

## 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。平成 26 年度は、各地方整備局等で実施されている橋梁定期点検結果や既往の重大損傷事例を用いて、橋梁に発生するリスクの細分化、橋梁のリスク評価手法を検討した。

キーワード 道路橋，リスク，評価，橋梁定期点検

### 1. はじめに

#### 1. 1 検討目的

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。既に床版の疲労、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。

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 年以上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。

#### 1. 2 検討方法

本年度は、最新の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、橋梁に発生するリスクの細分化、社会的影響の評価手法の検討及び橋梁のリスク評価に適した評価手法の検討を行った。

### 2. 損傷事例の分析

#### 2. 1 分析対象

既設橋の重大損傷事例をもとに橋梁に発生するリスクを細分化する。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。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

#### 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-1)。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-2 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、以降の分析を行った。

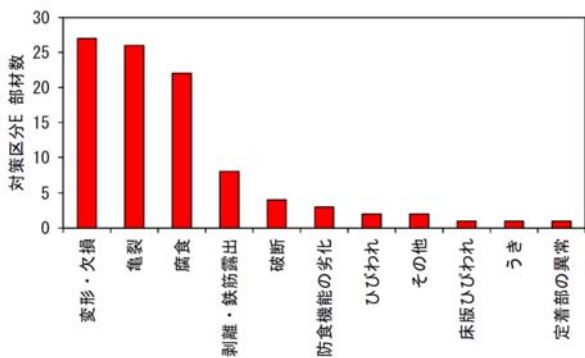


図-1 対策区分Eの損傷箇所

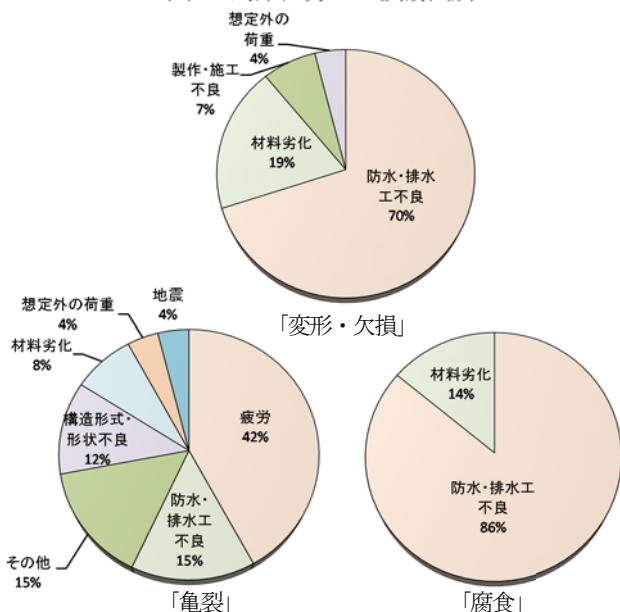


図-2 変形・欠損、亀裂及び腐食の損傷原因

### 2. 3 損傷の発生過程

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書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<sup>2)</sup>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桁に亀裂が発生する過程である（図-3）。

