

### 13-9 橋梁のリスク評価手法に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）  
 研究期間：平 23～平 27  
 担当チーム：橋梁構造研究グループ  
 研究担当者：七澤利明、真弓英大、飯島翔一

#### 【要旨】

我が国における道路橋の多くは高度成長期に建設され、多くの橋梁が高齢化を迎えようとしている。このように管理橋梁の高齢化が進む中、橋梁の損傷による社会的リスクは今後益々高まっていくものと推測され、厳しい財政制約の中で効率的な管理を行うための手段としてリスク評価手法の確立が求められている。

本研究は、こうした状況を踏まえ、道路橋を構成する部材の損傷リスクを相対的・定量的に評価する手法及びリスク発生による人命や社会への影響について検討を行い、これらを合わせて橋梁管理体系に組み入れるリスク評価手法について提案することを目的として実施するものである。

キーワード 道路橋、リスク、評価

#### 1. はじめに

床版の疲労、鋼部材の疲労、コンクリート部材の塩害・アルカリ骨材反応による損傷といった橋の耐荷性能に重大な影響を与える損傷事例も多数報告されている。高度経済成長期に建設された膨大な数の道路橋の多くが築後50年を経過し、老朽化が急速に進むと予測されるため、落橋等の重大事故を未然に防ぐ予防保全が重要となっている。更に、我が国の道路橋は、世界的に見ても非常に厳しいレベルの自動車交通や自然環境にさらされてきており、今後、急速に劣化損傷が増加する可能性がある。

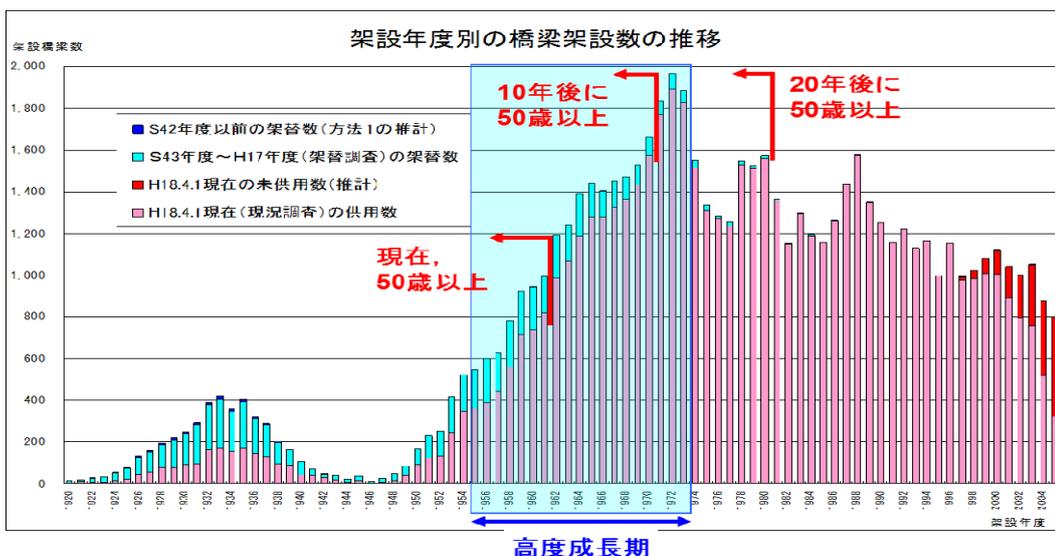
(図-1)

我が国の道路橋点検では、各部材の損傷の程度を評価

し、対策区分を判定しているが、損傷が橋へ与える影響や結果の重大性は明確には規定されていない。

橋梁は建設から50年を超えると劣化は急速に進行すると言われており、厳しい財政事情の下で、その健全性を適切に評価し、予防保全の考え方を取り入れながら戦略的に維持管理するための、点検、評価・診断、補修・補強技術の確立を急ぐ必要がある。

このため本研究では、こうした状況を踏まえ、道路橋を構成する部材の損傷リスクを相対的・定量的に評価する手法及び損傷発生による人命や社会への影響について検討を行い、これらを合わせて橋梁管理体系に組み入れるリスク評価手法について提案するものである。



出典：国土技術政策総合研究所資料第488号

図-1 道路橋の架設年度別の橋数の推移

## 2. 先進事例の収集

我が国における道路橋リスク評価の参考となる知見を得るため、先進事例である国外（英国）の道路橋リスク評価事例の収集を行った。

### 2. 1 国外（英国）の道路橋を対象としたリスク評価事例の収集

実用的な道路橋のリスク評価手法についての知見を得るために、先進事例である英国の以下の機関より聞き取り調査を実施した。

- ① 英国道路庁（Highways Agency、HA）：  
英国交通省の独立行政法人で、大臣より委任され、イングランドの幹線道路の管理を行っている機関。
- ② ロンドン市交通局（Transport for London、TfL）：  
ロンドン市における公共交通機関の大半の管理を行っている行政機関。

主な聞き取り内容は次の通りである。

- ・リスク評価の運用目的
- ・評価手法
- ・リスクの要素
- ・優先順位の区分け

対策の優先順位付けのおおまかな比較を図-2 に示す。

- ① 英国道路庁におけるリスク評価の概要
  - ・リスク評価の目的：補修・補強における要対策箇所の優先順位付け。
  - ・リスクの定義：発生確率（Likelihood）×影響の程度（Consequence）

影響の程度は、安全性・機能性・持続性・環境の4つの要素について、それぞれ劣化の重大さを導き出し、発生確率と組み合わせた結果をリスク全体レベルの評価マ

トリックス（図-3）で評価する。評価したそれぞれのリスクについて優先順位づけのマトリックス（図-4）に照らし合わせ、優先順位が最も高いリスクが主スコア（Baseline Score）、その他のリスクが補助スコア（Supplementary Score）となり、これらを足し合わせたものがトータルスコアとなる。優先順位づけのマトリックス（図-4）のうち、”H safety\*”が対策の優先順位が最も高く、緊急に措置を講じなければならないものである。

- ② ロンドン市交通局におけるリスク評価の概要
  - ・リスク評価の目的：補修・補強における要対策箇所の特定。
  - ・リスクの定義：発生確率（Likelihood）×影響の程度（Consequence）

影響の程度は、安全性・機能性・環境の3つの要素について、それぞれの劣化の重大さを導き出し、各要素について、マトリックスに基づき評価する。複数のリスクイベントがある場合には、各要素毎に最も Initial Risk Score が高くなるリスクイベントにより算出する（図-5、図-6）。このとき、重み付け（Weighting）を組合せてリスク値を算出する（図-7）。

### 2. 2 具体の損傷事例

具体の損傷事例として英国道路庁の「鉄筋の腐食」の例を以下に示す。

- ① リスクイベントの種類・発生確率・影響  
登録されている様々なリスクより選択する（表-1）。
- ② リスクの発生確率

当事象は、検査報告から錆が確認されており、原因は凍結防止剤の散布であり、今後も継続して起こりえる事象であることから、発生確率は「確実」（Certain）の評

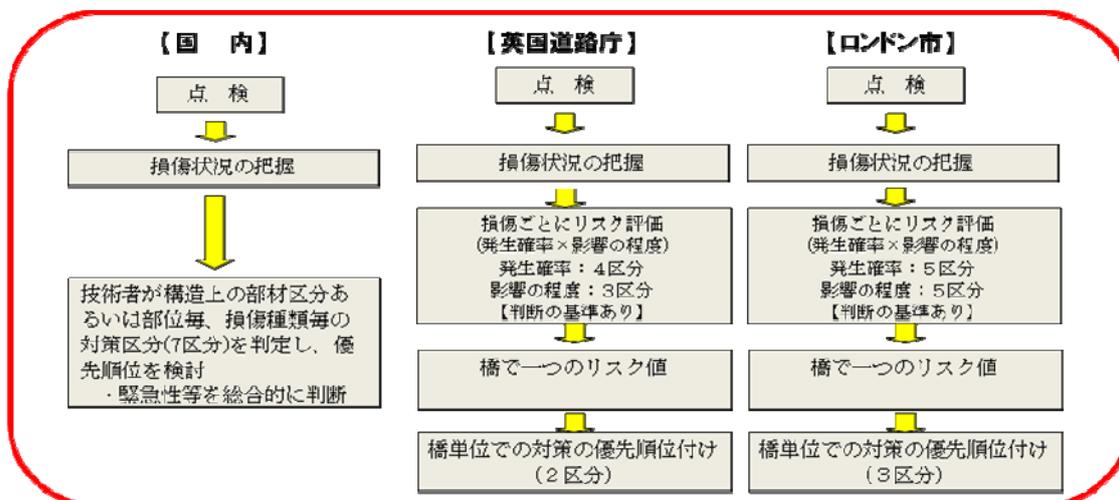


図-2 英国道路庁・ロンドン市の道路橋リスク評価フロー

価となる(表-2)。

③ 影響の重大さ

この事象における影響の重大さは、安全性、機能性については「影響なし」と評価、持続性については劣化の進行が早いことから3~4年のうちに対策を行わなくては、その後の対策に支障が生じるとの判断により、「中間」(Medium)と評価、環境については外観への悪影響の程度より、「低い」(Low)と評価となる(表-3)。

