

# 道路の非構造部材の落下・倒壊リスク評価法

宮原 史・玉越隆史・白戸真大・星隈順一

## 1. はじめに

道路上には、橋梁など道路本体構造物以外に、標識、照明、情報提供施設など多様な付属物が設置されている。本稿では、これら付属物、及び付属物を構成する部材を総称して「非構造部材」と呼ぶ。過去より、これら非構造部材の落下、倒壊事故が発生してきている。例えば、基部の疲労き裂が原因で道路橋上から破断した照明柱が落下した事故が発生し、これを契機に橋梁上の標識柱、照明柱の疲労について対策が研究された<sup>1)</sup>。

表-1に、非構造部材のうち、比較的対策が確立されてきている標識、照明の落下、倒壊事故防止対策の取組をまとめた。取組の体系を俯瞰できるように、安全学の分野で提案されている安全活動の基本的枠組<sup>2)</sup>と対比している。

表-1 標識、照明の事故防止対策の取組

安全活動の基本的枠組み(文献2)を参考)		非構造部材の既存の事故防止対策
1) 事前のリスク認知と評価		・点検結果の分析から、標識、照明の弱点部を特定(A)
2) 事前の安全確保	・ハード型安全対策 (例: 一連の信頼性設計)	・道路標識設置基準に構造要件を規定(具体の配慮は各道路管理者の判断で実施)(C)
	・ソフト型安全対策 (例: 作業標準などのマニュアル作成)	・弱点部を特定した点検を実施(B)
3) 事後の安全確保	・ハード型安全対策 (例: 原子力発電所の防護壁)	・落下防止ネットの設置など(各道路管理者の判断で実施)(D)
	・ソフト型安全対策 (例: 各種の防災訓練)	— (該当なし)
4) 安全支援 (例: 安全に対する経営方針、教育・訓練、動機付け、倫理観、法令による規制)		・事故事例の情報共有など(各道路管理者で実施)

これまで、点検結果の分析から明らかになった柱基部、接合部などの弱点部に着目した定期点検が国管理の国道において本格化するなど、事前のソフト型安全対策が進んできた(A, B)<sup>3)</sup>。一方、ハード型安全対策は、道路標識設置基準<sup>4)</sup>に耐久性、維持管理性、構造冗長性(本稿では、一部の部材の損傷では事故に至りにくい性質を「構造冗長性」という。)など構造要件が規定された

ものの、その標準的な方法は確立されておらず対策が遅れている(C, D)。特に非構造部材は構造系の単純さから設計の自由度が高い一方で、現状においては一般的にリスクの観点から構造冗長性は検討されていない。このため、部材の数や配置に配慮して構造冗長性を改善することで、リスクを低減できる可能性が高い。

そこで本研究は、特に構造冗長性に着目しつつ、耐久性、維持管理性も考慮して非構造部材の落下、倒壊事故リスク(本稿では、落下、倒壊の可能性を「リスク」という。)を評価する方法論の確立を目的とする。本稿ではその基礎として、構造冗長性を考慮してリスク評価を行うためには、個々の部材、部品間の経年劣化速度の相違を考慮することが必要であることを示す。そして、本研究で得られる知見を踏まえて、橋梁など道路本体構造物も含めた設計体系の確立に向けた展望を示す。

## 2. 落下、倒壊リスクのモデル化

本研究では、事故リスクと構造系の違いの因果関係が見える化できるように、航空、プラントなどの安全の分野では広く用いられている手法の一つであるフォールト・ツリーを用いてモデル化を試みることにした。ここで、国で収集された均質なデータを用いて道路橋の劣化特性を定量的に評価した結果から、部材の諸元や位置、使用条件などの違い、劣化予測手法の相違を考慮しても個々の劣化過程には極めて大きなばらつきが避けられないことが分かっている<sup>5)</sup>。このことも考慮して、本研究では具体的には以下を考慮したモデル化を行う。なお、モデルを構成するにあたって各接合部、不連続部に着目しているのは、リスク評価にあたってはこれら弱点部の破壊のみに着目すれば十分であるためである。

- ・各接合部、不連続部を構成するボルトなど(以下「ボルトなど」という。)の初期時点での強度の大きさとばらつき
- ・ボルトなどの経年劣化の速度とばらつき
- ・全体系としての構造冗長性

