

## 道路橋設計におけるリダンダンシーの評価に向けた取り組み

STRATEGIC CONSIDERATIONS FOR REDUNDANCY EVALUATION RESEARCH IN  
HIGHWAY BRIDGE DESIGN

玉越隆史\*

Takashi TAMAKOSHI

**ABSTRACT** This paper overviews some strategic considerations for the development of evaluation criteria on the redundancy in highway bridges. Serious deterioration, accident, or disaster case histories to bridges are reviewed, followed by some of highlighted research topics to seek evaluation methods to account for the extent of redundancy for individual highway bridges.

**KEYWORDS**：道路橋，リダンダンシー，維持管理，設計基準  
highway bridge, redundancy, maintenance, design specifications

## 1. まえがき

本稿は、道路橋設計におけるリダンダンシーについて、既往の道路橋のリダンダンシーと関わりの深い事故や不具合の事例を踏まえて、道路橋におけるリダンダンシー確保のための方法論について検討を試みるものである。また、道路橋が有するリダンダンシーを定量的に評価するための方法について、上記整理も踏まえていくつかの視点から国が実施している研究の一部を紹介する。

## 2. 道路橋におけるリダンダンシー

近年、社会資本のリダンダンシーに関する研究は各方面で行われており、道路橋に関しても落橋事故の例なども踏まえて、一部の部材の破壊が橋にもたらす影響を解析的に求めようとするなど関連の研究の報告もみられる<sup>例えば 1~3)</sup>。一方、道路橋におけるリダンダンシーとは何か、あるいは設計でどのように考慮されるべきなのかについての統一的な見解や確立された定義は筆者の知るところみあたらない。例えば、後述するように設計基準や点検において、その破壊が全橋に致命的な影響を与える可能性のある部材 (Fracture Critical Member (以下「FCM」という。)) やそれらを有する橋 (Fracture Critical Bridge (以下「FCB」という。)) に対して特別な配慮を求めている米国においても、FCM や FCB に該当する部材や橋、または道路橋のリダンダンシーの定義には様々な捉え方があり必ずしも確立しているわけではないようである<sup>4)</sup>。

日本では道路橋に求める性能は、最終的には道路橋の目的である道路機能の確保の観点から評価される。表-1 に道路橋示方書<sup>5)</sup>における橋の耐震性能の定義と観点を示す。道路機能の喪失の回避や道路機能の速やかな回復が行い得るかどうかに着目して、それを満足させるために道路橋に許容される状態が定められており、実務ではこれを満足するよう損傷形態の制御も含め具体的な構造設計が行われる。

---

\*工修 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 室長  
(〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

そのため、設計荷重や許容応力度をはじめとする安全率に関わる全ての規定や様々な照査基準は、突き詰めると目標とする道路機能の保証水準を達成するための手段に過ぎない。さらに、2012年の道路橋示方書<sup>6)</sup>では、東日本大震災の経験や今後想定される巨大地震対策の検討状況なども考慮して、条件によっては橋の機能障害によって一部区間の道路機能が損なわれる事態を想定し、代替路の確保など地域の道路計画全体で道路機能に補完性や代替性を確保することも念頭におくべきとの考え方が示された。

以上も踏まえ、本稿では道路橋におけるリダンダンシーの確保を道路ネットワークの機能喪失というリスクの低減のための手段と捉え、既往の事故や不具合の事例から以下の①から③の切り口で、道路橋のリダンダンシーに関連する項目の抽出を行うとともに、リダンダンシー確保のために取り組むべき課題を整理することを試みる。

- ① ネットワークの機能そのものが損なわれにくい（回避・抵抗）
- ② 仮に、損なわれてもネットワークの機能が速やか（かつ容易）に回復される（回復）
- ③ ②の前提として、ネットワーク機能の障害が速やか（かつ容易）に認識・判断できる（認識）

表-1 道路橋示方書(H24)における橋の耐震性能の観点<sup>5)</sup>

橋の耐震性能	耐震設計上の安全性	耐震設計上の供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1： 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2： 地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能である
耐震性能3： 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—

### 3. 道路橋におけるリダンダンシーに関わる事例

#### 3.1 東北地方太平洋沖地震の事例

2011年の東日本大震災では、津波による上部工の落橋などによって沿岸域の道路網が広範囲に寸断されたが、内陸部から沿岸域に向かう道路の供用を確保することでアクセスが確保されたケースが多くあった。また、平時には行われていない臨時の海上輸送等による道路機能の補完も多くなされた<sup>7)8)</sup>。これらは、一部の橋及び道路の機能不全時にも他の道路や輸送手段が機能できれば、道路が担う人貨の輸送機能はある程度維持できることが実証された例といえ、道路橋のリダンダンシーは、橋のみで捉えるのではなく、その目的である輸送手段のリダンダンシーの観点から捉えて検討することが、不測の橋や道路の障害に対するリスク低減には重要であることがわかる。

また、この震災では各所のライブカメラ等による画像情報が現地状況の迅速な把握を可能とし、適切な震後対応に大きく貢献したとみられる<sup>9)</sup>。筆者らが発災後より実施した現地支援活動においても、被災箇所や調査箇所の特定、アクセスの検討などで現地の最新情報は極めて有効であった。道路網の障害に対する代替輸送手段の手配や復旧等の緊急対応の実施、あるいはその内容の決定なども、そもそも最新状況の把握なくしては不可能であり、状態の速やかな認知がリスク低減には重要な要素と言える。

#### 3.2 祭時（まつるべ）大橋の事例

2008年の岩手・宮城内陸地震では、国道342号の祭時大橋（鋼3径間連続鈹桁橋）が落橋した<sup>10)</sup>。周辺では大きな地震動が観測され、近辺の道路橋にも様々な損傷が確認されたものの、大規模な連続橋の上部工が完全に崩落したことは稀な事象として注目を集めた（写真-1, 2）。被災後の様々な調査により、架橋位置での広範囲の地盤の移動に伴って下部工が地盤とともに大きく移動したことが原因と特定された。そして、従来一般的な事前調査のみでは、地すべりの予測は困難であったと推測された。

本橋の被災では、地すべりの影響範囲をわずかに離れた位置にあったため被災を免れた、供用停止中の旧橋（写真-3）が緊急に活用された。これは東日本大震災の津波被災道路に対する他の道路による機能補完と同様に、架橋位置の設定や路線計画にあたって、より被災リスクの少ない選択肢を採用したり別途用意しておくことが道路機能のリダンダンシーの確保に有効であることを示した例といえる。



写真-1 祭時大橋架橋位置



写真-2 崩落した祭時大橋



写真-3 旧橋

### 3.3 シルバー橋・マイアナス橋の事例

米国では、1967年12月にウエストバージニア州で213mの吊り橋（シルバー橋）がアイバーの吊り材の破壊を契機に突如崩壊した。原因は吊り材を構成するアイバーが亀裂の進展により破壊したとされたが、調査を行った国家運輸安全委員会（以下「NTSB」という。）の勧告では、直接原因である疲労への配慮以外に、事故原因となり得る全ての部位の点検を確実に実施すべきことが指摘された<sup>11)</sup>。

事故後、連邦政府が橋梁維持管理体制の改革を進め、1971年には法定の橋梁点検基準を制定、1978年からは橋長20フィート以上の全道路橋に2年毎の有資格者による点検が義務づけられた。以来、現在まで点検の基本的な内容は踏襲して継続されており、全ての橋について技術者が定期的に直接目視などによって状態を確認することが安全確保の基本となっている。

