

## 既設道路橋の性能照査型維持管理の試み

STUDY ON THE PERFORMANCE-BASED MANAGEMENT AND MAINTENANCE OF  
EXISTING HIGHWAY BRIDGES

石川裕一\* , 橘吉宏\*\* , 岩崎英治\*\*\* , 長井正嗣\*\*\*\* , 宮下剛\*\*\*\*\* , 森山守\*\*\*\*\*

YUICHI ISHIKAWA, Y.TACHIBANA, E.IWASAKI, M.NAGAI, T.MIYASHITA, M.MORIYAMA

**ABSTRACT** This paper reports a trial study on quantitative structural assessment of existing highway bridges. In order to introduce it into practice, the structural assessment scheme is discussed. Moreover, some trial studies on structural reliability evaluation are conducted.

**KEY WORDS** : 性能照査型維持管理, 信頼性評価  
Performance-based management and maintenance,  
Structural reliability evaluation

## 1. まえがき

我が国は、高度経済成長期以降に高速道路橋の整備事業が活発となり 1980 年代にピークを迎えた。現在では高速道路橋の整備は成熟しつつあり、橋梁の整備事業は新設から保全にシフトしている<sup>1)</sup>。人口減少・少子高齢化の進展、経済成長率の低迷による厳しい財政、国際化の進展などの社会情勢は変化しつつあり<sup>2)</sup>、2014 年 7 月に橋梁定期点検要領が告示され 5 年 1 回の近接目視が義務づけられた<sup>3)</sup>。さらに中日本高速道路では笹子トンネル天井板落下事故を受けて、点検に携わる者に対し定期点検で構造安全性能を確かめることが求められるようになり、また組織として安全を最優先とする企業文化の構築、構造物の経年劣化や潜在的リスクに対応した業務プロセスの見直し、安全管理体制の確立、体系化された安全教育を含む人材育成、安全性向上に向けた事業計画に対する責務を課し、高速道路の利用者に対して構造物の構造安全性に関する説明責任を果たすことが重要と考えられ始めている<sup>4)</sup>。

これらの背景から、著者らは既設鋼橋を対象に、より科学的・合理的に説明できる保全を実現する方策を検討中である。本稿は筆者らが検討している既設鋼橋の維持管理法に関する試みを紹介する。

## 2. 鋼橋の維持管理における欧米の趨勢

我が国の高速道路橋の定期点検は、これまで経験工学に依るところが大きく、既設鋼橋の構造安全性能は定性的に評価されてきた。すなわち点検員・技術者は現場での実務経験を積み、ノウハウの蓄積と継承することにより既設鋼橋の構造安全性能が確かめられるとしてきた。これを筆者らは経験型維持管理と呼ぶ。一方、海外趨勢を見ると、点検員の国家資格制度が導入されている米国では、定期点検におけるノウハウを確保することが課題とされ、FHWA のレポートでは点検員の知識や経験の差によ

\* 博士(工) 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 (〒920-0025 金沢市駅西本町 3-7-1)

\*\* 工 博 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 道路技術部 担当部長 (〒920-0025 同上)

\*\*\* 工 博 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

\*\*\*\* 工 博 長岡技術科学大学 名誉教授 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

\*\*\*\*\* 博士(工) 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 准教授 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

\*\*\*\*\* 博士(工) 中日本高速道路金沢支店 福井保全・サービスセンター副所長 (〒910-2177 福井市稲津 16-7)

り点検結果にバラツキが生じることが報告されている<sup>5)</sup>。また2007年の米国のミネソタ州 I-35W 橋の落橋事故レポート<sup>6)</sup>では、設計段階のミスが定期点検で看過された点、既設橋の構造特性を反映させた耐荷力を評価するプロセスが欠如していた点が指摘され、経験型維持管理の問題が整理されている。

こうした教訓から欧米では点検員による経験型維持管理を脱し、点検・調査・モニタリングのデータを基に既設鋼橋の健全性を定量的に評価する維持管理プロセスが整備されて始めている。既設鋼橋の健全性の定量的な評価は、定期点検による現状を把握するプロセスと、構造安全性能、使用性能ならびに疲労を照査するプロセスで構成されることが多い。筆者らは、これを性能照査型維持管理と呼ぶ。