Assessment of Accident Risk from Collapsing Roadside Hardware

・ボルトなどの点検及び修繕の可否

非構造部材の落下、倒壊をフォールト・ツリーで表現すると、図-1のような系として表すことができる。図-1は、頂上事象である落下、倒壊は中間事象である各接合部、不連続部の破壊の組合せにより発生し、中間事象は、基本事象であるボルトの破壊の組合せにより発生することを表現している。そして、頂上事象や中間事象を発生させる下位事象の組合せは、ANDゲートやORゲートなどの論理記号により表現されており、事故リスクと構造系の違いの因果関係が見える化される。

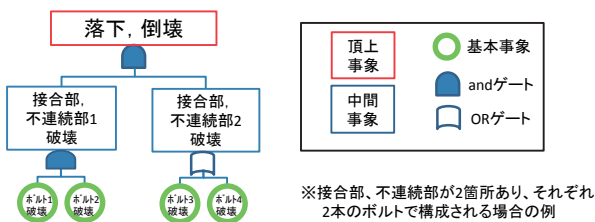


図-1 非構造部材の落下、倒壊モデル

### 3. リスクの分析

作成したフォールト・ツリーに基本事象の発生確率を与えれば、リスクの定量的な評価が可能である。本研究では、実務においても意義があるリスク評価の方法論を検討するため、様々な条件でリスクの分析を行い、リスク評価にあたって留意すべき事項を抽出するという方法をとった。本稿では、構造冗長性の違いが事故リスクに与える影響の評価法を検討した結果を報告するが、拙稿<sup>6),7)</sup>には、本稿には掲載していない分析結果も掲載している。

#### 3.1 モデルの基本設定

代表的な例として標識板の落下を取り上げて、ごく単純化したモデルから試算されるリスクの比較を行う。フォールト・ツリーの頂上事象は「標識板の落下」である。中間事象は「接合部の破壊」、基本事象は「ボルトの破壊」とする。ここで、ボルトの破壊とはボルトの耐荷力が0になることを表す。ボルトは荷重を本数で均等に分担することを前提に、安全率2.0で設計されていることを仮定する。

#### 3.2 構造冗長性に着目した比較モデルの設定

図-2に示す接合部1箇所のL型標識柱と接合部2箇所のF型標識柱を比較する。接合部はいずれもボルト1本で構成されている。フォールト・ツ

リーから、(a)はボルト1本の破壊で標識板落下が引き起こされるものの、(b)はボルト1本が破壊してももう一方が破壊しない限り標識板落下は引き起こされない。

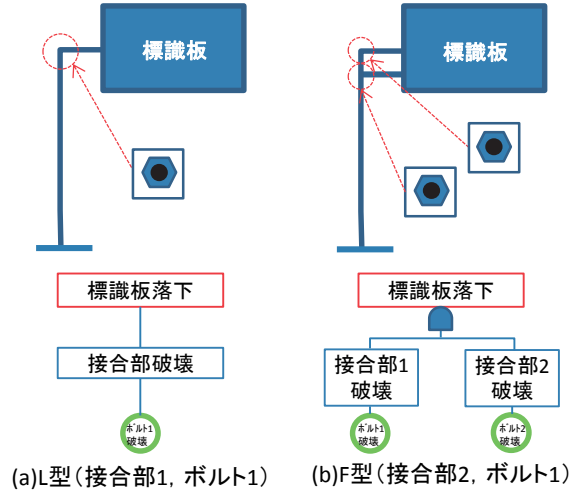


図-2 標識板落下のフォールト・ツリー

ここで、ボルトの破壊確率として、図-3に破線で示すように50年目で確実に破壊する設定と、実線で示すように破壊確率が一定の速度で経年的に増加する設定を比較する。前者は、強度の経時変化（以下「経年劣化」という。）にばらつきを考慮せず、確定的に強度が低下することを仮定するものである。後者は、経年劣化にばらつきを考慮するものである。しかし以下の試算では、ボルトの破壊確率を確定的な期待値としてのみ取り扱う。このことにより任意の経過年数後のボルトの破壊本数は確定的となることから、以下の試算は実質的には、経年劣化は考慮するもののそのばらつきは考慮しない単純な条件での試算である。なお後者は、初期時点での強度のばらつきも表現するため、初期時点での破壊確率5%を仮定している。なお、経年劣化のばらつきには、設置環境によらず当該部材自体が有するばらつきと、設置環境などに依存するばらつきの両方が存在すると考えられる。本モデル設定では簡単化のためこれらを区別して取り扱っていないものの、本研究ではこれら両方のばらつきを区別して考慮可能なリスク評価法を確立を目指している。

