

国土の強靱化を支える道路構造物の 維持管理性の向上に向けた取組み

玉越隆史・白戸真大

1. はじめに

橋梁やトンネル等の道路構造物は社会・経済活動を支える基盤であり、強靱な国土の実現に寄与するためにどうあるべきかについては様々な観点からの議論が可能と考えられる。道路構造物は一旦供用すれば極めて長い期間に渡って機能し続けることが求められる。そして、いずれ高齢化する中で大規模な自然災害の影響を受けることを想定しなければならない。また、個々の構造物の機能・状態が前後区間を含む道路ネットワーク機能全体に深刻な影響を与えうる。ここでは以上の特性を踏まえて、国土の強靱化に寄与できるように道路構造物を整備・管理していくための課題を考える。

大規模災害の発生に対して、どのような道路機能が期待できるのかを事前に推定できていることは、危機管理上極めて重要であり、国土の強靱さの一つの側面と考えたい。そしてこれを実現するためには、どの道路構造物がどのように損傷し、どのような利用が可能であるのかをできるだけ正確に予測できることが重要である。そのためには、様々な不確定要因をも考慮して、構造物の挙動を制御し、想定通りの挙動となるように設計・施工することが必要となる。

いずれ高齢化していく道路構造物では、供用後の経年劣化や様々な損傷に対して、様々な補修や補強が必要となることも不可避である。しかし、過去の施工記録や維持管理履歴など失われた情報も多く不確定要因のある既設構造物についても、補修補強後にどのような性能が発揮されるのかを説明できなければ、道路網の機能状態が予測できないこととなる。

また、高齢化に限って見ても、近年では、橋梁やトンネルで、鋼部材や鉄筋コンクリート床版の疲労、コンクリートの中性化や塩害など、経年劣



写真-1 崩壊した米国ミネアポリスI-35W橋

化に伴う損傷が顕在化しつつあり、損傷により突如の通行規制が生じた事例も見られる。2006年に米国ミネソタ州にて供用中のトラス橋が突然落橋したことも記憶に新しい(写真-1)。劣化の把握やそれが部材強度に与える影響評価の不確実性は大きく、劣化が進展してしまうことも前提として橋全体として致命的な状況に至らないようにリスクを制御することも必要である。

本稿では、これらの問題認識のもと、道路構造物の維持管理性に関連し、当研究室が行っている道路構造物の設計基準の高度化に向けた研究等について紹介する。

2. 性能及び信頼性の調和と制御技術の向上

(1) 性能及び信頼性の調和

道路橋の設計では、供用期間中に発生する確率が低いが大きな強度を持つレベル 2 地震動に対して、道路の種別及び橋の機能・構造に応じて橋の重要度を区分し、達成すべき耐震性能を選択する。そして、重要度が特に高い橋は、地震に対して落橋などの致命的な被害が生じないだけでなく、緊急輸送のための供用の再開をできるだけ速やかに行うことができる状態にとどまるように設計することが求められる。

これを道路のネットワークとしてみたときには、緊急輸送道路として指定されている路線上の複数の橋の間で耐震性能が調和していないと緊急輸送路としての機能が確保されない。異なった種類の構造物間では、外力に対して破壊や崩落など

の致命的な状態に対する安全余裕が必ずしも同一にはならないかもしれないが、復旧の容易さを考慮し、損傷形態や程度を制御し、路線上の道路構造物の性能と信頼性の調和を図らないと路線上に脆弱部を抱えることになる。それぞれの構造物をどのような状態に留まらせるのか、そして、それをどのように確実に達成させるのかという性能と信頼性の調和を図ることで、構造物群、又は、路線としての地震後の機能確保が初めて可能になる。

道路橋と土工とでは災害後の復旧方法や復旧に要する時間も異なる。故に、地震後の緊急輸送を考えた場合に許容される損傷形態や損傷程度も同じでないと考えられる。例えば土中に設けられるカルバート構造では、損傷後の修復の困難さや維持管理性を考えると、許容される損傷形態や損傷程度は橋とは異なるべきとも考えられ、条件に応じた厳密な照査も必要に応じて行われるべきであろう。残念ながら、現在のところ、構造物種別毎の設計基準類相互で、路線上の構造物間の性能や致命的な損傷を防ぐという観点での構造信頼性の調和が十分図られているとは言えない。国土の強靱化の視点からは、構造物の種別を超えて、性能や信頼性の調和を図る必要がある、国総研でも引き続き設計基準のあり方の検討を進めていく。

(2) 複雑性への対応

一見単純な構造形式や設計原理に基づくものでも、たとえば、実際の橋は、力学的には複雑な挙動をしている。そこで、一般には、各部材や部材間連結・接合構造の単位で信頼性を確保し、信頼性の確保された部材を信頼性の確保された方法で連結・接合することで構造物全体系を構成することにより、構造物全体系の信頼性を保証するという考え方が取られる。