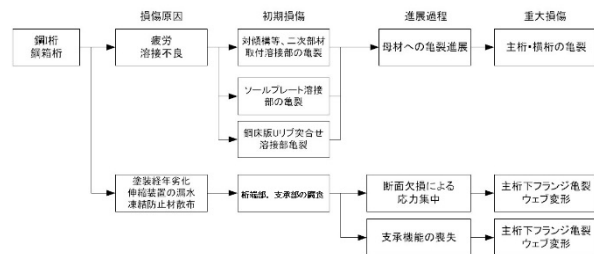


図-3 鋼I桁橋及び鋼箱桁橋の損傷の発生過程フロー図

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が発生、進展する過程である（図-4）。



図-4 鋼トラス橋の損傷の発生過程フロー図

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-5）。

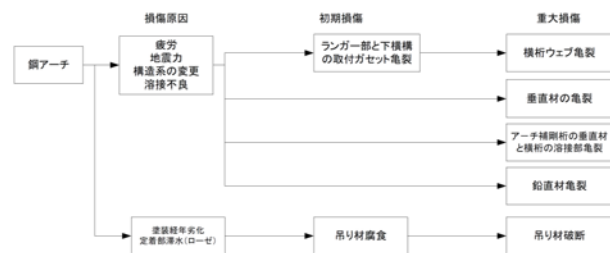


図-5 鋼アーチ橋の損傷の発生過程フロー図

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-6）。



図-6 PCT桁橋の損傷の発生過程フロー図

重大損傷に至るまでの過程には、ほとんどの場合、初期損傷や進展過程をとまなうため、それら事象を損傷の評価を行う際に活用できると思われる。

なお、本検討では、損傷過程分析における各構造形式の分析対象を 8~26 径間とした。今後は更なるデータ数を対象とした分析を実施し、より精緻な損傷過程の分析を行う必要がある。

### 3. 橋梁の損傷による社会的影響の評価

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「費用便益分析マニュアル」<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。

#### 3. 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-1)

$Q_2$  : 迂回交通量 (台/日)

T : 迂回による走行時間増分 (分)

表-1 車種別の時間価値原単位<sup>3)</sup>

単位：円/分・台	
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

#### 3. 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

$\beta_1$  : 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)

### 3. 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-2)

表-2 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	$AA_{ij} = 2000 \times X_{ij} + 530 \times X_{2i}$
			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	$AA_{ij} = 1580 \times X_{ij} + 500 \times X_{2i}$
			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		$AA_{ij} = 360 \times X_{ij}$		

$X_{ij} = Q_i \times L_i$  : 整備 i の場合のリンク i における走行台キロ (千台 km/日)

$X_{2i} = Q_i \times Z_i$  : 整備 i の場合のリンク i における走行台個所 (千台個所/日)

$Q_i$  : 整備 i の場合のリンク i における交通量 (千台/日)

$L_i$  : リンク i の延長 (km)

$Z_i$  : リンク i の主要交差点数 (個所)

#### 3. 4 規制日数

3.1, 3.2, 3.3 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-3 に示す。11 事例には、鋼橋、コンクリート橋、延長 28~200m、径間数 1~12 径間と、様々な橋梁が含まれるが、より精度を高めるためには今後の追加検討が望まれる。

表-3 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
	・小規模橋 (橋長 30m 程度)	15 日
その他	・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)	

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。

4. 定量的評価方法の検討

4. 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-7 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。

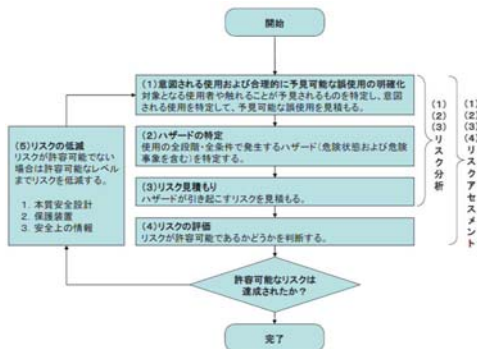


図-7 リスクアセスメントの標準手順<sup>5)</sup>

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-4 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品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-5)。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。

4. 2 橋梁のハザードの特定に適した手法

表-5 に示すように、ハザードの特定には「チェックリスト」、「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。

表-4 JISQ31010<sup>9)</sup> に示されるリスク分析手法の抽出

方法	概要	必要 時間 能力	ハザード特定 の適用性		リスク見積 の適用性	
			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、かつ手間がかかる	×	適用不可(表A.1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	インタビュワーが予め用意した質問集から質問し、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、かつ手間がかかる	×	適用不可(表A.1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網羅した表	低	○	ハザードの漏れを防止。また、非専門家も使用可能	×	適用不可(表A.1のリスクレベル欄が適用不可)
予備的ハザード分析(PHA)	詳細な情報がな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A.1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、かつ手間がかかる	×	適用不可(表A.1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)	○	適用不可(表A.1のリスクレベル欄が適用不可)
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-5 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
消費生活用品製品製造	チェックリスト	リスクマトリックス
	FMEA	リスクグラフ
	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

4. 3 橋梁のリスクの見積に適した手法

表-5 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、損傷の発生頻度と損傷の程度のランクをそれぞれ縦軸・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、損傷の程度や発生頻度を大・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、損傷の程度や発生頻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-8 に示す。