#### 3.3 経年劣化の影響を考慮したリスクの試算結果

図-4に、経過年数毎の標識板の落下確率を示す。まず、ボルトが50年目で確実に破壊する設定の場合は、50年目で全てのボルトが同時に破壊するため、(a)、(b)2つの構造系でリスク水準に差

が付かない。この結果は、(b)の構造系の接合部をさらに増やしていったとしても変わらないことは明らかである。一方、ボルトの破壊確率が一定の速度で経年的に増加する場合は、初期時点から全てのボルトが破壊する100年後まで一貫して、(b)のリスクが小さいことが具体的な数値として得られる。これは、(b)の構造系は2本のボルト両方が破壊しない限り標識板の落下が生じないことから、頂上事象の発生確率がそれぞれのボルトの破壊確率の積として算出されることによる。

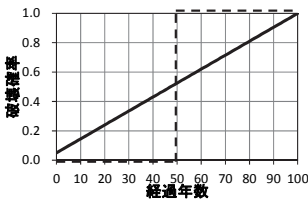


図-3 ボルトの破壊確率

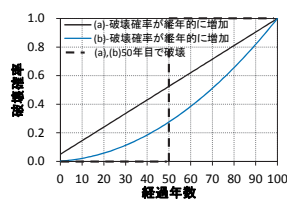


図-4 標識板の落下確率

直感的にも、ボルト1本で構成される直列型の構造系と複数のボルトに強度を分散した並列型の構造系では、後者のリスクが小さいことは容易に想像がつく。以上の試算結果からは、構造冗長性を考慮して「正しく」リスクを評価するためには、経年劣化のばらつきを考慮しなくとも、個々の部材、部品間の経年劣化速度の相違を考慮する必要があることが分かる。

### 3.4 維持管理施策と連動したリスクの分析

図-5は、図-2に示した(a)、(b)2つの構造系において、リスク水準が一定に抑えられるよう、リスクが目標水準に達した時点でボルトを新品に交換するという維持管理施策を採用した場合の交換間隔を示したものである。同じ目標リスク水準であれば、リスクの増加速度が相対的に小さい(b)は、(a)と比較して交換間隔を長くすることが可能であることが分かる。

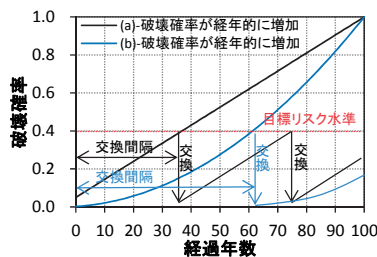


図-5 目標リスク水準と交換間隔

他方、点検時にボルトの破壊を確認した場合にのみボルトを交換するという維持管理施策を想定すると、(a)は標識板落下が引き起こされるまでボルトが交換されないこととなり、リスクを制御

できない。すなわち、(a)の構造系では、どれほど安全余裕が大きくなるよう設計したとしても、いずれ標識板落下に至ることが避けられない。一方(b)では、点検の間に2本のボルト両方が破壊しない限り、点検時に破壊したボルトを交換し続ければ標識板が落下することはない。すなわち、点検時に破壊したボルトを確認でき、維持管理施策と連動してリスクを制御できるようにするには、構造冗長性を有する構造であることが必要である。

なお、点検を前提とした維持管理施策の採用は、ボルトが点検可能な構造であることが前提となる。また、前述のいずれの維持管理施策も、ボルトが交換可能な構造であることが前提となる。

## 4. 実点検データを参考にしたリスクの試算

3.の分析結果を踏まえて、実点検データを用いた破壊確率の設定に基づき、実際の事故事例のリスクを試算する。

図-6は、取付部の腐食が進行し、添架式のトンネル照明が落下した事例をフォールト・ツリーで表したものである。3.の試算と同じく、安全率2.0で設計されていたことを想定し、中間事象と基本事象はANDゲートで接続している。



図-6 トンネル照明落下のフォールト・ツリー

構造冗長性の改善によるリスク低減効果を定量的に確認するため、取付部を2箇所から4箇所、6箇所と増やしていった場合のリスクを試算する。ここでは、取付部の破壊確率を以下の手順で、図-7のとおり推計した。

①国で収集した同じ部材、部位に対する2回分の損傷程度の評価(※)について、マルコフ性を仮定して求めたa~eの遷移確率から、損傷程度eとなる確率を指数関数で近似する