各部材や連結・接合の単位で信頼性を保証する場合には、それぞれの単位で強度発現過程やメカニズムが明確であるように設計されていること、またそのメカニズムが担保されるように施工されていることが極めて重要である。そして、経験的に構造の信頼性を判断するのみではなく、設計のプロセスのなかで、強度発現の各過程・メカニズムに安全余裕を体系的に付与していく必要がある。なぜなら、これにより、災害や劣化による不具合や変状が生じている構造物の復旧が容易にな

ると考えられるためである。強度発現メカニズムが特定されており、実験的にも論理的にも破壊過程が制御されている部材や連結・接合が、そのとおりの挙動が生じるように設計・施工されている場合には、実際の構造物にて損傷が生じた場合にその程度を見極めること、また原因を究明することが容易である。このような設計法は、特別な材料を使用することなく、通常的设计・施工の中で復旧性の高い構造を実現するものである。

このためには、通常時の荷重分担メカニズムや破壊に至るまでの過程・荷重分担メカニズムの変化が明確であることが必要である。そして、それらが細部構造に反映されている部材・連結・接合構造や技術を用いること、施工途中の不具合や残留応力の発生が設計に反映され施工でも管理されていること、図面にない鋼材等補強材の設置や完成後の二次応力の発生などにより部材単位で設計した結果と完成系・全体系の中での当該部材の挙動が大きく異ならないように設計・施工されていることが必要である。故に、設計段階において、適切な構造や技術の採用を行うこと、施工手順まで含めた対策を講じておくことが必要であり、たとえば、各種道路構造物の設計基準や様々なマニュアル類は、以上の過程が記録に残る設計が行われるように、絶えず見直しが行われるべきである。

また、特に地震に対しては、地震後の点検部位の絞り込みや、復旧のための事前計画を策定することも可能になる。予め特定された箇所に確実に損傷が誘導され、その他の部位には重大な損傷が生じることがないように、設計段階で対策を講じるとともに、想定した挙動が達成されることの信頼性の確保が重要である。

(3) 設備の設置・耐久性の確保

平時または災害後に構造物の状態を把握し、必要な手当を迅速に行うためには、維持管理設備を予め配置しておくのがよい。そこで、平成24年に改定された道路橋示方書においては、橋の維持管理の容易さと確実さが要求され、必要な維持管理設備の設置が求められるようになった。

また、構造物の耐久性についても信頼度を高め、災害に対する抵抗性を長期に保証することが求められる。道路橋示方書では、耐久性に関して、100年を目安とした規定を示している。しか

し、日本で初めてプレストレストコンクリート橋が造られたのは約 50 年前であること、鋼部材も古くはリベットにより連結されており溶接の規定の導入は 1972 年の示方書からであることなど、現在主流となっている技術の多くが適用されてからの期間は、橋自体に求められる供用期間と比べて短い。コンクリートの塩害、アルカリ骨材反応、床版の疲労損傷、鋼部材の疲労き裂など橋を構成する部材の劣化損傷メカニズムの進展予測や、これらに対する対策技術の耐久性に係わるデータの蓄積もまた十分でない。そこで、現在、国土交通省の橋梁定期点検では、部材毎の対策区分の判定とは独立して、客観的評価尺度に基づく損傷程度の記録を要素単位で行い、データの蓄積を図っている。国土交通省が管理する道路橋の定期点検については、本誌の 2013 年 10 月号²⁾にて解説しており、参照していただきたい。

材料や構造の耐久性の信頼度を高めることも必要であるが、損傷が想定される部材の交換（支承、床版など）が容易に行える構造とすることにより、長期にわたる供用性をより合理的に、高い信頼性で確保するという耐久性の達成手段も考えられる。こうした設計技術にインセンティブを与えるような技術基準の改定も重要な課題と認識している。

3. リスクの発生要因と制御

構造物の耐震設計は、主として被災経験を実験的に解明することで発達してきた。他方、これまで見られた被災形態が全てとは限らないし、また、これまで見られた全ての被災形態それぞれについて橋の耐震性を確認する直接的な手法が十分にそろえられているわけではない。たとえば、2011 年の東北太平洋沖地震では、津波による橋梁の流出被害があった。また、2008 年の岩手・宮城内陸地震では、斜面上の下部構造の移動や落橋が見られた。しかし、これらの影響を直接的に評価するための知見は未だ十分でない。

また、橋の設計では、自動車による荷重、地震や風による影響など作用する荷重の種類やばらつきが大きく、かつ、これらの組合せ状況を想定しなければならない。また、塩分の浸透、凍結融解など多種多様な劣化の影響が徐々に累積していくことに対して、各部材の耐荷力に関する信頼性確

保の前提条件が一定期間担保されるように橋の初期状態や補修時期・品質を制御するための知見や技術が十分に揃っていないわけではない。上述の米国ミネアポリスにおける橋梁の崩壊事故においても、過去からの定期的な点検に加えて、管理者による詳細な点検や応力計測などの調査が行われていたにも関わらず事故に至っている。実際の橋は力学的には複雑な挙動をしている複雑性を有する構造物であること、劣化・損傷・崩壊などに対する工学的知見が不十分であること、それらを踏まえた点検・診断の難しいことを示唆している。