1983年6月には、コネチカット州で鋼桁橋（マイアナス橋）の吊り桁径間が吊材の破壊により落下する事故が生じた。事故調査の結果<sup>12)</sup>、直接の原因は、ピンハンガー形式吊材の発見困難箇所で行った疲労亀裂とされたが、それ以外に、亀裂への関与が疑われる腐食の放置など不十分な維持管理と、その原因として部材へのアクセス性の悪さなど点検困難な条件となっていることが指摘された。

その後、米国では、FCMやFCBの概念が導入され、橋全体に致命的な影響を及ぼす部材への充実した点検などが求められることとなったが<sup>13)</sup>、本例からは、高頻度化するなどの点検の充実はリスク低減に効果はあるものの、一方で確実な点検を保証する点検困難箇所の排除もまた不可欠であることが指摘できる。

一方で複雑な構造体である道路橋では、近接目視困難箇所の完全な排除は難しいことが考えられ、点検困難箇所での異常発生もリダンダンシーの欠如と同義と考えると、点検困難箇所での損傷発生リスクの低減や仮に損傷した場合にも致命的な状態となる前に何らかの兆候が間接的であっても認識できるような配慮を行うこともリダンダンシー確保策の一つと考えることができる。

### 3.4 来島海峡第一大橋の事例

2001年の芸予地震では、本州四国連絡道路の吊橋（来島海峡第一大橋）において、主ケーブルと補剛桁の相対変位抑制のためのセンターステイの鋼製ロッドが破断した。このロッドは、補剛桁本体に損傷が生じないことを確実にするために、許容応力度などの幅をもった下限規定ではなく、材料の鋼材検査証明書や実験結果を反映した実破断強度で設計されており、設計の想定通りに所定の効果を発揮したことが検証で確認された<sup>14)</sup>。

一方、写真-4,5は、地震による支承部の被災例である。単に支承部で破壊するだけでなく、速やかな復旧のために、コンクリートの上下部工本体に大きな損傷を生じさせないことも要求であれば、単に基準の許容値を満足させるのではなく、材料強度や施工品質などのばらつきなども考慮したうえで、必要な安全余裕の差を適切に確保しなければ、意図する損傷形態に確実に誘導することは不可能であることが伺える。

このように、部材の品質や強度などの特性のばらつきを適切に設計に反映し、破壊する部材を特定したり、部材の破壊などの影響の波及を確実に制御できることは、合理的なリダンダンシー確保策の実現において重要な課題といえる。



写真-4 下部工本体の破壊が著しい支承部の被災



写真-5 主桁側の破壊が著しい支承部の被災

### 3.5 コンコルド橋の事例

2006年9月にカナダのケベック州でコンクリートのゲルバー橋が、交差する供用中道路に崩落する事故が生じた。事故調査の結果<sup>15)</sup>、直接の原因は、伸縮部からの雨水や凍結防止剤の塩分の侵入や凍結融解作用等によるゲルバー部の損傷の急激な進展と推定された。これ以外に、材料品質や施工品質が耐久性の観点から必ずしも十分なものではなかったことに加え、不適切な配筋によって本来期待できる靱性的挙動が期待できない状態であったことも事故が防げなかった要因の一つとされた。

なお、ゲルバー構造は捉え方によってはリダンダンシーのない構造とも考えられるが、調査報告<sup>15)</sup>では、適切に設計・施工された鉄筋コンクリート部材は、崩壊前に変位が兆候として現れるなど靱性的な挙動が期待できるため、ゲルバー構造であること自体が問題とはされていない。

道路橋の設計では、コンクリート部材における脆性的破壊の防止のための配筋規定などのように、定量的な照査基準に基づかないものも多い。そのため基準の性能規定化が進みつつあるものの、基準に示す標準的な仕様や照査方法によらない設計に対して、このような構造細目の直接的、間接的効果まで漏れなく確実に担保されるように照査基準などを示すことは極めて困難であり、このような場合には十分な技術力と知見を有する技術者による適切な照査が行われることが不可欠である。

限界状態設計法の概念が浸透するにつれて、強度的な限界さえ満足されれば、限界状態に至るまでの構造物の挙動には注意を払う必要がないとの意見を耳にすることがあるが、本件は、少なくともリダンダンシーの評価では、こういった定量的に照査可能な強度的な性能や限界状態の充足のみならず、外力に対する部材の挙動についても必要に応じて要求性能の一部として満足されることが不可欠であることが示された事故と捉えることができる。

また、本事故では、当初設計や材料品質、過去の補修工事などでの不適切も事故の発生に関わったと指摘した調査委員会が、その勧告において、建設段階から維持管理段階まで橋の現況の適切な評価に必要な記録は適切に整備して供用中は保持し続けるべきと指摘した。構造設計で様々な配慮を行うのと同様に、点検や補修等の措置が都度適切に行えることも崩壊などのリスク低減に不可欠な要素であることから、適切な記録の整備や保持もリダンダンシー確保策の重要な一部を担うと言える。

### 3.6 I-35W 橋の事例

2007年8月には、米国のミネソタ州でミシシッピ川を越える大型の鋼連続上路トラス橋(I-35W 橋、橋長 581m) が突如崩壊し、多数の死傷者を出す惨事となった。事故調査の結果<sup>16)</sup>、設計の誤りで板厚不足であったガセットプレートが、過去の改修等での死荷重増など様々な要因も重なって破壊したことが明らかにされた。調査ではこの他、①設計プロセスにおける不十分な品質管理や照査体制の不足、②実橋梁の構造特性を反映させた耐荷力評価プロセスの欠如、③点検におけるガセットプレートに対する確認や認識の不足などによって、設計の誤りが設計・施工の段階のみならず、何度も行われた点検においても看過されたことが問題であると指摘された。

リダンダンシーとの関わりでは、本橋は鋼の上路トラスであり、FCB として落橋前まで数ヶ月毎に点検するなど特別な注意が払われていた。結果的には事故に至ったものの、橋の構造条件に応じて管理上の扱いを差別化することには一定の合理性があることが証明されたものといえる。一方で、一般的な外観目視点検で全ての異常を認識することは困難であり、特に劣化や損傷のような特異な外観性状を示さない設計の誤りを管理段階で見出すことの困難さも浮き彫りとなった。NTSB の勧告では、

この対策の一つとして、点検技術者に FCM に対する充実した教育を行うなど点検従事者の技術力の向上が必要であることを指摘している。

道路橋のように長期に供用される場合、様々な不測の事態も避けられないと考えると、維持管理段階において様々な異常をより確実に検知できることは、リダンダンシーに関わる事故リスクの低減にも有効といえる。すなわち、必要な知識と経験を有する技術者が維持管理に従事し、かつ従事者に求める技術力は、最新の技術的知見を踏まえて絶えず見直しを図られることが不可欠であると言える。

### 3.7 君津新橋の事例

PC ローゼ橋（支間 66m）の君津新橋では、2008 年 10 月に吊材の破断が確認された<sup>17)</sup>。吊材は周りがステンレスの保護管で覆われた鋼棒（φ32mm, SBPR, B 種 2 号）であり、原因は、保護管内の滞水等で電位差のある保護管と鋼棒が電氣的に接触して生じた異種金属接触腐食と考えられた。（写真-6, 7）