④ リスク値の決定

上記より、リスクレベルの評価対象が持続性と環境についてのみとなる。リスク全体レベルの評価マトリックス

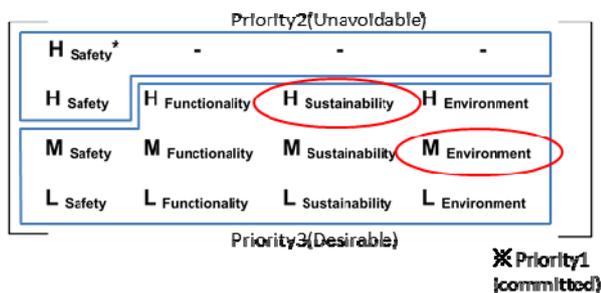


図-4 優先順位付けのマトリックス (英国道路庁)

ス(図-3)において、持続性(Sustainability)は発生確率が「確実」(Certain)と影響の重大さが「中間」(Medium)の組合せより”C Likelihood + M Consequence”となることからリスクは”High Risk”、環境(Environment)は発生確率が「確実」(Certain)と影響の重大さが「低

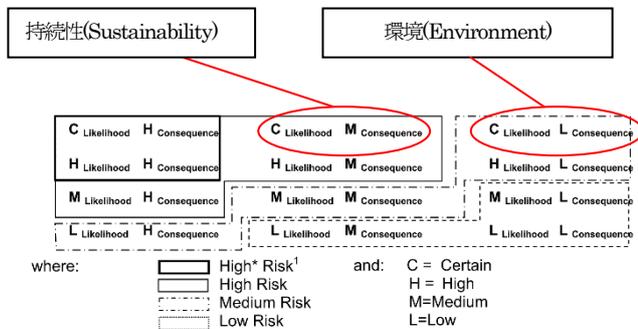


図-3 リスクの全体レベルの評価マトリックス (英国道路庁)

い」(Low)の組合せより”C Likelihood+ L Consequence”となることからリスクは”Medium Risk”となる。

⑤ 優先順位付け

優先順位付けのマトリックス(図-4)において、持続性は”High Risk”であることから優先順位は”H Sustainability”、環境は”Medium Risk”であることから優先順位は”M Environment”となり、持続性が環境よりも優先順位が高くなる。以上より、対策を行うことが望ましい”Desirable”(Priority3)に該当することとなる。

Consequence	V High	40	60	80	100	100
	High	40	40	60	80	100
	Medium	20	40	40	60	80
	Low	20	20	40	40	60
	V Low	0	20	20	40	40
		V Low	Low	Medium	High	V High
		Likelihood				

図-5 リスクレーティングマトリックス

Criteria	Weighting	Initial Risk Score	Weighted Risk Score
Safety	0.50	100	50
Functionality	0.35	60	21
Environment	0.15	60	9
Risk Rating Benchmark			80

図-7 優先順位付けのマトリックス (ロンドン市交通局)

優先度分類	リスク基準値	摘要
Red	80 以上	安全性および使用性の大きなリスクがあることを示し、一時的および/もしくは恒久的対策が実施されなければならない。
Yellow	80 未満 40 以上	使用性の大きなリスクがあることを示し、使用性のレベルおよび/もしくは耐久性を保つために工事が必要である。事業期間内にリスク低減策が実施されなければならない。
Green	40 未満	3/5 年間に於いて対策は必要でない、しかし、より長期間でみると耐久性への潜在的影響がある。また、長期間でみると、安全性および使用性が損なわれる可能性がある。スキームは、事業期間内に収まらなくてよい。

表-1 リスクの種類

表 B.3 登録されているリスク

リスクイベント	発生確率	影響
被膜塗装の失敗	表 B.5 参照	表 B.32 参照
鉄筋の腐食	表 B.6a 参照	表 B.33 参照
鋼部材の腐食	表 B.6b 参照	
アルカリシリカ反応	表 B.7 参照	
トーマス石の表面接触	表 B.8 参照	
⋮	⋮	⋮

表-2 リスクの発生確率

表 B.6a 腐食の起きやすさ (補強箇所の腐食)

起きやすさ	例
確実 (Certain)	表面の腐食が明確。
高い (High)	腐食の危険性が高いエリア：厳しい暴露環境にあるエリア
中間 (Medium)	腐食の危険性が中間エリア：保護された暴露環境にあるエリア
低い (Low)	腐食の危険性が低いエリア：保護された暴露環境にあるエリア

表-3 影響の大きさ

表 B.33 劣化の重大さ

タイプ	重大さ	例
安全性 Safety	高い (High)	旅客鉄道の上にある橋が落橋する。
	中間 (Medium)	貨物鉄道の上にある橋が落橋する。
	低い (Low)	壊れた橋台や橋脚が歩道等から十分な隔離がある。
機能性 Functionality	高い (High)	戦略的ルートの閉鎖 (落橋を防ぐため)
	中間 (Medium)	地域ルートの閉鎖 (落橋を防ぐため) 戦略ルートの規制 (落橋を防ぐため)
	低い (Low)	地域ルートの規制 (落橋を防ぐため) 地方ルートの閉鎖 (落橋を防ぐため)
持続性 Sustainability	高い (High)	なし
	中間 (Medium)	劣化範囲が拡大し、3・4年以内に安全上の問題が生じる。 補修の範囲や期間が非常に拡大している
	低い (Low)	劣化範囲が拡大し、3・4年以内に対応は必要ないが、補修の範囲や期間が拡大している
環境 Environment	高い (High)	なし
	中間 (Medium)	外観の悪影響 (限定的部材) 落下したコンクリートが管理区域に損傷を与える
	低い (Low)	外観の悪影響 (限定的部材以外)

表-4 分析した損傷

部材	損傷	原因
鈹桁	亀裂	疲労
鋼床版	亀裂	疲労
RC床版	ひびわれ	疲労
上部工 (RC+PC)	ひびわれ、鉄筋露出	塩害
下部工 (RC)	ひびわれ、鉄筋露出	塩害
下部工 (RC)	ひびわれ、鉄筋露出	ASR
ポステンPCT桁	ひびわれ、鉄筋露出	グラウト不良

表-5 鈹桁のたわみ許容値の変遷

技術基準の年代			たわみの許容値 (m) *
1	1955 以前	S14 鋼道示	死荷重および等分布荷重に 対し L/600
2	1956-1963	S31 鋼道示	活荷重に対し L/600
3	1964-1971	S39 鋼道示	活荷重に対し L/500
4	1972-1993	S47 道示	活荷重に対し L/(20, 000/L)
5	1994 以降	H6 道示	同 上