以上の崩壊や劣化などに対する工学的知見の不十分さを考えれば、個々の部材や連結の強度や安全率を高めるだけでは橋が致命的な状態に至る事態を完全には回避できないという前提に立つべきである。

そこで、道路構造物のリスクを制御する必要がある。制御の方法として、不測の事態が生じた場合に対する安全性の感受性を小さくするように構造的な冗長性（リダンダンシーと呼ばれることも多い）が確保された構造形式を採用することやバックアップ構造（フェールセーフ構造）を設置することが考えられ、それぞれ定量的な評価指標や設置基準が求められる。

構造的冗長性の確保とは、異常による影響によって連鎖的に損傷範囲が拡大しないように、同一構造系の同様な機能を有する部材での応力再配分が行われ、補完されるように予め構造上の措置を行うものである¹⁾。バックアップ構造は基本となる構造系が致命的な状況に陥ったのちに初めて機能するように設置される別系統の構造で代替性を確保しようとするものであり、落橋防止構造が広く知られる。落橋防止構造は、支承部の破壊後に機能し、上部構造が下部構造から脱落すること防ぐための構造である。また、2012 年 12 月の中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故の事故調査委員会の報告書⁴⁾では、常時引張り力を受ける接着系アンカーボルトに固定された既設の天井板を存置する場合にはバックアップ構造を設置すべきとされている。

道路橋上部構造のリダンダンシーについては、上述の米国での落橋事故を契機として、我が国でも多くの研究が行われている。国総研では、本誌の 2013 年 8 月号³⁾にて報告しているとおり、橋

梁間の構造的冗長性の差を定量的に評価でき、部材単位でない、構造系としての終局限界状態の照査の一部として設計結果に反映されるような設計基準案の検討を進めているところである。

また、橋梁やトンネルの添架物や、写真-2に示すような補強土壁の壁体パネルについても、荷重と抵抗のばらつきを考慮した信頼性のみならず、落下による第三者被害を防ぐための構造的冗長性を考慮したボルト本数や荷重分配法、バックアップ構造を備えた連結構造など、構造的冗長性やバックアップ構造の確保・設置も含めたリスク制御設計法の開発が必要である。現在、道路利用者及び第三者の被害を防止する観点から、道路構造物本体、附属物、土工構造物の状態を把握すべく、全国で道路ストックの総点検が行われているが⁵⁾、国総研では、その結果の分析とともにこれらの研究に着手する予定にしている。



写真-2 補強土壁の壁面の崩落例

以上、潜在的なリスクを低減するための研究について説明してきた。しかし、それでもなお構造物の破壊を完全に防げるとは言えない。そこで、リスク事象の発生をできるだけ早く把握し、二次災害の危険を低減するための方策も必要と考えられる。しかし、いわゆる点検では毎日パトロールをしたとしても所詮間欠的な状態把握に過ぎず、地震被害のような突発的なリスク事象の発生を直ちに把握することはできない。このために国総研では、GPS や道路管理のための ITV カメラ等を活用し、構造物の位置の変化や形状の狂いから構造物の異常を常時監視する方法の実現性についても検討している⁶⁾。構造物の深刻な異常の検知に特化して性能を絞り込んだ場合、既存設備を有効利用して経済的に監視システムが構築可能である結果が得られている。画像処理技術や情報処理技

術は今後も急速に高機能化と低コスト化が進むと期待できることから、実用化に向けた調査をさらに進めていく。

4. まとめ

これまで述べたように、道路網の中で調和した性能を有するようにするために、道路構造物の設計は、信頼性とリスクを規範にしたものへと移行していくものと考えられる。その第一弾として、現在、道路橋の技術基準について、性能と信頼性に基づく設計体系の導入に向けた改定案の取り纏め作業が急ピッチで進んでいる⁷⁾。

本報告で示した、強靱な国土を形成するための設計や管理の考え方が、インフラの信頼性を高める一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説、日本道路協会、2012。
- 2) 玉越隆史：道路橋の耐久性向上と維持管理体制の適正化に向けた近年の取組みと展望―道路橋示方書と定期点検要領を中心に―、土木技術資料、第55巻、第10号、pp.6～9、2013。
- 3) 玉越隆史、大城温、石尾真理：信頼性とリスクを考慮した道路構造物試算の予防保全的管理手法の研究、土木技術資料、第55巻、第8号、pp.18～21、2013。
- 4) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会：トンネル天井板事故に関する調査・検討委員会報告書、2013。
- 5) 国土交通省道路局：道路ストック総点検実施要領(案)、2013。
- 6) 国総研・社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発 ホームページ：<http://www.nilim.go.jp/lab/pbg/theme/theme2/soupro/soupro3.htm>
- 7) 玉越隆史、白戸真大、横井芳輝：道路橋示方書の部分係数化の背景について、第30回日本道路会議、2013。

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

白戸真大



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
Masahiro SHIRATO