この事故では、吊材の破断による耐荷力への影響とは別に、保護管の存在のために他の吊材の状況が外観から確認できず、連鎖的な破断の可能性の評価ができないことが事故直後に問題となった。

このように、部材の機能障害に際して、橋の機能状態が容易に判断できないことは、リダンダンシーの有無が判断できず、結果的にリダンダンシーがない前提での対応を余儀なくされる事態を招く。そのため、リダンダンシーの確保には、実際に構造的なリダンダンシーを有していることに加えて、それが発揮されている状態であることを容易に判断できる構造であることも必須の要件といえる。



写真-6 吊り材破断の状況



写真-7 保護管と鋼棒の状況

### 3.8 雪沢大橋の事例<sup>18)</sup>

雪沢大橋は、橋長 177m の 3 径間連続エクストラード PC 箱桁橋で、斜材は直径 5.1mm の鋼線 7 本からなる PC 鋼より線が 19 本の構成のケーブルが 16 段である。ケーブルは工場継ぎ目なくポリエチレン被覆が施され、一般部は雨水の侵入が完全に遮断されている。ただし、定着部形成のために端部の一部は一旦被覆が除去された後に、防錆剤塗布や防食テープで覆われる一般部と異なる防食仕様となっている。

事故は、2011 年に斜材の 1 本が定着部近傍で破断したものであり（写真-8, 9）、防食システム内部への侵入水による鋼材の腐食が疑われた。事故後の検証では、ケーブル 1 段の機能喪失では、他のケーブルへの応力再配分によって橋全体に致命的な影響は生じず、斜材相互で代替性を有していたことが確認された。また、本橋のケーブルはソケット形式による定着となっており、事故後に慎重な調査が行われた後、特別な補強等を要する事なくケーブルを交換して復旧された。



写真-8 斜材破断の状況



写真-9 斜材の破断部

本橋の場合、結果論であるが、設計で供用中に構造物の性能に重要な部材が何らかの原因で破壊することを想定した検討を行い、致命的な事態とならないように構造的配慮を行うとともに、破壊を想定する部材を交換可能な構造とするなど復旧性に配慮することで、経済的合理性を損なわずにリダンダンシーのある構造の実現が行える可能性が示された事例といえる。

### 3.9 木曾川大橋、本荘大橋の事例

2007 年には、国内の鋼下路トラス橋で、コンクリート床版を貫通して埋め込まれている斜材が埋め込まれた部位で破断する事故が相次いで発生した<sup>18)</sup>。いずれもトラス格点をピンと仮定した構造モデ

ルを用いる，従来からの一般的な設計によっており，斜材の破壊は，設計上は致命的な事態を招き兼ねない。しかし，実際にはガセットプレートでボルト接合した格点は回転等に対して一定の抵抗機能を有し，また床組みと一体となってコンクリート床版も荷重分配に寄与するなど，設計と実態の乖離によって崩壊には至らなかったものと考えられる。当然，このような実態と乖離した設計の仮定は，重要な部材の破壊を想定して安全余裕を確保するために意図的に行われたものではない。

これらの事故により，ガセット格点をヒンジでモデル化するなど，現在道路橋の耐荷力設計で一般に行われる設計と実態の乖離した格点のモデル化や板組などの細部構造の影響を正確に反映することが難しい骨組解析では，一部の部材の破壊の影響を把握するなどの構造的なリダンダンシーの評価を高い信頼性で考慮することが困難であることが再認識された。すなわち，部材の破壊やそれに伴う部材の塑性化や大変位などの影響を考慮して，実際の耐荷力を必要な精度と信頼性で推定できるための解析手法や解析結果に対する判断基準の確立が，構造設計において適正にリダンダンシーを確保するためには不可欠である。



写真-10 木曾川大橋



写真-11 斜材破断部（木曾川大橋）



写真-12 本荘大橋

### 3.10 道路橋に求められるリダンダンシーの概念

以上，道路橋及び道路の機能のリダンダンシーに関わるいくつかの事例を紹介した。これらの例や東日本大震災を踏まえた技術基準の改定における議論なども踏まえて，道路橋の機能障害についてそれが担保すべき道路ネットワークの機能への影響の波及リスクと，それらの影響を緩和するために有効と考えられる道路橋におけるリダンダンシー確保策の関係性について，図-1 あるいは表-2 のとおり整理することを提案したい。

供用期間が長期にわたり，設計から維持管理段階までその性能に影響する要素が広く多岐にわたる道路橋の場合には，いくつかの事例を取り出しても，橋が供用期間中に遭遇する状況の全てを想定することは極めて困難である。そのため，発生するリスク事象を具体的に想定して行う対策だけでなく，具体の事象は想定せずリスク事象が発生するということだけを想定して，悪影響の軽減を図る対策をも組み合わせる行うことが合理的と考えられる。また，道路機能の確保の観点からは，ネットワークレベルから部材レベルまで，

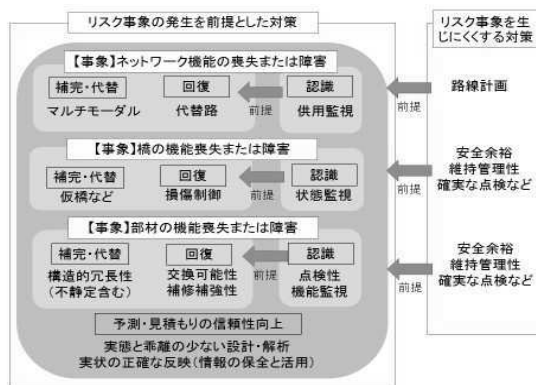


図-1 道路橋のリダンダンシー確保策相互の関係

表-2 道路橋のリダンダンシー確保のための対策

対応事象	リスク対策の性質	対策の内容	対策例	本稿で言及した関連事例
ネットワーク機能の喪失または障害	発生時の破綻回避	路線計画	迂回路、多重経路、調査の信頼性向上	祭時(まつるべ)大橋(3.2) 東日本大震災(3.1)
	発生時の破綻回避	認識できること 回復できること 補完・代替されること	供用監視 代替路 マルチモーダル	東日本大震災(3.1) 祭時(まつるべ)大橋(3.2) 東日本大震災(3.1)
橋の機能の喪失または障害	発生時の破綻回避	安全余裕の確保 維持管理性の向上 確実な点検の実施 など	点検性	シルバー橋(3.3), マイアナス橋(3.3)
	発生時の破綻回避	認識できること 回復出来ること 補完・代替されること	状態監視 損傷制御 仮橋	東日本大震災(3.1) 来島海峡第一大橋(3.4) 祭時(まつるべ)大橋(3.2) 東日本大震災(3.1)
部材の機能喪失または障害	発生時の破綻回避	安全余裕の確保 維持管理性の向上 確実な点検の実施 など	管理従事者の技術力 靱性の確保	コンコルド橋(3.5), I-35W(3.6),
	発生時の破綻回避	認識できること 回復出来ること 補完・代替されること	点検性 やモニタリング 交換可能性 補修補強可能性 構造的冗長性	マイアナス橋(3.3) 君津新橋(3.7), 雪沢大橋(3.8) 木曾川大橋(3.9), 本荘大橋(3.9), マイアナス橋(3.3), 雪沢大橋(3.8)
共通	発生時の破綻回避	予測や見積りでの信頼性	実態と乖離の少ない設計・解析 実状の正確な反映 (情報の保全と活用)	コンコルド橋(3.5) 木曾川大橋(3.9), 本荘大橋(3.9)