\* L : 支間長 (m)、年代 4 は 10<L≤40

年代 4 と 5 は活荷重が異なる

### 3. 橋梁点検データの分析

#### 3. 1 高リスク部材の抽出と分析

損傷発生頻度が高い部材について、8つの地方整備局が管理する約21,000橋の道路橋の定期点検データのマクロ分析を行い、高リスク部材の抽出を行った。

##### 3. 1. 1 分析の手法

道路橋の点検データに基づく部材の損傷発生頻度のマクロ分析事例について、橋梁定期点検要領<sup>1)</sup> (以下、「点検要領」) に基づいて実施された点検のデータ、および橋梁管理カルテデータ (設計基準、補修履歴など) を用いた分析を行った。

点検要領では、26種類の損傷に着目して、損傷の程度、対策区分が判定される。本検討では、鋼部材の亀裂、コンクリートのひびわれなど橋全体系の安全性に重大な影響を及ぼす可能性の高い主要な損傷 (表-4) を対象に分析を行った。また、高リスク部材の抽出だけでなく、その部材と「道路橋示方書・同解説」 (以下、「道示」) をはじめとする技術基準の変遷、施工年代などとの関連性についても分析を行った。

##### 3. 1. 2 分析結果

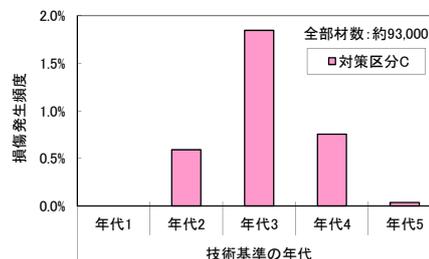


図-8 鈹桁の疲労亀裂発生頻度

技術基準の変遷、施工年代との関連性があると考えられる高リスク部材の例を以下に示す。損傷発生頻度は、対策区分C「速やかに補修等を行う必要がある」の部材数を対象全部材数で割った値 (%) とした。

##### ① 鈹桁の疲労亀裂 :

たわみの許容値に着目した技術基準の変遷を表-5に示す。この変遷と損傷発生頻度の関係を図-8に示す。損傷発生頻度は、年代3は年代2 (0.6%) の約3倍の1.8%となり、年代4になると0.8%に減少する。たわみの許容値が大きい年代3 (1964-1971) の設計基準の部材が高リスクであることが分かる。

##### ② RC床版のひびわれ :

RC床版については、既にひびわれの補修が行われた橋梁が多い。補修履歴のある橋梁において、どの部材 (径

間)が補修されたかは不明である。ここでは、全部材について補修が行われたと仮定した。最小全厚等の仕様に着目した技術基準の変遷を表-6に示す。この変遷と損傷発生頻度の関係を図-9に示す。年代2および年代3では、部材数の30%以上が補修されている。補修未実施橋梁について、損傷発生頻度は、年代3は年代2(1.6%)の約2倍の3.3%となり、年代4になると1.9%に減少する。年代3は、年代2に比べて補修済み部材割合は減少しているが、損傷発生頻度が増加している。桁のたわみの許容値が緩和されたこと(前述)、および鉄筋の許容応力度が大きくなったことが要因として考えられる。年代1から4(1977年以前)の設計基準の部材が高リスク部材であることが分かる。

大型車交通量と損傷発生(対策区分C)の関係を図-10に示す。大型車交通量が大きくなるほど損傷が増加するという関係には明確になっていないことが分かる。

表-6 RC床版の最小全厚等仕様の変遷

技術基準の年代			最小全厚等仕様*
1	1955以前	S14 鋼道示	許容応力度 130N/mm <sup>2</sup>
2	1956-1963	S31 鋼道示	配力筋25%、最小全厚14cm
3	1964-1967	S39 鋼道示	許容応力度 140N/mm <sup>2</sup>
4	1968-1977	S43 鋼道路橋床版設計暫定基準	配力筋70%、最小全厚16cm
5	1978以降	S53 道路橋 RC床版設計施工指針	許容応力度に対し20N/mm <sup>2</sup> 程度の余裕を持たせる

\* 許容応力度は鉄筋、配力筋量は主鉄筋量に対する割合

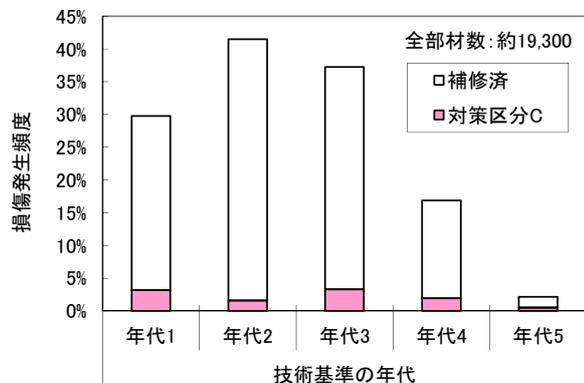


図-9 RC床版のひびわれ発生頻度

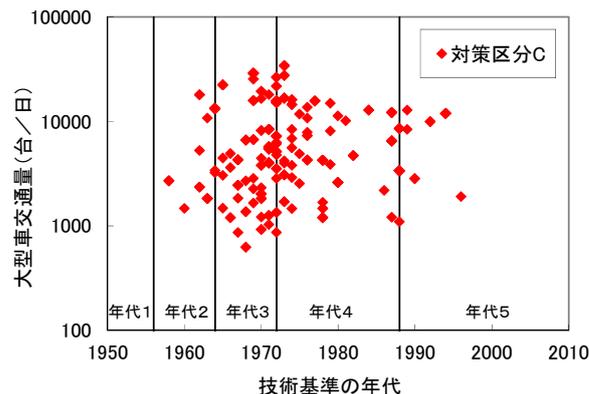


図-10 大型車交通量とRC床版のひびわれ発生

③ コンクリート上部工の塩害:

コンクリートの塩害に関する技術基準の年代は、「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」(日本道路協会、昭和59年)が出版される前の年代1と以降の年代2に分ける。コンクリート(RCおよびPC)の上部構造について、原因が塩害とされるひびわれ、もしくは剥離・鉄筋露出を分析対象の損傷とした。損傷発生頻度と架設年(5年単位)の関係を図-11に示す。1970-1974の損傷発生頻度が最も大きく1.3%であり、次が1965-1969の0.7%である。1975-1979では0.4%に減少する。年代1の中でこのような傾向を示している要因として、1960-1974は高度経済成長期で架設数がピークであり、熟練工が不足したこと、また、1965頃よりポンプ圧送が普及し、単位水量の多い低品質のコンクリートが使われることが多かったことが考えられる。年代2の初期の1985-1989は、損傷発生頻度は0.2%である。1965-1974に架設された部材が高リスク部材であることが分かる。

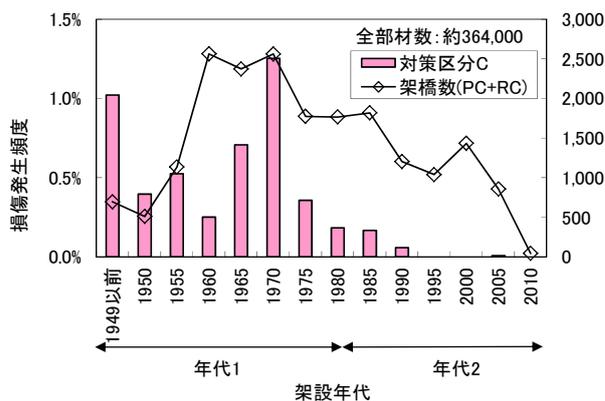


図-11 上部工の塩害発生頻度

3. 2 リスクの細分化

橋梁定期点検結果から、橋梁に発生する損傷の傾向を分析し、リスクを細分化した。ここでの重大損傷とは、

速やかに補修をする必要のある損傷や、地域の交通に影響を及ぼす損傷のことである。

### 3. 2. 1 分析対象

使用したデータと対象とした橋梁数は次のとおりである。

- ①橋梁定期点検要領(案)<sup>1)</sup>(以下、点検要領)に基づいて実施された点検データ、及び橋梁管理カルテデータのうち、点検結果が対策区分Eと判定された橋梁 28 橋
- ②土木研究所で実施された過去の橋梁に関する技術相談のうち、重大損傷と判断される 13 橋
- ③国土交通省 HP<sup>2)</sup>に公開されている損傷事例のうち 17 橋