性能照査型維持管理の一例として、ISO13822（構造物の設計の基本—既設構造物の性能評価）<sup>7)</sup>では図-1に示す維持管理フローが定められ、橋梁の架設地点における経年劣化や損傷シナリオを考慮した構造解析により、構造安全性能ならびに使用性能の評価が行われている。また米国ではFHWAの点検要領NBISにより高速道路橋に対して2年1回の定期点検を定め、さらにAASHTO MBE<sup>8)</sup>（橋梁評価マニュアル）による耐荷力評価法でRF（Rating Factor）を算出し、NBI台帳により橋梁の情報を一元管理している。AASHTO LRFRによる耐荷力評価のフローを図-2に示す。またミネソタ州 I-35W 橋の落橋事故を受けて、鋼トラス橋などの冗長性がない橋ではリダンダンシー評価を実施するための要領<sup>9)</sup>をまとめ、崩落危険部材（Fracture Critical Member, 以下FCM）を特定し、点検員・技術者にFCMに対する教育を行うことが重要と認識されている。なおFCMとは、引張を受ける部材もしくは部材を構成する部分で、その破壊が橋梁全体の崩落もしくは機能障害を起こすものを指す。

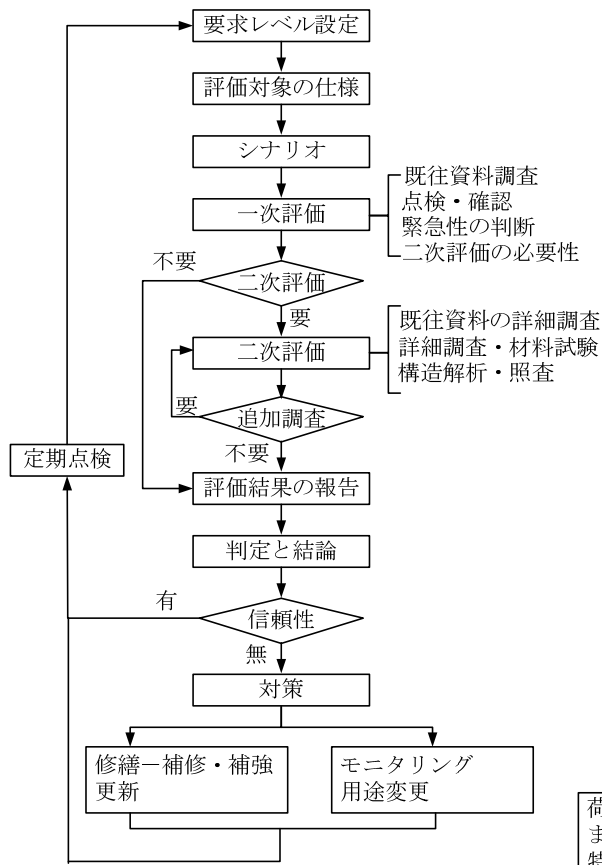


図-1 ISO 13822 による既設構造物の維持管理フロー<sup>7)</sup>

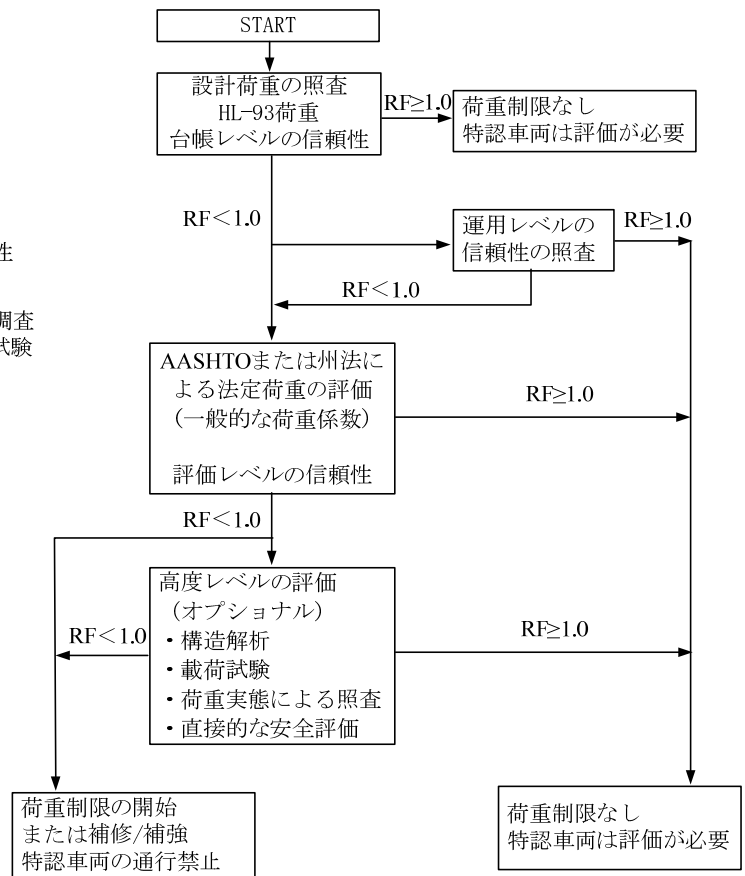


図-2 AASHTO MBE による既設橋梁の耐荷力評価フロー<sup>8)</sup>