※変状の有無や規模、劣化進行の段階等の外観状態を客観的に区分するものであり、a(損傷無)~e(損傷大)の5段階で評価される

②近似式から得られる時点毎の損傷程度eの発生確率に、判定区分E1(※)の発生割合を乗じた値を、取付部の破壊確率とする



※専門家が知見に基づいて主観的に橋や部材の健全性等の診断を行うもので、E1は「橋梁構造の安全性の観点から緊急対応の必要がある」ことを意味する

図-8に、経過年数毎のトンネル照明の落下確率を示す。想定した破壊確率と実態との整合は不明であり絶対値には意味が無いものの、100年後まで一貫して、取付部の数が多い方がリスクが小さいことが定量的に分かる。100年後に着目すれば、取付部2箇所と6箇所ではリスクに4倍程度の差がつき、構造冗長性の違いが無視できない程度のリスクの差を生み出すことが認識される。

一方で本構造のようなトンネル照明は、取付部背面の損傷状況を目視で確認するのが困難な場合も多い。少なくとも取付部の破壊が確認できるよう、構造細目か点検方法の工夫を講じなければ、どれだけ構造冗長性を改善したとしても、リスクを制御できない可能性もある。

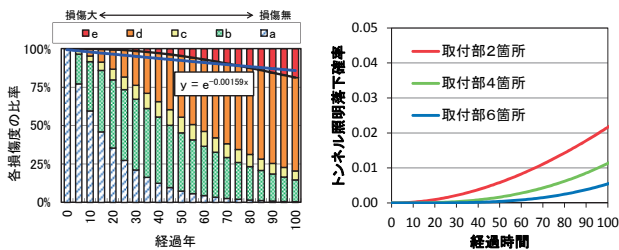


図-7 取付部の破壊確率 図-8 トンネル照明の落下確率

## 5. まとめ

本稿では、非構造部材の落下、倒壊事故と構造系の違いによるリスク要因の因果関係をフォールト・ツリーで表現できることを示した。そして、構造冗長性を有し、リスクが小さく、かつ維持管理施策と連動してリスクを制御できる構造が選択されるには、経年劣化速度の相違を考慮した、「正しい」リスク評価が行われる必要があること

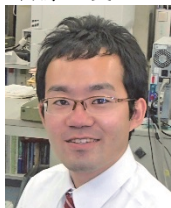
を示した。一定の条件下でリスクを試算することで構造系を改善できることから、設計段階における構造系の選択など、実務においても十分に意義がある成果が得られることが期待される。しかし、個々の設計でこのようなリスク試算を行うことは煩雑とも考えられる。また、局所的には様々な条件があることから、実際にフォールト・ツリーを作ることも容易ではない。今後、様々な条件での試算を行うことにより、構造の改善に要する費用も考慮し、これまで標準的と考えられてきた構造の改善案や、バックアップ構造を追加した方がよい既設構造物の特徴を整理する必要がある。

また、橋梁など複雑な構造系を有する構造物への応用を想定すると、フォールト・ツリーが複雑となることからリスクの計算方法も課題となり得るものの、本稿の方法を用いればリスクの評価は可能である。橋梁など道路本体構造物に対しても、経年劣化のばらつきを考慮したリスク評価が組み込まれた設計体系を確立してゆく必要がある。

## 参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：鋼橋付属物の疲労、2008
- 2) 日本学術会議 安全に関する緊急特別委員会：安全学の構築に向けて、2000
- 3) 玉越隆史、白戸真大、増田安弘：道路標識・照明施設の定期点検、土木技術資料、第57巻、第8号、pp.22～25、2015
- 4) 道路標識設置基準、2014
- 5) 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（建設マネジメント）、Vol.70、No.4、pp.I\_61～I\_72、2014
- 6) 玉越隆史：非構造部材の安全性評価手法—道路構造物等に共通の設計規範の実現に向けて—、ベース設計資料、No.168、2016
- 7) 宮原史、玉越隆史、白戸真大、松村裕樹：道路における非構造部材のリダンダンシー評価、安全工学シンポジウム、2016

宮原 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 研究官  
Fumi MIYAHARA

玉越隆史



土木研究所構造物メンテ  
ナンス研究センター橋梁  
構造研究グループ 上席  
研究員  
Takashi TAMAKOSHI

白戸真大



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 主任研  
究官、工博  
Dr.Masahiro SHIRATO

星隈順一



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、工博  
Dr.Junichi HOSHIKUMA