様々なレベルでリスク低減策が取り得るために、これらを鳥瞰して適切に組み合わせなければ、リスク対策の費用対効果を最適化することは実務上困難になると想定される。

因みに、本稿では各事故例に対して、リダンダンシーとの関わりで特に筆者が着目した点のみを取りあげているが、いずれの例も言及した以外にも様々な要因が複雑に関わって事故等の事象に至ったものであることを断っておく。

## 4. 道路橋の設計におけるリダンダンシー考慮の方向性

### 4.1 リダンダンシーの考慮方法に関する取り組み

3. で例示したように、国内外において道路橋のリダンダンシーに関わる様々な事故や被災が報告されている。そのため、我が国の設計基準の改定や維持管理制度の改善に向けた検討においてもリダンダンシーの観点から重大事故に至るリスクを低減するための対策の検討や関連の研究もみられる。

ここでは、道路橋のリダンダンシーにも関わる設計基準の改定検討の動向、及び道路橋のリダンダンシー評価にも関連して現在国総研で進めている研究の一部を紹介する。

### 4.2 設計基準（道路橋示方書）における対応

道路橋示方書（H24）では、共通編において、設計に対する包括的要求として、「維持管理の確実性及び容易さ」について考慮すべきことが規定されている<sup>6)</sup>。また具体的な構造設計においてリダンダンシーに関わる次の3項目への配慮が求められている。すなわち、①一部の部材の損傷等が原因となって、崩壊などの橋の致命的な状態となる可能性。②供用期間中の点検及び事故や災害時における橋の状態を評価するために行う調査並びに計画的な維持管理を適切に行うために必要な維持管理設備。③供用期間中に更新することが想定される部材に対する更新の確実性と容易さ。の3つである。しかし、基準上はいずれも定性的な性能要求に過ぎず、これらの配慮を明らかに怠った設計の排除に一定の効果が期待されるものの、一定水準以上の実効性のある対応を担保するためには、より具体的な配慮事項を明示したり、定量的な照査基準を確立することが必要と考えられる。

これらに関連した取り組みの一つとして、国総研では、一定以上の維持管理品質が確保されるよう、維持管理性を評価するための定量的指標の検討を進めている。具体的には、技術者による近接目視が困難となる箇所について、狭隘さなどの空間条件などを考慮したアクセス性についての定量的表現方法を検討するとともに、近接困難箇所に対して機器等を侵入させて画像情報を取得することを想定し、機器のアクセス性能や取得される画像情報の精度や信頼性等の機器能力に関する客観的評価基準の検討を進めている。将来的には、新設橋では設計段階で近接目視困難性を評価してその排除や改善に努めるとともに、点検困難箇所が残る場合にも少なくとも機器等の援用によって一定水準以上の点検品質が確保されるような配慮を行ったり、点検困難箇所の強度や耐久性を相対的に高めるなどの損傷制御設計によるリスク低減が確実に行われることを目指している。なお例えば米国の道路橋の設計基準（以下「AASHTO 基準」という<sup>19)</sup>においても基本的要求事項に「維持管理性 (Maintainability)」「点検性 (Inspectability)」が挙げられているものの、具体的な照査基準は規定されていない。

### 4.3 設計体系（部分係数設計法）

現実の道路橋の設計では、部材断面の決定などに、具体的に状況を想定せざるを得ないものも多い。このとき、想定の結果はコスト全体に大きく影響するため、それが実際にどの程度の確率で生じると見込まれるのか、あるいは費用対効果の観点も含めてそれらを考慮すべきか否かについて一定の説明性をもつことはインフラの性格からは重要である。そのため基準類で要求する構造物（橋）の性能については、「供用中に遭遇することを想定する状況」に対して「構造物がどのような状態になるのか」を「どの程度の信頼性で保証されている」という形で説明されることが望ましいと考えられる。

現在、道路橋示方書を許容応力度設計法から部分係数設計法に転換させる作業が行われているが、2002年から道路橋示方書で導入された要求性能と具体の照査基準の関係性をできるだけ明示すると

いう性能規定方法は堅持し、さらに部分係数による照査基準を具体的な設計状況との関係性が明らかでない形で整理が可能かどうかという観点からの検討も行われている。(図-2)

なお、具体の想定を行うことなく、部材の破断などのリスク事象が発生することを与条件としてその対策を行う場合、それらが実際に生じる可能性があることを発生頻度や生起確率などの客観的かつ定量的な根拠で説明することは難しく、リスク軽減策としての費用対効果も評価できないため、そのような想定の有無で経済性に有意な差が生じる場合、その妥当性を証明することは容易ではない。

今後、様々な架橋条件や外力等の想定に応じて合理的かつ過不足なく所要の性能が達成できることもメリットとして設計基準の部分係数化を行うにあたっては、このような生じる事の確からしさを曖昧にしたまま、これに対応したリスク対策を行うことの必要性や合理性の整理が一つの課題である。

なお、既に部分係数設計体系となっている米国では、設計基準における信頼性指標と同じ考え方で構造システムとしてのリダンダンシーやロバストネスの定量的評価を行う試みもなされており<sup>20)</sup>、信頼性に基づく構造設計基準の性能規定において、将来的には構造システムの有するリダンダンシーについても定量的評価を導入する動きが加速する可能性も考えられる。

#### 4.4 設計におけるリダンダンシー評価のための構造解析モデル

例えば、文献<sup>21)</sup>では、道路橋の上部構造の設計における、リダンダンシーの評価方法として、非線形性を考慮した格子解析モデルを用いた方法が紹介されている。具体的には着目部材に対して最も不利となるように、設計自動車荷重の一つであるHS-20トラックを載荷し、終局限界状態リダンダンシー、機能的リダンダンシー、損傷に対するリダンダンシーという異なる3種類の限界状態に達するときの荷重倍率の健全な状態から主要部材のひとつが降伏等の損傷状態に達するときの荷重倍率に対する比率により評価する方法となっている。一部の部材の機能喪失による橋全体への影響が評価されているものの、設計状況との関係からは以下の点で課題もあるものと考えられる。

- ・計算上は設計状況として一見あり得ないように思える大きな荷重状態（あるいは稀な発生頻度）となることが想定される。
- ・弾塑性モデルながら格子解析モデルが基本であり、例えば、局部の応力によるガセットやフランジの座屈などの発生時期やそれによる構造系の変化の影響の