### 3. 2. 2 損傷の種類と原因の分析

点検要領に基づいて実施された点検データから、対策区分 E と判定された部材の損傷の種類を整理した(図-12)。損傷の種類は、変形・欠損、亀裂、腐食が特に多く、その損傷原因を図-13 に示す。検査結果の原因(確定・推定)をとりまとめた結果、変形・欠損の原因は、防水が70%を占め、次いで材料の劣化が約20%となっている。亀裂の原因は、疲労が約40%を占め、防水・排水工の不良が約15%となっている。腐食の原因は、防水・排水工の不良が約85%、材料劣化が約15%となっている。このことから、防水・排水工不良は、橋梁の損傷(変形・欠損、腐食)に大きな影響を及ぼしていること、疲労は亀裂を引き起こす原因となっていることがわかる。

本検討では、変形・欠損、亀裂、腐食を、損傷が生じた場合の地域の交通に及ぼす影響が大きい重大損傷とし、

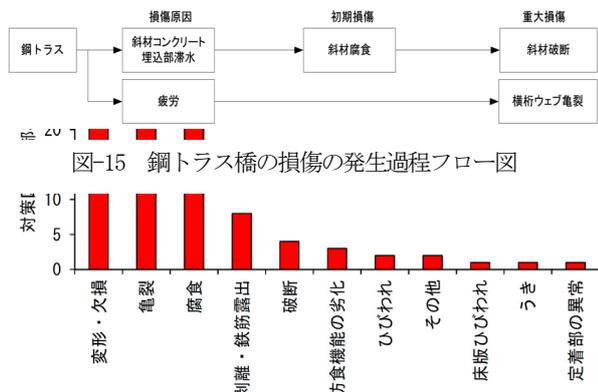


図-12 対策区分Eの損傷箇所

以降の分析を行った。

### 3. 2. 3 損傷の発生過程

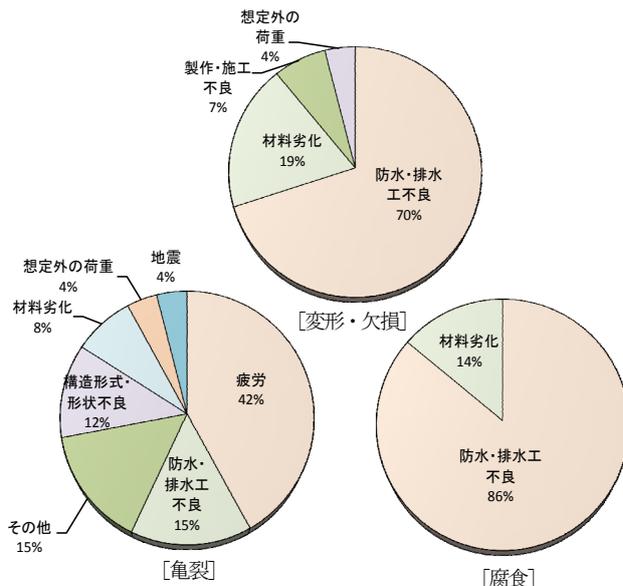


図-13 変形・欠損、亀裂及び腐食の損傷原因

重大損傷に至る損傷進行過程を整理した。

点検要領に基づいた点検調査に記載の所見を分析した結果、12 パターンに分類された。また、土木研究所が所有する過去の技術相談に関する資料の分析を行った結果、15 パターンに分類された。さらに、国土交通省 HP に掲載されているデータについて分析を行った結果、11 パターンに分類された。これらの分析結果を鋼 I 桁橋・鋼箱桁橋、鋼トラス橋、鋼アーチ橋、PCT 桁橋の 4 つの構造形式毎に整理した。

鋼 I 桁橋・鋼箱桁橋の場合は、大別して 2 パターンに分類された。一方は疲労等を原因として溶接部に亀裂が発生し、溶接部から母材に亀裂が進展する過程であり、他方は漏水等を原因として桁端部、支承部に腐食が発生し、断面欠損による応力集中や支承機能の喪失により主

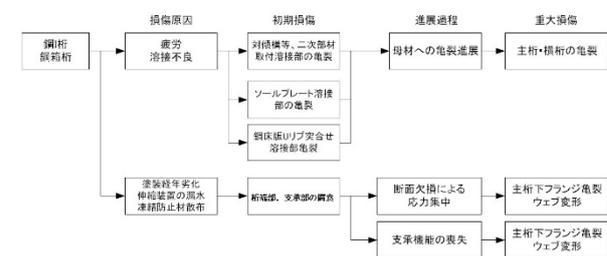


図-14 鋼 I 桁橋及び鋼箱桁橋の損傷の発生過程フロー図

桁に亀裂が発生する過程である(図-14)。

鋼トラス橋の場合も、損傷過程は 2 パターンに分類された。一方は斜材コンクリート埋め込み部の滞水から斜材の破断に進展する過程であり、他方は疲労により亀裂

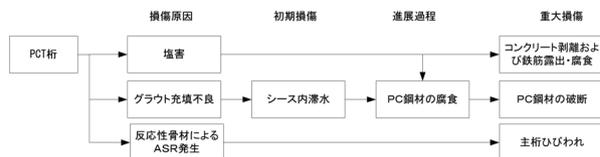


図-17 PC T 桁橋の損傷の発生過程フロー図

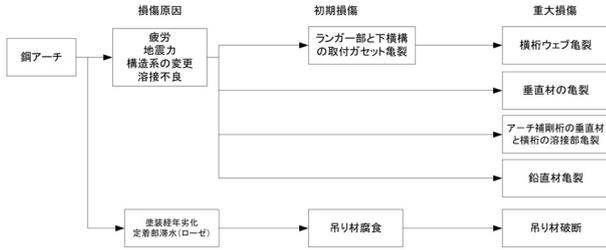


図-16 鋼アーチ橋の損傷の発生過程フロー図

が発生、進展する過程である（図-15）。

鋼アーチ橋の場合も、大別して2パターンに分類された。ひとつは疲労や地震等により亀裂が発生する過程であり、他方は塗装の劣化や滞水によって吊り材が腐食し破断する過程である（図-16）。

PCT桁の場合は、3パターンに分類された。塩害によりコンクリートの剥離及び鉄筋の露出・腐食する過程、グラウトの充填不良によりPC鋼材が腐食し破断する過程、及びASRの発生により主桁にひび割れが発生する過程である（図-17）。

### 3.3 洗掘に着目した 損傷事例の分析

近年(H19~H24)における我が国の橋梁被災要因の約6割が豪雨や台風による洪水となっている（表-7）。これを踏まえ、過去の洗掘による損傷事例及び洗掘の点検結果の分析を行い、部材の損傷リスク評価の一つとして、洗掘に着目したリスク評価の検討を行った。

#### 3.3.1 平成10年8月豪雨による洗掘事例

平成10年8月末の豪雨による福島県・栃木県豪雨災害の現地調査で得られたデータを元に、洗掘による橋梁の洗掘被害事例をとりまとめた（表-8）。この豪雨では5日間で累積雨量1,200mm、時間最大雨量90mmが記録され、那珂川及び阿武隈川流域で河川堤防の破堤、道路橋の桁流出、斜面崩壊等甚大な被害があった。

この被害の内容を個別に分析すると、大きく収縮洗掘と局所洗掘に分けられた。

収縮洗掘は、川幅縮小に伴って、掃流力が増加することから生じる洗掘である。今回の事例では氾濫原を含む

表-8 H10.8豪雨災害における洗掘被害事例

## 13-9 橋梁のリスク評価手法に関する研究

や橋梁取付盛土などによって河道が狭窄され、洪水流の極端な収縮によって河床が洗掘されている例が見うけられた。この洗掘は、架橋地点のみならず、周辺の地形や土地利用、堤防などに影響される。

