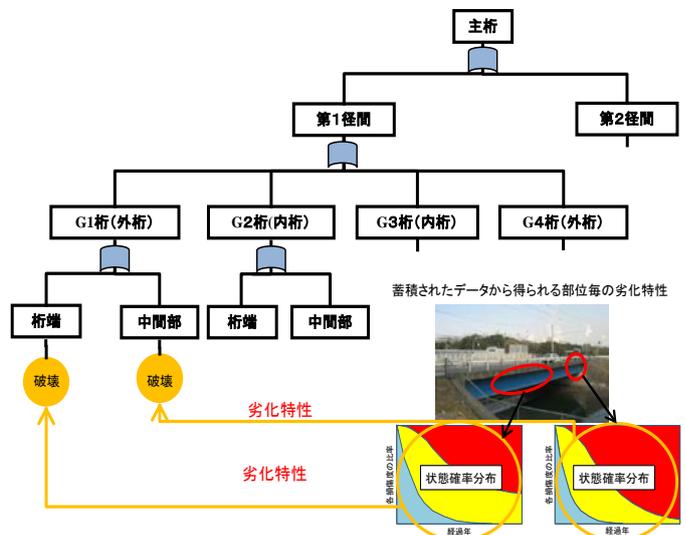


図-2 に 2 径間鋼 4 主桁橋における主桁（中間事象）の FT 構造と劣化特性の組合せの例を示す。径間ごと、主桁ごと、部位ごとというように、段階的に橋梁構造をモデル化する。例示する構造形式のように、外桁と内桁がある場合は、部位ごとの適当な劣化特性を反映した基本事象の発生確率を組み合わせることができる。橋梁全体は、主桁以外に、床版、支承、下部工といった中間事象の FT を作成し組み合わせることでモデル化できる。各階層でその構造形式に応じたモデル化をすることで、それぞれ構造形式および構造系の FT 図を作成できる。

頂上事象の起こりうる発生確率は、基本事象の発生確率を入力することで計算できる。この基本事象の損傷確率の算出にあたっては、部材の劣化予測における信頼性確保の観点から、構成部材の情報の収集・蓄積が必要である。

本研究では、これまでに直轄点検要領に則って蓄積されている最低劣化特性を評価可能な同じ部材・部位に対する 2 回分の点検データから、マルコフ性を仮定して求めた遷移確率を用いて、損傷程度 a~e の状態の割合の経年的な推移（以下、状態確率分布<sup>8)~10)</sup>を推定した。図-3 に主桁（鋼鉄桁 A・B 塗装）における端部及び中間部の状態確率分布及び損傷程度 e となる確率変化の指数近似関数を示す。図中の a~e は損傷程度を表しており、最悪値である損傷程度 e は着目部分全体に明らかな板厚減少等が視認される状態を示す。

供用期間中における道路橋のリスク評価のためには、経年的に変化する基本事象の発生確率を予測した式を反映する必要がある。これは、状態確率分布の損傷程度 e の遷移確率を指数関数で近似することで予測式とした。E1 の発生確率は、予測式から時点毎の損傷程度 e の発生確率を算出し、E1 の発生部材数の比率（E1 発生割合）を乗じることで求めた。

以上の方法により、代表例として例示した(i)~(ii)の橋梁形式および構造系に対して FTA による橋梁全体系のリスク評価を行った。

#### 4. リスク評価結果

FTA によるリスク評価を行った試算結果を図-4(a)~(d)に示す。試算は 10 年ごと 100 年後まで行い、それぞれの時点における頂上事象発生確率を求めた。なお算出される発生確率は、計算手法からは

供用から無対策で放置した場合に対策区分 E1 相当に至る確率とみなすことができ、現実にはこのような管理はあり得ないこと、また、想定した FT が現実とどこまで整合しているのかは今のところ明確にできておらず FT の作り方によっても確率は容易に大きく変化することから、絶対値に大きな意味はない。その点も踏まえてここでは同じ条件下での試算同士の相対比較を行い考察している。

図-4(a)は、鋼 4 主桁の 2 連の単純橋と 2 径間連続橋で頂上事象発生確率を求めた結果を示している。共通して、経年につれて発生確率が上昇している。また、単純桁と連続桁では、頂上事象の発生確

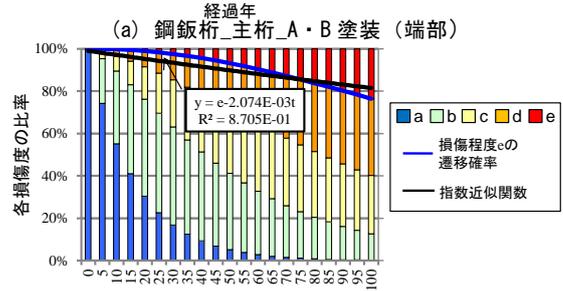
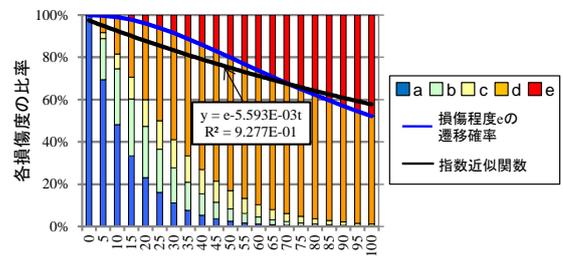