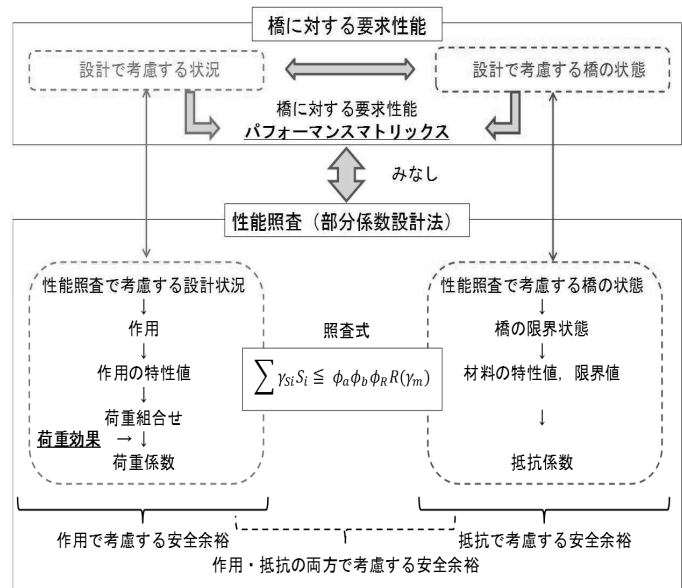


図-2 道路橋の性能と部分係数設計法の関係

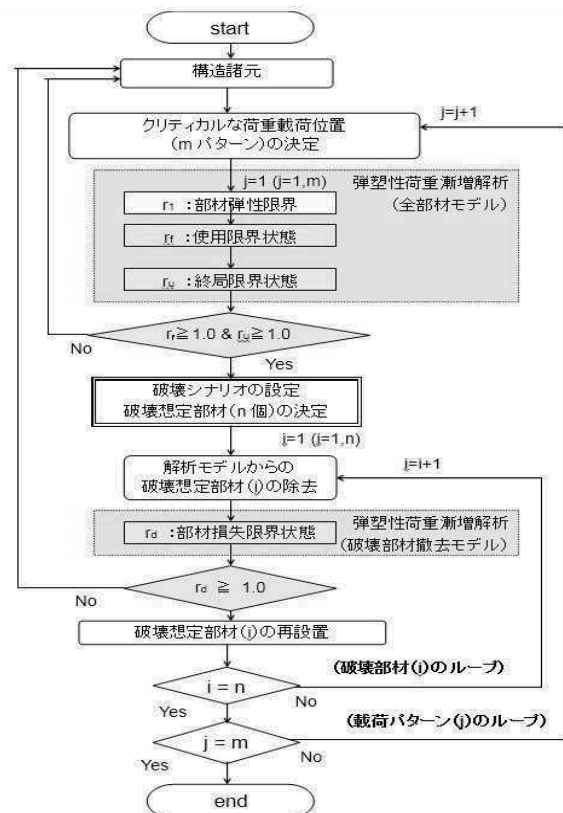


図-3 リダンダンシーの評価フローの例  
文献 21) を参考に筆者が作成



再現性には限界があり、構造条件によっては実際の挙動との乖離が大きくなる可能性がある。

特に評価に用いる解析モデルに関して、部材の破壊を想定するような状態における耐荷力評価では、大変形や様々な部材の塑性化、ひびわれの発生、部材局部での応力超過や局部座屈の発生などが生じる。そのため、それらの変状の発生時期や発生形態による影響をできるだけ正確に反映させて、構造系の安定の評価や耐荷力状態の推定を行わなければ、実現象と乖離した評価となることが懸念される。例えば、過去の地震等の災害時に過大な作用によって生じた鋼部材の変状の例を写真-13～15に示す。塑性化を考慮したとしても格子解析モデルのみによる構造解析では、これらの破壊過程や変状状態での部材の機能状態の評価には限界があると考えられる。一方で、リダンダンシーの定量的評価のため用いる解析モデルの精度について標準的な考え方やベンチマークがあるわけでない。例えば、徒に精緻な解析モデルによることは、新設設計においては膨大な労力が必要となり経済性の面でも負担となりうる。また、被災時の評価などで迅速な対応が求められる場合にはモデル化や解析自体に時間を要することそのものがリスク要因となりえることも考えられる。



写真-13 ガセットの塑性化

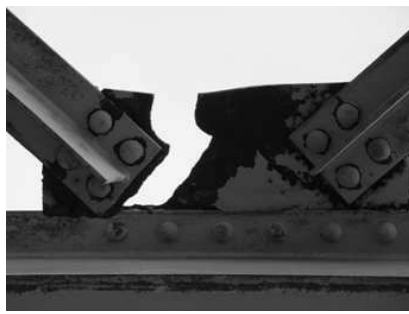


写真-14 ガセットの破断



写真-15 桁の横倒れ

一方で、道路橋の新設設計においては、解析技術の発達と設計の合理化の進展によって、従来の格子解析ベースで行われてきた耐荷力設計に加えて、部材各部の応力や状態を精度よく評価することで、より合理的な対応が期待できる場合も多い耐震設計や疲労設計においては、FEM解析や一定せん断流パネル解析<sup>22)23)</sup>などのより精緻な解析モデルの活用も検討される。実務においては、照査内容毎に多数の異なる解析モデルを使い分けるよりも、必要な信頼性で適正な評価が行えるのであれば、できるだけ同じモデルによって照査が行われる方が効率性や整合性の観点からは望ましいとも考えられる。

このような点に着目して、リダンダンシーに着目した解析への適用も念頭に耐荷力評価において構造構造解析モデルのモデル化レベルが評価結果に及ぼす影響について検討した例を紹介する。

まず、鋼上路アーチ橋をモデルに、格子解析モデルにおいて、格点部の結合条件や床版等の耐荷力部材としての考慮方法の違いが耐荷力評価結果に及ぼす影響について検討した結果の例を図-4に示す。同様に、実際に斜材で破断が生じた木曾川大橋と同じ下路トラス橋を対象に、格点をピン結合した平面骨組モデル、格点を剛結合した立体格子モデル、格点部を含めシェル要素としたFEMモデルの3タイプのモデルで比較を行った。面骨組以外は、床版、床組（縦桁、横桁）、横構もモデルに考慮している。ここでは格点のモデル化の相違の影響のみに着目することとし、材料非線形は考慮していない。モデルの概要と着目部材（支間中央の斜材）の発生応力度の比較例を図-5に示す。格点の結合条件や床版剛性の考慮の有無、耐荷力性能に大きな影響を及ぼす格点部などの構造詳細のモデル化レベルなどによって評価結果には明確な差異が生じていることがわかる。3タイプの中では最も実態に近いと考えられるシェル要素でモデル化した格点近傍の主応力を図-6に示す。複雑に構成された板の応力状態は複雑で各部で応力集中が生じていることがわかる。さらに、シェル要素を用いた同モデルに対して材料非線形及び幾何学的非線形を考慮した解析を行い、図-5の着目部材（斜材）が破断した後の橋全体の耐荷力に関する検討を行った。実際には起こり得ない状況であるが、図-5の着目部材（斜材）の作用応力度が最大となる位置に活荷重を荷重増分法で載荷した。解析結果を図-7に示す。破断させた斜材周辺の部材に荷重が再分配されて、トラス主構のほか格点部にも大きな変形を生じていることがわかる。