局所洗掘は、橋脚などの河川内構造物の周りの縮流、乱れなどに起因する構造物近傍のごく限られた範囲に生じる洗掘である。今回の事例では水衝部にある橋台が基礎や背面盛土の洗掘によって流出・傾斜したほか、流木による河積阻害により橋台や桁の流出が発生している。なお、通常、我々が橋脚の洗掘と言えば、この局所洗掘であり、流水深、流速、河床材料、構造物の形式・寸法、洪水流と構造物の迎角などによって変化する。

#### (1) A橋：収縮洗掘

A橋では、左岸側の橋台がその背後の台地とともに流出し、それが支持する桁が1径間流出している。ここでは、架橋周辺で台地が河道に突き出ており、洪水流の収縮によって、橋梁部だけでなく、突き出た台地が道路やガソリンスタンドごと流失する結果となった。また、流木が大量に集積した記録が残っており、完全に河道を閉塞する状況となっていた。そのため、流木により河道を塞がれた洪水流は、平地の流出部を新たな流路として流下し、橋梁から下流の河道は死水域となっていた。このように河道が流木によって閉塞されたことが、流れを大きく堰上げた主要因となり、橋の上下流で1m強の水位差がある越水が生じ、その結果、橋台や背面台地の洗掘・消失につながったものと思われる。

#### (2) B橋：収縮洗掘

B橋では、右岸側の橋台が取付道路とともに流出し、それが支持する1径間も流出している。残された橋脚や左岸側の橋台に損傷は確認されていない。右岸側は取付道路が10mに渡って流出し、流出を免れた道路上には洪水流の流下跡が残っている。B橋の被災は、本橋の上

表-9 特別点検の点検結果一覧

河道部が元の地形	基礎地盤	河道条件	橋台		橋脚		損傷評価	状況	点検評価
			洗掘	あり	洗掘	あり			
T橋	砂礫		あり				c	A1・A2橋台で洗掘、橋台下面の一部が露出	維持・補修
U橋	砂礫		あり					A1・A2橋台で洗掘、A2橋台ではフーチング下面の一部が露出	維持・補修
変状	V橋	不平等	西水衝部	なし	あり		誘因	P6橋脚周辺で洗掘、橋脚底板の一部が露出	調査・観察
A橋	橋台・桁流出、橋台背面盛土流出	洗掘	流木による河積阻害					地形・橋梁取水部周辺で洗掘、フーチング全面露出	緊急対応
B橋	橋台・桁の流出	収縮洗掘	土流で越流した洪水流の流入					橋梁取付盛土による河道狭窄	全面通行止め
C橋	橋台の傾斜、桁・背面盛土の流出	X橋	少砂礫		あり			流下能力を上げる洪水	橋脚周囲のフーチング下面露出
D橋	橋台の沈下、桁の流出	Y橋	洗掘不明	土流で越流した洪水流	流あり			河床隆起周辺で洗掘、フーチング全面露出	
E橋	桁・背面盛							橋梁取水部周辺で洗掘、A1橋台全面通行止め	下面が露出
F橋	橋台の沈							水衝部	全面通行止めの面が露出
G橋	橋脚の沈下	傾斜	豪雨					架橋位置が水衝部	道路閉鎖中
H橋	橋脚の沈下	傾斜	0	6				A1橋脚周辺で洗掘、A2橋台全面通行止めの面が露出	維持・補修
I橋	橋脚の沈下	H20	0	3				A1橋脚周辺で洗掘、A2橋台全面通行止めの面が露出	維持・補修
J橋	橋台背面盛土の流出	0	2					流木による河積阻害	全面通行止め
K橋	橋台背面盛土の流出	0	93					土流で越流した洪水流の流入	全面通行止め
L橋	橋台背面盛土の流出	0	42					流木による河積阻害	全面通行止め
M橋	橋台背面盛土の流出	0	42					流木による河積阻害	全面通行止め
N橋	前面護岸の洗掘	1	125					橋台護岸の不十分	全面通行止め
O橋	背面盛土の流出	1	386					橋台護岸の不十分	全面通行止め

表-7 橋梁の被災要因 (H19~H24)

流部の右岸側で氾濫原に越流した洪水流が、本橋及び取付道路上を流下して、本橋の下流側で河川に流入。その際に越流・落下した水の勢いによって洗掘が進み、取付道路や橋台ごと流出したものと思われる。

(3) E橋：収縮洗掘

E橋では、5径間のうち3径間にわたって桁が流出し、また左岸側の取付道路が150mにわたって流出している。E橋の被災は、谷底地形全体にわたって洪水が流下、谷底地形を横切っていた橋梁及び取付道路が流出したものである。また、橋梁には多くの流木が堆積して残されており、洪水時には流木によって河道閉塞も相当進んだものと思われる。

(4) F橋：局所洗掘

F橋では、左岸側橋台が下流側に沈下、傾斜するとともに橋台背面から下流側の河岸が流出している。橋台は下流側で1.2m沈下し、その影響で桁が下流側に40cm程度移動し、そのねじれによって上流側の桁2本にせん断き裂が生じていた。F橋は、河川が右に大きく湾曲している区間にあり、出水時には沈下傾斜した左岸側橋台前面が水衝部となっていた。このため、橋台下流部で洗掘が生じて河岸が流出、下流側からの吸い出しによって橋台背面及び基礎底面の土砂が流出し、橋台の下流側が沈下し、傾斜したと思われる。

3. 3. 2 洗掘に係る点検調査結果の分析

洗掘に主眼をおいた点検事例として、平成19年度に行われた「橋梁基礎の洗掘に係る点検」(以下、特別点検と記す。表-9)がある。この特別点検は、平成9年の台風9号による、橋脚基礎の洗掘に起因すると考えられる橋脚の沈下及び水平移動、上部構造の落橋という事態を受けて実施されたものである。

特別点検の点検対象橋梁は以下のとおりである。

- ・基礎形式が直接基礎であり、支持地盤が砂または砂礫である橋梁
- ・過去の橋梁定期点検で、洗掘に対する損傷の評価が“c”または“e”と評価された橋梁
- ・過去の道路災害経験箇所の調査において、洗掘に対する安定度が“対策又は防災カルテ作成の必要あり”と判断された橋梁

この点検結果から見てくる洗掘による損傷状況は、特に水衝部において顕著であることがわかった。104橋のうち、水衝部に位置する橋台もしくは橋脚があった11橋については、全て重度もしくは中程度の洗掘が確認され、そのうち4橋で重度の洗掘が確認されている。また、上流部においては、低水量時の流路が橋台もしくは

は橋脚に近接している場合は、洗掘が確認される事例が多く、9橋でフーチングの重度もしくは中程度の洗掘が確認されている。このように、水衝部や低水時の流路が橋台・橋脚に近接している箇所は、洗掘の被害に至る可能性が高いことがわかった。

4. 橋梁の損傷による社会的影響と損失額の算定

橋梁の損傷により実際に通行規制を実施した橋梁を参考にした社会的損失の試算と、社会的影響を定量的に算出する手法の検討を行った。

4. 1 橋梁の損傷により通行止めとなった箇所の社会的損失の算出

損傷により実際に通行規制が行われた橋梁の中から、鋼トラス橋の主構部材の破断、PC鋼材の腐食・破断などによる重大な損傷が発生した橋梁のなかより、条件の異なる2橋(都市部・交通量大、中山間部・交通量小)について、「費用便益分析マニュアル」(国土交通省道路局,平成20年)等を活用し、社会的損失(走行時間、走行経費および交通事故の増加)を算出した。今回の社会的損失は、規制前に橋梁を通過していた交通量が迂回することによる上記3つの便益項目の減少量として評価する。

①A橋(損傷:鋼トラス橋主構部材の破断)