### 3. 鋼橋の性能照査型維持管理の枠組み

著者が検討する既設鋼橋の性能照査型維持管理の枠組みは、「より科学的・合理的に説明できる保全」を実現することを基本コンセプトとして、図-3 に示すフローを提案している。このフローは、限られた人的資源で、より多くの既設鋼橋を効率的に維持管理できるよう、構造安全性能の照査にメリハリをつけ、劣化の度合いが重篤な判定に進むごとに、より精密かつ定量的な評価を実施することを求めている。具体には、構造安全性能の事前確認、定期点検、事後確認の3ステップとする。

#### (1) 構造安全性能の事前確認

構造安全性能の事前確認は、変状を早く、かつ効率的にみつけ出すノウハウを得ることを目的とする。具体として、鋼トラス橋のFCMを特定し点検員に対してFCMに関する教育を行うことや、地域特性を考慮した劣化シナリオを設定し、変状を事前に検討することで、点検員に対して橋梁点検時の着目点や診断のノウハウを継承し、点検員の知識や経験の差による点検結果のバラツキを防ぐ。

#### (2) 定期点検による構造安全性能の確認

第三者被害等の恐れがある場所では触診や打音ができるように検査路を設置することや、近接目視ができるように橋梁点検車または高所作業車を用いた定期点検の計画を立て、未点検箇所をなくす。

#### (3) 構造安全性能の事後確認

構造安全性能の事後確認は、定期点検において著しい変状が発見された際に点検員の定性的な判断や、曖昧さを排除する目的として実施する。既設鋼橋の構造安全性能の事後確認は、道路橋に作用する影響度（記号 S）と抵抗する影響度（記号 R）を比べ、定量的に評価することを基本とする。また定期点検は5年1回の頻度で実施されるため、5年後の状態を予測する鋼材の腐食進行の情報や、荷重実態の情報を活用し、構造安全性能に対し照査ステップ毎で定める安全率の範囲にあるか判定する。次章以降では、この評価フローを整備するための基本検討を紹介する。