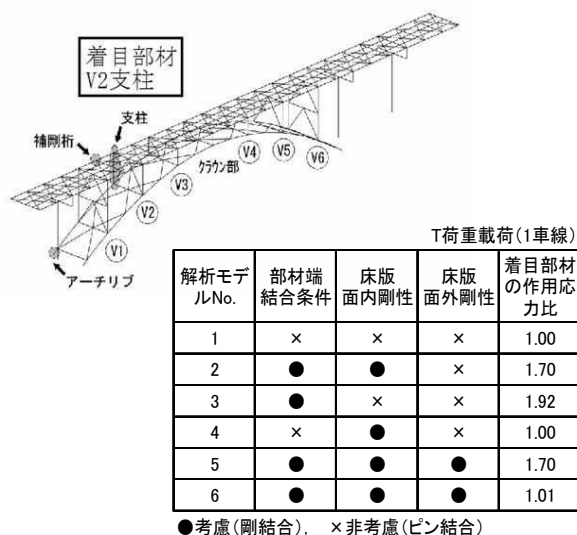


図-4 解析モデルの違いによる作用応力度（アーチ）<sup>22)</sup>

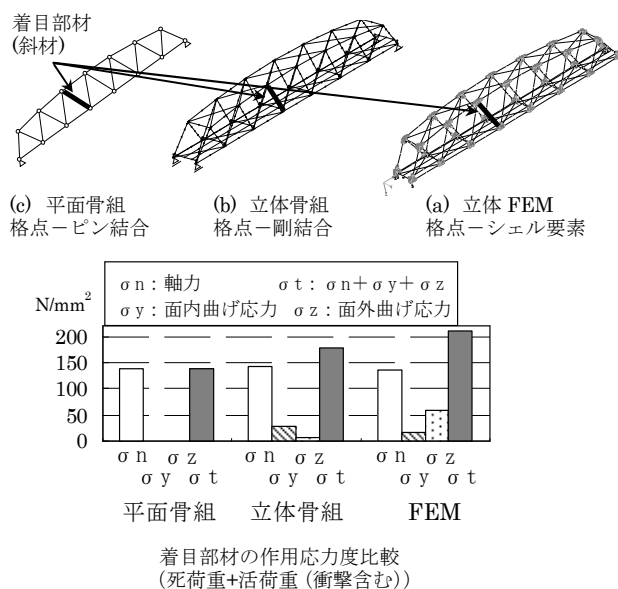


図-5 解析モデルの違いによる作用応力度（トラス）

以上のように、一部の部材の機能障害が橋全体の耐荷力に及ぼす影響について実態に則して信頼性のある評価を行うためには、耐荷力機構や荷重分配効果に影響のある構造条件については、実構造の特性をなるべく忠実に反映したモデル化が必要であることがわかる。

特に、局部応力による板の座屈や板の一部の塑性化など、その抵抗状態や破壊に至るまでの挙動が耐荷力特性に大きな影響をもつ部材や部位については、実際の板組等の構造詳細やその各部位に発生する応力なども精度良く再現できるモデルによる評価が必要であることがわかる。なお、このような解析的定量的評価を実務設計のリダンダンシー照査に導入するためには、経済性や安全水準を左右することになることから、橋梁条件や設計者の相違によらず一定の精度や信頼性で性能評価されることも重要である。そのため部材の破壊による影響を部材の細部構造の挙動も精度良く予測して、経済的かつ合理的にリダンダンシーに配慮した構造が試行錯誤できる解析手法やその結果の判断基準についても確立される必要がある。

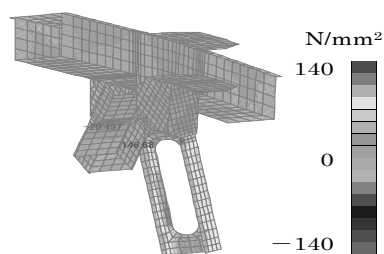


図-6 トラス格点部の主応力コンター図

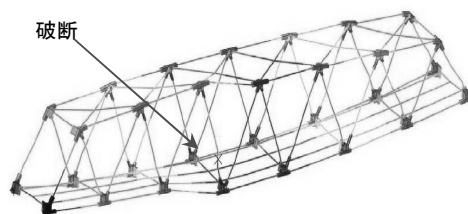


図-7 斜材を1本破断した状態の変形図 (死荷重+6.6×活荷重)

#### 4.4 経年劣化がリダンダンシーの評価に及ぼす影響 (FTA, 劣化分析)

構造物のリダンダンシーが問題となるような機能障害の原因となる部材の損傷や破壊の発生は、事故などの突発的事象による場合以外に、過去の例からも経年的な劣化事象によって生じたり、経年的劣化の影響が大きく影響することが考えられる。そのため、橋の構造設計においてリダンダンシー確保の方策をリスク低減の効果や優先度の観点で考える場合、各部材が橋の耐荷力性能に果たす構造力学的な観点での評価と、経年の影響によって損傷等により機能障害を生じる可能性の大きさの組み合わせにおいて評価することが重要と考えられる。

例えば、代表的ないくつかの道路橋の形式について、Fault Tree Analysis(FTA)により、部材相互が橋全体の構造安全性にどのような位置づけで関わっているのかというリスク構造の分析を行った例も見られる<sup>24)</sup>。また、Kearyら<sup>25)</sup>は、実際に洗掘で崩壊した橋を例にFTAによる崩壊シナリオの分析

を行い、FTA によって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ることでリダンダンシーの有無やリスクの定量的評価が行える可能性があることを示している。

我が国では直轄管理の道路橋については定期点検要領<sup>26)</sup>（以下、「点検要領」という。）での点検が概ね2巡しており、大半の橋で2回分の点検結果の蓄積がある。国総研では、既往の研究<sup>24, 25)</sup>も参考に、代表的な道路橋形式についてFTAによるリスク要因の階層化を行った上で、それらに点検結果から推定した部材や要素毎の劣化特性（損傷発生確率）を組み合わせる方法で、供用期間中に橋が致命的な状態になるリスクの定量的推定が行える可能性についての基礎的な検討を行った。

橋が致命的となる損傷状態は、点検要領に従って対策区分E1（構造安全性の観点で緊急対応が必要な状態）と判断される事象の例を参考に抽出した。これらを基に、代表的な橋梁形式についてFMEA（Failure Mode and Effects Analysis）チャートを作成した。鋼桁橋の例を表-3に示す。

損傷の橋への影響度を「致命的、重度、軽微、微小」の4段階で定性的評価を行い、次にFMEAチャートにより、構造型式毎に部材及び損傷種類、橋梁への影響度を定義して各FT図を構築した。FT図の例を図-8に示す。頂上事象（対策区分E1）に対して部位・部材を階層とした中間事象を設定した。

基本事象は部材・損傷種類ごとのE1となるが、経年との関係で評価するため、同じ部材に対して点検要領に従って別途評価されている客観的な損傷程度の段階的評価値(a:損傷なし~e:極度に進行した状態)の最悪値(e)をこれに相当するものと仮定し、経過年ごとのE1の発生確率を算出する。具体的には損傷種類、部材部位単位毎にマルコフ過程を仮定して求めた状態遷移確率分布(図-9)から経過年毎のE1の発生確率(=eの比率)を求めた。

図-10(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、供用時点(早期)から経年100年後(長期)まで求めた例である。経年に従って単純桁と連続桁では明確な差が生じ、単純桁の方がリスクが高い。これは連続橋と径間数を合わせるために2連とした単純橋は、腐食の進展が早い橋台部に位置する桁端が連続橋より多いことが大きく影響している。なお中間事象のリスクを図-10(b)に示すが、本検討のモデルでは主桁の損傷リスクが頂上事象の発生確率に支配的な影響を有している。次に、図-10(a)の単純桁で主桁本数を変えた場合の例を図-11(a)に示す。致命的な状態に支配的な影響をもつ主桁の本数が多くなるにつれて同時発生確率が激減するため、2主桁が特に危険性が高い結果となっている。このように、構造系と劣化特性を組み合わせることで、供用期間中のリスクを定量化できる可能性のあることがわかる。