図-19 A橋通行止め等の迂回路

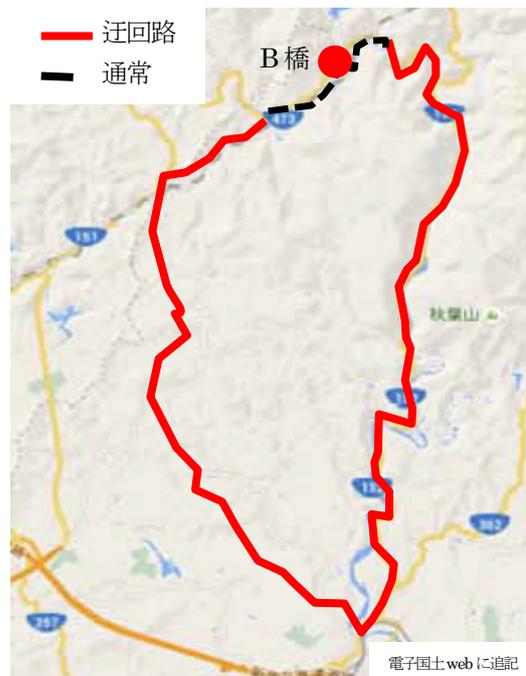


図-20 B橋通行止め時の迂回路

地域：都市部、交通量：約 30,300 台/日、  
 通行規制：1 車線規制期間 67 日、通行止め期間 210 日  
 迂回路：2.5km 経路増（有料道路含む）

社会的損失：約 13 億円

②B 橋（損傷：吊り橋 PC ケーブルの破断）

地域：中山間部、交通量：約 2,200 台/日、

通行規制：通行止め期間 62 日、8t 車規制

迂回路：68km 経路増

社会的損失：約 11 億円（通行止め時）

+151 億円（8t 車規制が 10 年継続と仮定）

今回の事例より、社会的損失は交通量、迂回距離の影響  
 が大きいことが分かる。特に迂回路が極端に少ない中山  
 間地域では、迂回距離が大きくなること、長期にわたる  
 規制が続くことで、社会的損失が非常に大きくなること  
 がわかった。

#### 4. 2 社会的影響の算定方法の検討

橋梁が損傷を受け、通行止めや交通規制が行われた場  
 合、迂回路を設置することによる地域への影響や、交通  
 事故の増加など地域への影響（社会的影響）が発生する。  
 このため、橋梁の損傷が生じた場合の交通規制に伴う地  
 域への影響を定量的に評価する方法を検討した。道路事  
 業を定量的に評価する方法として「費用便益分析マニユ  
 アル」<sup>3)</sup>（国土交通省道路局、平成 20 年 11 月）（以下、  
 分析マニュアル）がある。本検討では分析マニュアルを  
 参考に、「走行時間増加損失」、「走行経費増加損失」、  
 「交通事故増加損失」の 3 項目について評価方法を検討  
 した。

##### 4. 2. 1 走行時間増加損失

通行止め等により走行条件が悪化することによる増加  
 する走行経費のうち、走行時間を対象とした損失。

・走行時間損失  $LT = N \times \alpha \times Q_2 \times T$

N：規制日数

$\alpha$ ：時間価値原単位（円/分・台）（表-10）

$Q_2$ ：迂回交通量（台/日）

T：迂回による走行時間増分（分）

##### 4. 2. 2 走行経費増加損失

通行止め等により走行条件が悪化することによる増加  
 する走行経費のうち、走行時間に含まれない項目を対象  
 とした損失。

・走行経費増加損失  $LR = N \times Q_2 \times (\beta_2 \times \beta_2 \beta_1 \times \beta_1)$

N：規制日数

$\beta_i$ ：走行経費原単位（円/台）

$Q_2$ ：迂回交通量（台/日）

$L_i$ ：走行経路（i=1：規制前 i=2：迂回）

#### 4. 2. 3 交通事故増加損失

通行止め等により発生する交通事故による社会的損  
 失。

・交通事故増加損失  $LA = N / 365N(AA_{2i} - AA_{1i})$

N：規制日数

$AA_{1i}$ ：リンク 1 における交通事故損失額（i=1：規  
 制前 i=2：迂回）（表-11）

#### 4. 2. 4 規制日数

4. 2. 1、4. 2. 2、4. 2. 3 に示した損失を算出するためには、  
 規制日数(N)が必要となる。規制日数は、損傷の場所や規  
 模、橋梁の規模、施行のし易さ等、様々な条件により異  
 なる。このため、過去に通行止めとなった事例を収集し、  
 規制日数を想定する事とした。本検討では、経年劣化に  
 よる損傷で通行止めになった橋梁 5 例と災害により通行  
 止めとなった橋梁の 6 例の計 11 例を参考に、規制日数を  
 設定することとした。なお、交通量が少なく、比較的短  
 い迂回路を確保出来た橋梁 1 橋を除いて、仮復旧により  
 通行を再開している。11 事例をもとに設定した規制日数  
 の例を表-12 に示す。

以上の 3 項目に関する損失を足しあわせて、橋梁の損  
 傷による社会的影響とした。

表-10 車種別の時間価値原単位<sup>3)</sup>

車種(j)	時間価値原単位
乗用車	40.10
バス	374.27
乗用車類	45.78
小型貨物車	47.91
普通貨物車	64.18

注：平成 20 年価格

表-11 交通事故損失額<sup>3)</sup>

道路・沿道区分		交通事故損失算定式	
一般道路	D I D	2 車線	$AA_{ij} = 2150 \times X_{ij} + 530 \times X_{2i}$
		4 車線以上	中央帯無
	中央帯有		$AA_{ij} = 1700 \times X_{ij} + 530 \times X_{2i}$
	その他市街地	2 車線	$AA_{ij} = 1670 \times X_{ij} + 550 \times X_{2i}$
		4 車線以上	中央帯無
	中央帯有		$AA_{ij} = 1140 \times X_{ij} + 500 \times X_{2i}$
非市街部	2 車線	$AA_{ij} = 1330 \times X_{ij} + 660 \times X_{2i}$	
	4 車線以上	中央帯無	$AA_{ij} = 1100 \times X_{ij} + 570 \times X_{2i}$
中央帯有		$AA_{ij} = 950 \times X_{ij} + 570 \times X_{2i}$	
高速道路		$AA_{ij} = 360 \times X_{ij}$	

$X_{1ij} = Q_{ij} \times L_i$ ：整備 i の場合のリンク l における走行台キロ（千台 km/日）  
 $X_{2ij} = Q_{ij} \times Z_i$ ：整備 i の場合のリンク l における走行台箇所（千台箇所/日）  
 $Q_{ij}$ ：整備 i の場合のリンク l における交通量（千台/日）  
 $L_i$ ：リンク l の延長（km）  
 $Z_i$ ：リンク l の主要交差点数（箇所）

表-12 規制日数の設定（例）

損傷種別	橋梁種別	規制日数
数が少ない亀裂・破断	・鋼橋	2 日
その他	・小規模橋（橋長 30m 程度）	15 日
	・一般的橋梁	60 日
	・施工が困難な小規模橋（跨線橋等） ・施工が困難な橋梁（深い谷等）	150 日

の傾向が確認された。

### 5. 社会的影響を及ぼした事例の傾向分析

#### 5.1 損傷要因の分析

既設橋の重大損傷事例（直轄管理橋梁の定期点検結果がE判定とされた事例等）から通行規制が確認された橋梁を抽出し、橋梁の損傷として多く報告されている損傷

表-13 分析対象橋梁一覧

橋梁	橋種	架設年	損傷形態
A橋	鋼鈹桁	1972	床版ひびわれ
B橋	鋼鈹桁	1965	洗掘
C橋	鋼鈹桁	1932	洗掘
D橋	鋼トラス	1969	鋼材腐食
E橋	鋼トラス	1966	鋼材破断
F橋	鋼鈹桁	1971	亀裂
G橋	鋼トラス	1991	亀裂
H橋	鋼鈹桁	1981	鋼材腐食
I橋	鋼鈹桁	1933	鋼材腐食
J橋	RCT桁	1935	床版抜け落ち
K橋	RCT桁	1953	洗掘
L橋	RCT桁	1955	主桁ひびわれ
M橋	RCT桁	1932	剥離・鉄筋露出
N橋	PC箱桁	1975	剥離・鉄筋露出
O橋	RCT桁	1927	剥離・鉄筋露出

形態を中心に15橋抽出し、分析対象橋梁とした(表-13)。ここでいう通行規制とは、橋梁に生じた損傷により管理者が応急的・緊急的に規制を実施したものを指し、定期復旧工事等による規制は含んでいない。本報告では、15橋を対象に行った代表的な分析結果について示す。