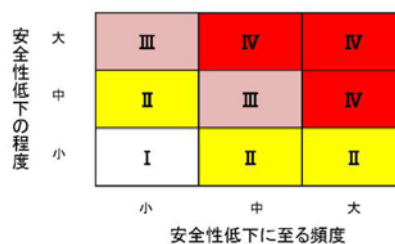


図-8 リスクマトリックスのイメージ

4. 4 橋梁のリスク評価例

ここでは、一般的な上部構造形式である鋼多主桁橋のうち、過去に亀裂が発生した直轄橋梁を対象にリスク評価を行った一例を示す。

(1) 対象橋梁

本橋の断面図を図-9 に示す。過去の橋梁点検において次の2種類の亀裂(対策区分 e) が発見された。

- ① 耳桁(端部の桁)の垂直補剛材上端溶接部の亀裂が多く、径間で生じていたが、母材への進展は確認されていない(図-10)。最大亀裂長は30mmであった。
- ② ゲルバー受け桁の切欠き部の亀裂が橋脚梁と剛結している受け桁の切欠き部のフランジ板継ぎ溶接部に発生した。

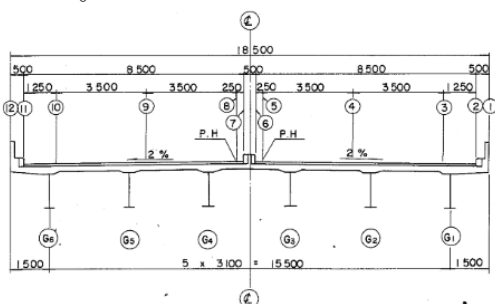


図-9 鋼多主桁橋断面図



図-10 耳桁(端部の桁)垂直補剛材上端溶接部に発生した亀裂

(2) 対象橋梁の損傷リスク評価

橋梁の損傷リスク評価においては、各損傷に対して安全性低下の程度及び安全性低下の頻度を判定する必要がある。ここでは「2.損傷事例の分析」の損傷分析結果に基づき設定した、各損傷の判定例を表-6 に示す(表-6 は、あくまでも研究途上の例であることに留意する必要がある。)

表-6 に基づき、本対象橋梁の損傷リスク評価を行った結果の例を表-7 に示す。評価の結果、最もリスクが大きいのは切り欠き部フランジ板継ぎ溶接部の亀裂であり、リスク区分はIVであった。

上記の損傷リスク評価に加えて、3 で検討した橋梁の損傷による社会的影響の評価を考慮し、総合的な橋梁のリスク評価を行うことになるが、社会的影響の評価に際しては単独の橋ではなく路線全体における橋梁群の一つとしての評価が必要となる。

表-6 鋼多主桁橋の安全性低下の程度及び頻度の判定(例)

亀裂の種類	安全性低下の程度	安全性低下の頻度	備考
G1 主桁と横桁・対傾構接合部			
①垂直補剛材上端の溶接部	小	小～中	
②横桁貫通部の主桁ウェブ	大	大	
G7 主桁桁端切欠き部			
①フランジの板継ぎ溶接部	大 (主桁破断)	大	
②G8 対傾構・横構の重ね継手溶接部	小	中～小	

表-7 鋼多主桁橋の損傷リスク評価(例)

損傷箇所	安全性低下の程度	安全性低下に至る頻度	リスク区分
耳桁垂直補剛材上端溶接部の亀裂	小	小～中	II
切り欠き部フランジ板継ぎ部の亀裂	大	大	IV

5. まとめ

今年度は、重大損傷のデータから重大損傷に至るまでの過程で、安全性の低下の程度の評価につながる項目を整理した。社会的影響の評価では、分析マニュアルを参考に評価の流れを提案した。定量的評価方法の検討では、ハザードの特定に適した手法を選定し、リスクの見積りはリスクマトリックスを利用する方法を提案した。今後は、今回提案した手法をベースとして重大損傷に至るリスクについて更なる検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領，2014.6
- 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 and results of bridge inspection, we examined how to identify, analyze and evaluate the risk of highway bridges in FY2014. 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 matrix method as a risk evaluation method.

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