このような、評価結果の信頼性には、構造安全性の評価の正確性と劣化予測の信頼性が大きく影響する一方で、点検結果の分析からは実際の劣化

表-3 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(落橋相当)	4 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	
	疲労損傷	亀裂	腐食と同様	2 主桁全数の20%未満で発生	主桁断面減少の腐食と同様
		破断			
	耐力不足	歪みたわみ			
	変形・欠損				
接合部損傷	腐食				
	ゆるみ・脱落				
横桁	分配機能喪失	腐食	軽微	2	
		亀裂	軽微	2	
		ゆるみ・脱落	軽微	2	
		破断	軽微	2	
		変形・欠損	軽微	2	
床版	疲労損傷	抜け落ち	致命的(落橋相当)	4	
		床版ひびわれ	重度	3	
支承	支持機能喪失 移動落橋の恐れ	破断	致命的(落橋相当)	4 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	
		支承の機能障害	破断と同様	2 支承全数の20%未満で発生	支承本体の破断と同様
		沈下・移動・傾斜			
		ゆるみ・脱落			
		破断			
下部分工	支持機能の喪失	変形・欠損	重度	3	
		ひびわれ	軽微	2	
		剥離・鉄筋露出	軽微	2	
		異常なたわみ	致命的(落橋相当)	4	
		変形・欠損	重度	3	
		沈下・移動・傾斜	致命的(落橋相当)	4	
基礎		洗掘	致命的(落橋相当)	4	

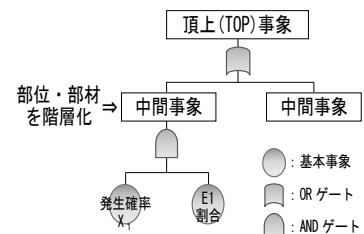


図-8 FT図の構造

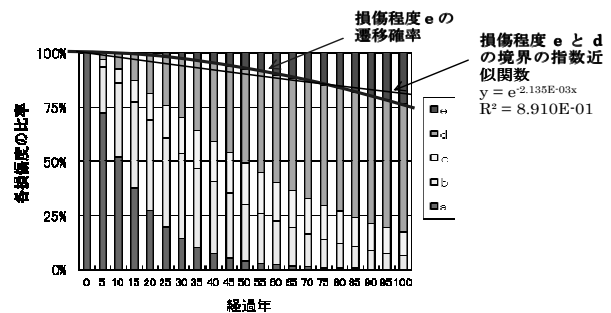


図-9 状態遷移確率分布と損傷程度eの遷移確率 (鋼桁橋\_主桁\_A・B塗装\_外桁)

傾向には極めて大きなばらつきがあり、少なくともミクロレベル(個々の橋に対して)で精度の高い予測を行うことは困難であることもわかってきている<sup>27)28)</sup>。これは、設計基準に従って、比較的画一的な仕様や構造のものが作られてきた道路橋であっても、実際の架橋環境に大きなばらつきがあることや施工品質のばらつきによって完成時点での潜在的な性能の相違が無視できないことなども影響していることが考えられる。さらに近年では、技術基準の性能規定化を背景に、新しい構造や従来の仕様によらない設計の提案も多くなされる。劣化予測の観点から見ると、これらの独自性の強い構造形式や設計思想、設計手法による橋梁の場合には、同種・類似の特性を有する母集団が少なくなり、マクロ的な劣化予測すら高い信頼性を確保することは困難となることが予想される。

さらに、複雑かつ大規模な構造体である

道路橋では、定量的に設計で照査される断面性能など以外に、主として過去の知見に基づく様々な定型の構造細目が用いられており、例えば、桁端部や支承周りで、狭隘で滞水しやすく劣悪な腐食環境が形成されやすいなど耐久性の面では改善余地があるものも見られる。しかし、経験的に確立してきた構造細目では、それにどのような性能が関わっているのかが不明確で見直しが難しいことや、耐荷力的には照査が省略できるメリットもあり、見直されないままに踏襲されてきているものも多い。

経年的な影響も考慮した将来にわたるリダンダンシーの評価をはじめ、道路橋の維持管理や合理化を図るために、統計的な予測手法を活用するためには、道路橋の耐久性の信頼性の確保とともに、耐久性に課題のある構造細目の排除も重要な課題である。

## 5. まとめ(課題と展望)

以上、道路橋におけるリダンダンシーの捉え方について、既往の被災事例を参考に考察を試みた。また、これらを踏まえて、リダンダンシー評価の信頼性向上策の確立を念頭に、構造解析モデルのモデル化レベルがリダンダンシー評価結果に及ぼす影響、実構造物の品質や特性のばらつきが供用中リスクの評価に及ぼす影響についていくつかの試算を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- ・道路橋に求めるリダンダンシーは、道路橋が果たす役割である道路機能のリダンダンシー確保のための手段の一つとして位置づけ、部材レベルから道路ネットワークレベルまで様々なレベルで取り得る対策メニューを適切に組み合わせて実施することで、効果的かつ経済的に確保できる可能性がある
- ・過去の被災事例からは、具体的にリダンダンシーが問題となる部材の破壊などのリスク事象を全て想定しなくとも、抵抗側である構造に対して物理的に起こりうる障害を適切に想定することで、リスク低減に繋がる多くの配慮が行いうる。これは、東日本大震災後に行われた東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)の報告書<sup>29)</sup>にも紹介されているシビアアクシデント対策としての深層防護の考え方にも共通するところがあり、具体的な設計状況を想定する通常の耐荷力設計や耐久性の設計とは別に、想定外の事象の発生も考慮したリダンダンシーに関わるリスク低減策の検討を行うことで効果的かつ経済的にリダンダンシーの確保レベルの向上が図れるものと考えられる。(図-12, 13)