損傷リスク判定の精度向上につなげるべく、実際に通行規制を実施した橋梁の損傷要因の分析を試みた。図-21に対象橋梁の大型車交通量(12h)と架設年の関係を橋種別(鋼橋・コンクリート橋)にプロットしたものを示す(大型車交通量不明の橋梁は除外)。大型車交通量がそれほど多くなくても通行規制を伴う損傷は発生しており、交通量と通行規制の間に明確な関係は認められなかった。一方で橋種に着目した場合は、コンクリート橋は架設年が古い橋梁に損傷が多くなっているのに対し、鋼橋では比較的新しい橋梁で通行規制が実施されている傾向が見える。これは、コンクリート橋の損傷は、劣化因子の浸透による鉄筋の腐食など時間に依存する傾向があることが一因として考えられる。一方で、鋼橋の架設年が1960年代後半から70年代前半に集中している。これは、S39鋼道路橋設計示方書(1964)において技術基準が一部緩和され(桁のたわみの許容値)、S48道路橋示方書(1973)で改定されるまでの期間とほぼ一致しており、こうした規定の違いが損傷発生率に影響した可能性がある。橋梁の定期点検結果のマクロ分析からも準拠した技術基準と亀裂の損傷発生率には相関があることが分かっており、同様

#### 5.2 規制内容と橋梁条件との関係

通行規制を実施することによる地域への影響については様々な評価手法が提案されているが、その影響は橋梁の置かれた条件によって異なるものと考え、規制内容と橋梁条件との関係を分析した。

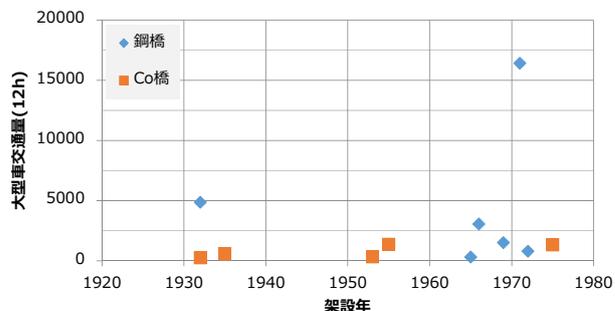


図-21 大型車交通量(12h)と架設年

##### (1) 規制日数と迂回路距離

規制日数と迂回路までの距離(同一河川上の次の橋梁までの直線距離)の関係を図-22に示す。迂回路までの距離が長くなると、比較的規制期間が短くなる傾向が確認できた。迂回路が長ければ、走行時間増加、走行経費増加、交通事故増加による損失が大きくなるため、管理者がより早急な対応を実施し、規制時間の短縮を図っているものと考えられる。

##### (2) 損傷部材と規制内容

損傷部材と規制内容(重量規制、片側通行規制、通行止め)との関係を図-23に示す。床版損傷事例では片側通行規制のみであったが、主桁や基礎の損傷事例では通行止めの処置がなされている。管理者が規制を判断する際に、損傷部材によってリスクの程度に違いがあることがわかる。

##### (3) 規制内容と近隣重要施設

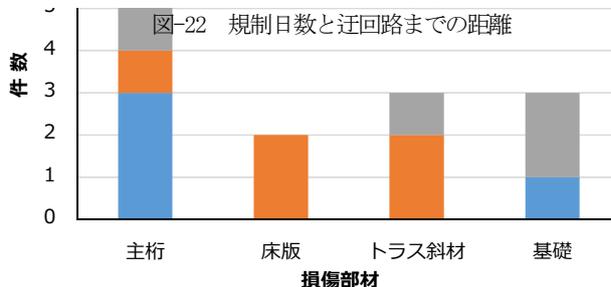
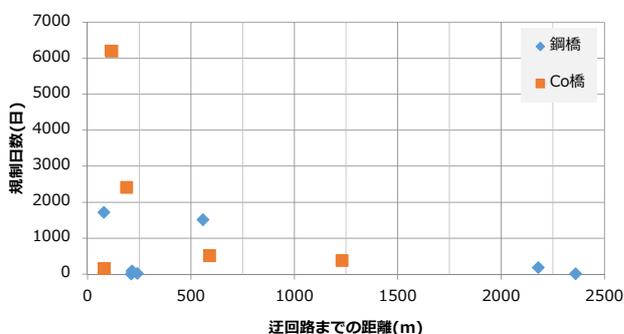


図-23 損傷部材と規制内容

規制内容が橋梁周辺に存在する重要施設（総合病院、消防署、学校）の配置に影響を受けているのではないかと考え、地図上で橋梁から半径2km以内の重要施設位置を確認した。結果を表-14に示す。全面通行止めを実施した5事例について見ると、周辺重要施設無しが3事例、重要施設有りが2事例となっている。重量規制や片側通行規制のように供用を確保しながらの規制の場合、10事例中8事例が重要施設有りであった。また、損傷橋梁と同等規模の迂回路が有るにも関わらず通行止めを行わずに供用している事例も8事例有り、重要施設へのアクセスを確保し、社会的影響を最小化させているものと考えられる。

6. 定量的評価方法の検討

表-14 規制内容と近隣重要施設

橋梁	規制状態（緊急、応急時）	重要施設(半径2km以内)	迂回路有無
A橋	片側通行規制	なし	有
B橋	全面通行止め	なし	無
C橋	全面通行止め	なし	無
D橋	片側通行規制	小学校	有
E橋	全面通行止め	病院3件、小学校、中学校	有
F橋	全面通行止め	なし	無
G橋	片側通行規制	小学校	無
H橋	全面通行止め	小学校	有
I橋	重量規制	病院、小学校、中学校	有
J橋	片側通行規制	病院2件、大学	有
K橋	重量規制	消防署、高校	有
L橋	重量規制	病院、小学校3件	有
M橋	重量規制	小学校	有
N橋	片側通行規制	なし	無
O橋	通行規制（詳細不明）	小学校、中学校、高校	有

6. 1 分析方法

リスクアセスメントの標準手順として、ISO/IEC Guide51:1999<sup>4)</sup>（ガイド51）に示される図-24のようにまとめられており、リスクアセスメントの標準手順は(1)～(4)、リスク分析の標準手順は(1)～(3)とされている。橋梁のハザードには地震や車両の衝突等の偶発作用も存在するが、経年劣化により部材が損傷し、損傷の程度が進行すると橋梁全体の安全性が低下するため、本検討では経年劣化を対象とした。ハザードの特定とは、橋梁に発生する損傷等を特定することであり、リスクの見積とは、橋梁に発生した損傷により被る損害を評価することである。リスクの評価手法は多く存在するため、IEC/ISO31010:2009<sup>6)</sup>（JISQ31010:2012 リスクマネジメン

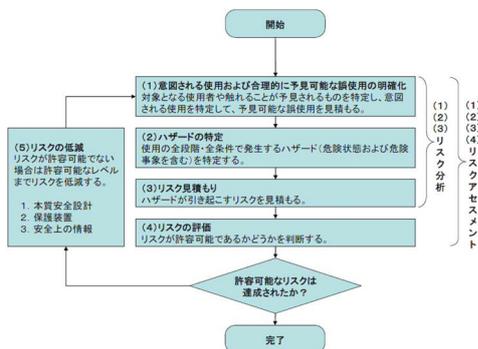


図-24 リスクアセスメントの標準手順<sup>5)</sup>

トに記載されているリスクアセスメントの技法31種類を参考に、橋梁のリスク評価分析に適用可能な方法を表-15のように抽出した。この他、国内の省庁がリスクアセスメントを推奨している例として、厚生労働省が労働安全衛生の分野、経済産業省が消費生活用製品製造の分野があり、それぞれでリスクアセスメントの方法等をまとめられているため、これも参考にして手法をとりまとめた（表-16）。この中からハザードの特定とリスクの見積に適した手法を提案することとした。