図-3 状態確率分布と損傷程度eとなる確率変化の指数近似関数（端部・中間部）

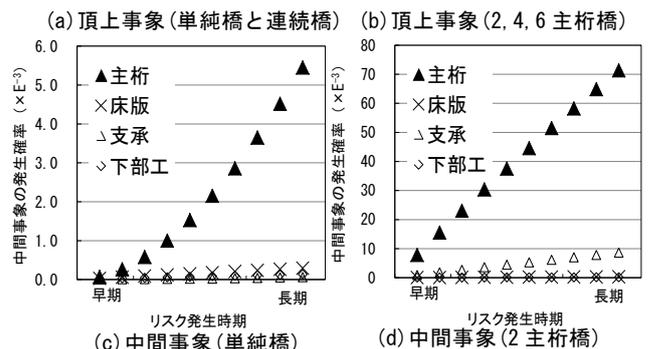
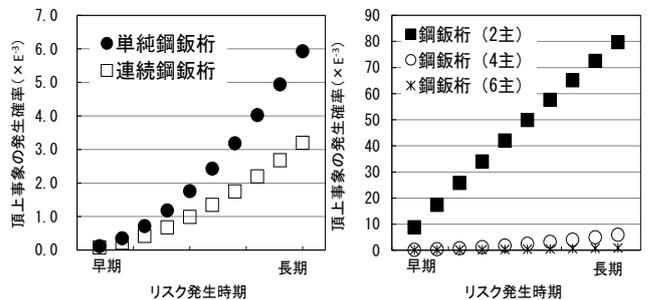


図-4 事象発生確率の比較

率に明確な差が生じており、単純桁の方がリスク発生確率の高い試算結果となった。これは、連続橋と径間数を合わせた 2 連の単純橋は、腐食の進展が他と比較して早い主桁端部が連続橋より多いことに起因している。図-3 に示した桁端部と中間部の状態確率分布の損傷程度 e の遷移確率をみても、桁端部の方が経年による劣化速度が速い。図-4(c)に単純橋の中間事象発生確率を示すが、本検討モデルでは、主桁の損傷によるリスク発生確率が頂上事象の発生確率に対して支配的な事象となっている。

図-4(b)に鋼鈹桁橋で主桁本数を 2 本、4 本、6 本と変えた場合の比較を示す。どの時点においても 2 主桁橋が突出して高く、主桁の本数が増えるに従い、頂上事象発生確率が小さくなる。主桁の損傷の同時発生確率が主桁増加に伴い激減した結果が表れている。図-4(d)に示す中間事象発生確率に着目すると、主桁が他の部材に比べて突出しており、頂上事象の支配的な要因となっていることがわかる。主桁以外の中間事象について着目し、図-4(c)と図-4(d)を比較すると、2 番目に大きい部材は、4 主桁橋では床版であるが、2 主桁橋では支承である。主桁本数の違いによる単純な比較だけでも、リスクの発生確率や支配的要因、中間事象の現れ方が異なる。

## 5. まとめ

以上のとおり、道路橋においてFTA構造と実点検データから予測した劣化特性に関する統計値を組み合わせることで、供用期間中の各時点でのリスクを定量的に求めることが可能であることを確認した。

しかし、今回のリスクの計算では、2時点間トレンドから求めた状態確率分布から本来ばらつきのある劣化特性を一本の期待値曲線として代表した確定値を用いてリスクの算出を行っており、個々の橋の

リスクとの乖離が避けられない。このような問題も含めて、リスクの定量化手法を実務で活用するためには、その利用方法や結果の解釈方法の確立が不可欠であり、引き続き検討を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) 玉越隆史、横井芳輝：平成25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822号、2015、  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0822.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) 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
- 4) 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一、建設マネジメント技術、pp.39～44、2008.1
- 5) 貝戸清之、金治英貞、杉岡弘一、大石秀雄、松岡弘大：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、土木学会論文集F4、Vol.69、No.2、pp.84～101、2013
- 6) U.S Department of Transportation Federal Highway Administration: Framework for Improving Resilience of Bridge Design, FHWA-IF-11-016, January, 2011
- 7) Keary H. LeBeau, Sara J. Wadia-Fascetti, Fault Tree Analysis of Schoharie Creek Bridge Collapse, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, July /August, pp.320-326, 2007
- 8) 玉越隆史、横井芳輝、石尾真理：全国規模の実測データによる道路橋の劣化特性とその定量的評価、土木学会論文集F4、Vol.70、No.4、pp.61～72、2014
- 9) 玉越隆史、横井芳輝、石尾真理：全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴、鋼構造論文集、第21巻、第82号、2014.6
- 10) 玉越隆史、横井芳輝、石尾真理：全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴、コンクリート工学論文集、第25巻、pp.167～180、2014
- 11) ISO/IEC Guide 51 Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards, 2014

玉越隆史



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室長  
Takashi TAMAKOSHI

横井芳輝



本州四国連絡高速道路(株)鳴門管理センター(前 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室)  
Yoshiteru YOKOI

山崎健次郎



(株)荒谷建設コンサルタント構造部(前 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室交流研究員)  
Kenjiro YAMASAKI

水口知樹



(株)横河ブリッジ設計センター(前 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室交流研究員)  
Toshiki MIZUGUCHI