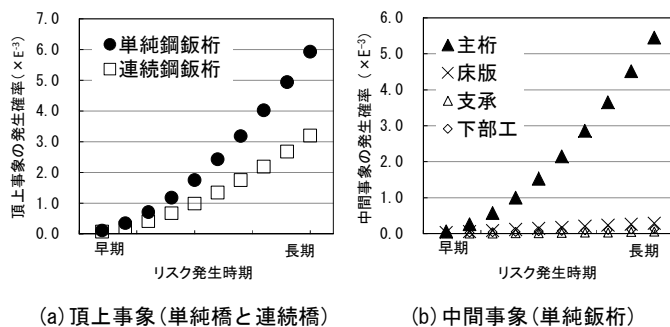


図-10 事象発生確率の比較

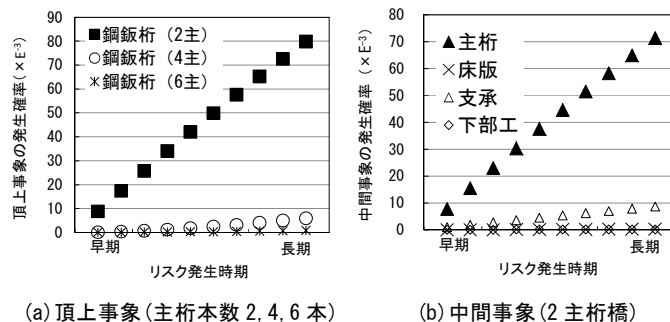


図-11 事象発生確率の比較

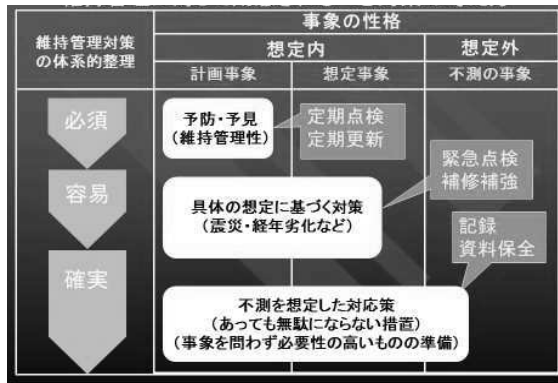


図-12 道路橋の維持管理における対策の体系的整理

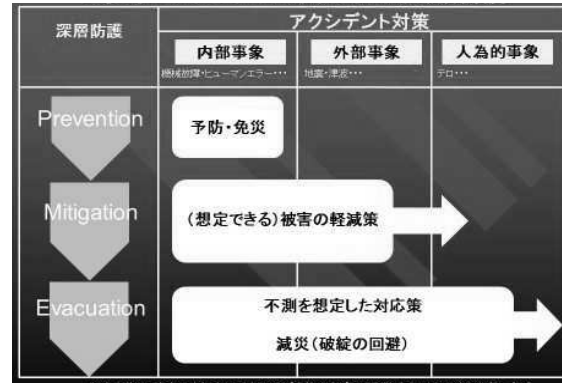


図-13 シビアアクシデント対策における深層防護

文献 29) を参考に筆者が作成

- ・リダンダンシーの確保の必要性が、実際に橋が設計供用期間中に遭遇するどのような状況を具体的に想定したものであるのか、仮に実際に発生しうる状況と考える場合にも、それらが現在の知見で規模や頻度を確率統計的に根拠づけることができるのかどうかといった点は、想定事象の絞り込みと並行して引き続き慎重な検討が必要と考えられる。
- ・部材の破壊や破壊に至るまでの挙動をある程度正確に推定できなければ、的確な対策の実施は困難となる場合がある。一方で、精緻な解析モデルによる場合、道路橋のインフラとして性格を考慮すると結果の精度や信頼性及び結果の判断基準について一定の要求水準を確立する必要がある、これらの要件を満足する解析手法の確立が課題である。
- ・構造システムのリダンダンシーの見積もりでは、初期品質及び経年劣化のばらつきの影響を適切に考慮しなければ、リスク事象の生じる可能性を正確に把握することはできず、安全余裕の確保や冗長性の確保など実施すべき対策の優先度や効果を見誤る可能性がある。さらにはこのような将来予測を活用したリスク低減策の実施や維持管理の合理化を実現するためには、実橋の耐久性を意図した水準に定量的に制御したり、耐久性に課題のある構造細目の排除などによる耐久性の信頼性向上が課題である。

## 参考文献

- 1) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏他: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2, pp410-425, 2009. 5
- 2) 後藤芳顕, 川西直樹, 本多一成: リダンダンシー解析における鋼トラス橋の引張り斜材破断時の衝撃係数, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp792-805, 2010. 3
- 3) 野中哲也, 宇佐美勉, 岩村真樹, 廣住敦士, 吉野廣一: 連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp779-791, 2010. 3
- 4) Transportation Research Board: Inspection and Management of Bridges with Fracture Critical Details, NCHRP Synthesis 354, 2005.
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 平成 24 年 3 月, 丸善出版, 2012
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編・II 鋼橋編 平成 24 年 3 月, 丸善出版, 2012
- 7) 内閣府: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について, 2011. 8  
<http://www.kantei.go.jp/saigai/pdf/201208281700jisin.pdf>
- 8) 国土交通省: 東日本大震災の記録—国土交通省の災害対応—, 2012. 3  
<http://www.mlit.go.jp/common/000208803.pdf>
- 9) 国土交通省東北地方整備局震災伝承館 HP, <http://infra-archive311.jp/>

- 10) 国道 342 号祭時大橋被災状況調査検討委員会(岩手県):国道 342 号祭時大橋被災状況調査検討委員会報告書, 平成 21 年 6 月
- 11) National Transportation Safety Board: Collapse of U. S. 35 Highway Bridge Point Pleasant, West Virginia, December 15, 1967, NTSB/HAR-71/01, 1971
- 12) National Transportation Safety Board: Collapse of a Section of Interstate Route 95 Highway Bridge Over the Mianus River, Greenwich, Connecticut, June 28, 1983, NTSB/HAR-84/03, 1984
- 13) Federal Highway Administration: Bridge Inspector's Reference Manual, FHWA NHI 03-002, October, 2002
- 14) 古屋和彦, 磯江浩, 帆足博明, 平野茂: 芸予地震における動態観測と来島海峡第一大橋センタースティロッド破断に対する検証, 鋼構造論文集, 第 10 巻, 第 39 号, pp.131-141, 2003.9
- 15) Report of the Commission of inquiry into the collapse of a portion of the de la Concorde overpass Oct. 3, 2006-Oct. 15, 2007, 2007
- 16) National Transportation Safety Board: Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota, August 1, 2007, NTSB/HAR-08/03, 2007
- 17) 玉越隆史, 林俊也, 木村嘉富: 吊材破断時の安全対策 - PC アーチ橋の事例 -, 土木技術資料, vol. 52-7, 2010
- 18) 玉越隆史: 道路橋における鋼材の損傷への対応, 検査技術, Vol. 19, pp. 1-7, 2014.
- 19) AASHTO : AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Fifth Edition, 2010
- 20) Ghosn, M., Moses, F., Frangopol, D.M.: Redundancy and robustness of highway bridge superstructures and substructures, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 6, Nos. 1-2, pp. 257-278, Feb. -Apr., 2010
- 21) Transportation Research Board : Redundancy in Highway Bridge Superstructures, NCHRP Report 406, 1998.
- 22) 木内耕治, 玉越隆史, 石尾真理: 鋼アーチ橋の疲労設計モデルに関する検討, 鋼構造論文集 第 15 巻第 59 号, pp. 1-9, 2008. 9.
- 23) 大村武馬, 下山田孝志, 江川定利, 玉越隆史: 鋼製橋脚隅角部の解析手法の一提案, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp23-32, 2005. 3.
- 24) U. S Department of Transportation Federal Highway Administration: Framework for Improving Resilience of Bridge Design, FHWA-IF-11-016, January 2011.
- 25) Keary H. LeBeau, Sara J. Wadia-Fascetti, Fault Tree Analysis of Schoharie Creek Bridge Collapse, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, July /August, 2007, pp320-326
- 26) 国土交通省道路局: 橋梁定期点検要領(案) 2004 年(平成 16 年) 3 月
- 27) 玉越隆史, 宮原史: 本格的なメンテナンス時代における道路橋の維持管理技術の方向性, 土木技術資料, Vol. 56-4, pp. 6-9, 2014. 4.
- 28) Shirato. M, Tamakoshi. T: Bridge Inspection Standards in Japan and US, 29th US-Japan Bridge Engineering Workshop Agenda, 2013  
[http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/29/29-3-1\\_Shirato.pdf](http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/29/29-3-1_Shirato.pdf)
- 29) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調): 調査委員会報告書, 2012. 6