6. 2 橋梁のハザードの特定に適した手法

表-13に示すように、ハザードの特定には「チェックリ

表-15 JISQ31010<sup>5)</sup>に示されるリスク分析手法の抽出

方法	概要	必要 能力 評価	ハザード特定の実用性		リスク見積の実用性	
			理由	評価	理由	評価
ブレインストーミング	想像力を重視し、参加者の想像力が他人の意見によって確実に誘発されるよう進行される会議	低	×	ハザードが漏れる危険性あり、かつ手順が分かる	×	適用不可(表A1のリスクレベル欄が適用不可)
構造化又は半構造化インタビュー	インタビュ어가 予め用意した質問集から質問して、回答者に異なる視点からの意見を求める	低	×	ハザードが漏れる危険性あり、かつ手順が分かる	×	適用不可(表A1のリスクレベル欄が適用不可)
チェックリスト	多数の既往資料の整理等により作成されたチェック項目を参照した上	低	○	ハザードの漏れを防止、また、非常時にも使用可能	×	適用不可(表A1のリスクレベル欄が適用不可)
半構造的ハザード分析(PHA)	詳細な情報が無い段階で行うハザードの特定	低	×	詳細な情報に基づかない	×	適用不可(表A1のリスクレベル欄が適用不可)
原因影響分析	ブレインストーミングにより要因をあげ、樹形図又は特性要因図にまとめる	低	×	ハザードが漏れる危険性あり、かつ手順が分かる	×	適用不可(表A1のリスクレベル欄が適用不可)
リスク指標	リスクの各構成要素を半定量的に評価し、その加算(減算)でリスクの値を計算する	低	×	適用不可(ハザード特定後のリスク見積方法)	○	簡便に半定量的見積が行える
リスクマトリックス	発生頻度と危害の程度の等級を縦軸・横軸とするマトリックスの各マス目にリスクの大きさを対応させる	低	×	適用不可(ハザード特定後のリスク見積方法)	○	簡便に半定量的見積が行える

表-16 橋梁に適したリスク分析手法一覧

業務分野	ハザードの特定	リスクの見積
労働安全衛生	チェックリスト	リスクマトリックス
		リスク指標
		リスクグラフ
消費生活用製品製造	チェックリスト	リスクマトリックス
		FMEA
		FTA
JIS Q 31010 から抽出	チェックリスト	リスクマトリックス
		リスク指標

スト」、「FMEA」、「FTA」を分析手法として抽出した。チェックリストは、ハザードの洗い出しにおいて、漏れ落ちが無いようにするリストであり、FMEAは、橋梁の部材が損傷したときに、橋梁全体にどのような影響を及ぼすか解析し、大きな影響を及ぼす部材を見つける方法である。FTAは橋梁に対して望ましくない事象の発生要因を検討し、その要因を体系的に整理する方法である。

6. 3 橋梁のリスクの見積に適した手法

表-16に示すように、リスクの見積手法として、「リスクマトリックス」、「リスク指標」、「リスクグラフ」を抽出した。リスクマトリックスは、橋梁の損傷の深刻度と、橋梁が損傷したことによる社会的影響をそれぞれ縦軸・横軸とするマトリックスを作り、各マス目に対応させる方法である。リスク指標は、リスクの各構成要素を半定量的尺度で評価し、その加算(減算)でリスクの値を計算する方法である。リスクグラフは、リスクパラメータ

橋梁の損傷の深刻度	大	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
	中	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
	小	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ
		小	中	大
		社会的影響度		

図-25 リスクマトリックスのイメージ

と程度をツリー表示し、それらを選択・組み合わせを行う事でリスクの見積を行う方法である。リスクグラフは、損傷の程度等を大・小の2つの区分とする必要があるため、それ以上の区分数とすることができず、橋梁のリスク評価としては不向きであると考えられる。リスクマトリックスとリスク指標は、ここでは、損傷の程度や発生頻度を2つ以上の区分とすることが可能であることや、リスクの程度を自由に設定できる手法であり、橋梁の損傷の深刻度や社会的影響度を視覚的に表現可能であり、分かりやすさの面で優れていると考えられるリスクマトリックスを使用することとした。リスクマトリックスのイメージを図-25に示す。

#### 6. 4 橋梁のリスク評価方法の提案

これまでにいった第2章～第5章までの検討内容から、橋梁のリスク評価を行う場合の橋梁の損傷の深刻度と社会的影響度の評価区分の考え方を示す。

##### (1) 評価の考え方

リスク評価の観点として、安全性と使用性の2点がある。使用性が低下すると社会的影響に及ぼすことなどを考慮すると、次のように評価することが考えられる。

Ⅰ：安全性及び使用性のリスクが相対的に低い

Ⅱ：主として、使用性のリスクが高い。社会的影響度に応じて適切な対策が必要

Ⅲ：安全性及び使用性のリスクが高い。社会的影響度に応じて適切な対策が必要

Ⅳ：安全性及び使用性のリスクが高く、早急な対策が必要

要

##### (2) 橋梁損傷の深刻度の考え方の例

###### ○鋼橋の場合

主桁等に損傷が生じると安全性に影響し、過去にも通行止めに至った事例も多いことから、主部材に損傷が発生した場合は損傷は深刻度中以上と考えることが出来る。そのうち、昭和39年道路橋示方書に準拠した設計の場合は、損傷頻度が高く、今後も損

傷が生じやすいと考えること、通行止めの事例も多いことから損傷度大と考える。

###### ○PC橋の場合

鋼橋と同様な理由から、主部材に損傷が発生した場合は、損傷の深刻度は中以上とすることが考えられる。そのうち、塩害に着目した分析で塩害の発生頻度の高かった「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説 昭和59年」が発刊される以前に架設された橋梁は、著しい損傷に至る可能性が高いことから、損傷の深刻度大としてよいと考えられる。

###### ○下部構造の場合

被災事例の分析により、下部構造に洗屈が発生した場合は、通行止めを実施している事例が多いことから、損傷の深刻度中以上とすることが考えられる。そのうち、直接基礎でフーチング下面が露出している場合は、安全性への影響が懸念されるため、深刻度大として良いと考えられる。

##### (3) 社会的影響度の考え方の例

第4章で検討を行ったA橋、B橋は、通行止めを実施し、社会的にも大きな影響を及ぼしている。この2つの橋梁の社会的損失額が、それぞれ10億円以上であったことから、社会的損失額が10億円以上の場合には、社会的影響度を大として良いと考えられる。

なお、上記については、本研究で収集した事例から提案した考え方であり、今後試行等も含めた詳細な検討が必要である。

## 7. まとめ

橋梁点検データの分析、重大損傷事例の分析等から、橋梁に生じた損傷が落橋や通行止め等に至る条件や深刻度について明らかにした。また、通行止め等が生じた場合の社会的影響度の評価方法について、事例に基づく試算により適用性を検証した。さらに、これらの組み合わせた橋梁のリスク評価について、海外の事例等を参考にしながら提案し今後は、提案した手法について試行等も含めた更なる検討を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領(案)、2004
- 2) 国土交通省HP：道路の老朽化対策  
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>
- 3) 国土交通省道路局都市・地域整備局：費用便益分析マニュアル、2008.
- 4) ISO/IEC Guide 51:1999.
- 5) 経済産業省：リスクアセスメントハンドブック実践編、

2011.6

6) IEC/ISO31010:2009.

## RESEARCH ON THE RISK ASSESSMENT OF BRIDGES

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Bridge and Structural  
Technology Research Group

**Author** : Toshiaki Nanazawa

Hidemoto Mayumi

Shoichi Iijima

**Abstract** : The purpose of this study is development of a risk assessment method for highway bridges, which evaluates relative risk of damage to the members, and which considers the influence of the damage on human life and society.

By analyzing past damage cases, calculation of the social loss by the road closed, and results of bridge inspection, we examined how to identify, analyze and evaluate the risk of road bridges. The inspection indicates that deformation, crack, and corrosion consist the largest number of damages, and its common reason are fatigue or failure of drain system. We classify the damage process of members and select the risk rating matrix method as a risk evaluation method.

**Keywords** : risk assessment, highway bridges, bridge inspection