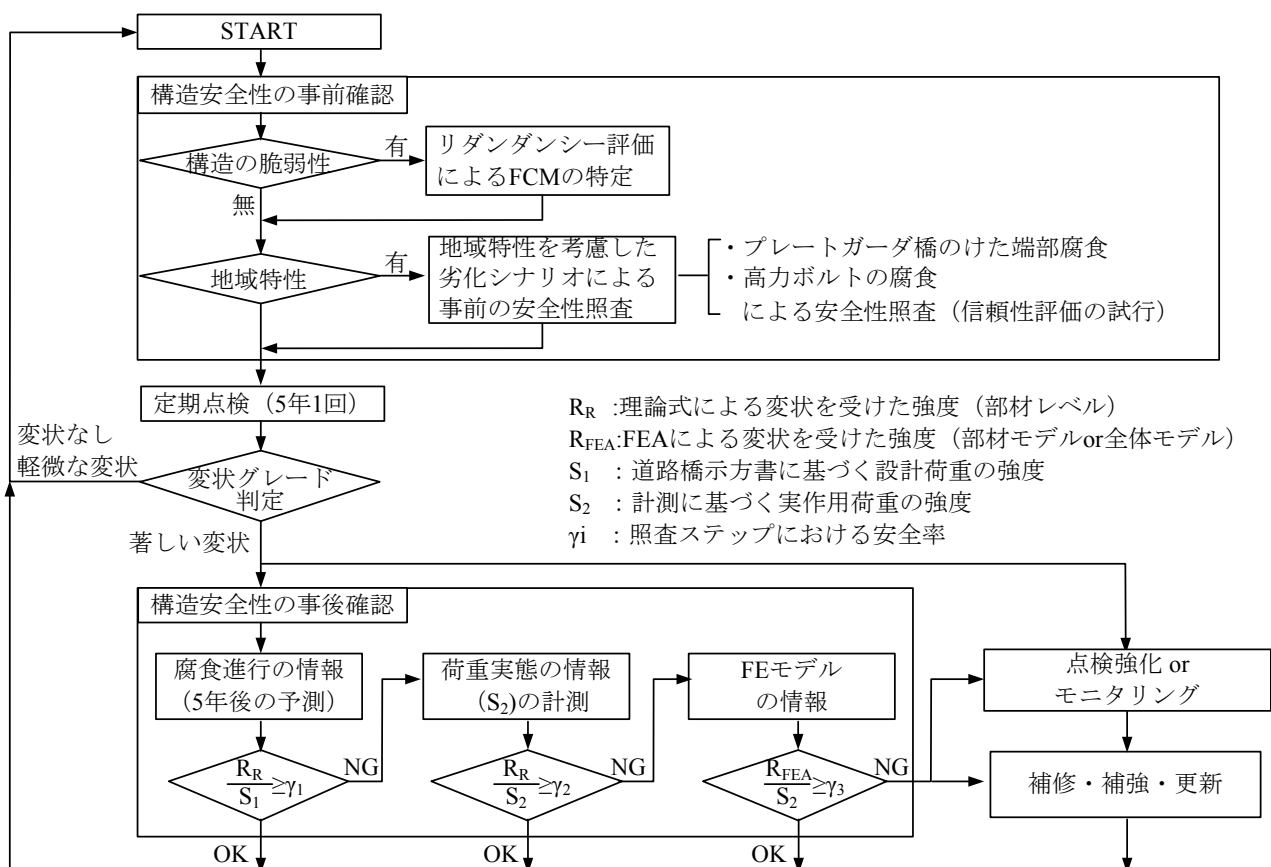


図-3 既設鋼橋の性能照査型維持管理による評価フロー

#### 4. 構造安全性の事前確認

##### 4.1 リダンダンシー評価によるFCMの特定

トラス部材の単体破損が橋梁全体の崩落に繋がるFCMを把握するため、線形解析でリダンダンシー評価を行っている。リダンダンシー評価の方法は、ある部材が破断したことを仮定し断面力を開放した後で他の部材の断面力を算出し、他の部材が終局状態となるかを判定する。ある部材の破断により他の部材の少なくとも1つが終局状態と判断された場合は、終局状態となる部材が連鎖すると考えてFCMとする。図-4にリダンダンシー評価の結果を示す。図-4の太線で示した部材はFCMと評価される。このため鋼トラス橋の定期点検では、FCMのガセットプレートの変状に対してより慎重な近接目視を行うことを求め、鋼トラス橋の構造安全性能を定期的に確認することが重要と考える。

##### 4.2 劣化シナリオによる事前の構造安全性能の照査

点検員の知識や経験の差による点検結果のバラツキを防ぐため、多くの鋼桁橋で報告される代表的な劣化要因に対して、地域特性を考慮した劣化シナリオを検討する。この検討から、代表的な鋼桁橋の劣化に対して、効率的に定量的な評価を行うノウハウが整理できる。これまで筆者らの地域特性を考慮した劣化シナリオの検討では、鋼桁橋のけた端部腐食や、高力ボルトの腐食の事例について、信頼性評価指標 $\beta$ （以下、 $\beta$ 指標）により構造安全性能の試算している。

なお $\beta$ 指標とは図-5でイメージされる。 $\beta$ 指標は時間の経過により劣化が進行すると小さくなり、また破壊確率も増す。 $\beta$ 指標は作用側の確率分布 $f_S(S)$ と抵抗側の確率分布 $f_R(R)$ が交わる性能関数 $Z$ の平均値 $\mu_Z$ を標準偏差 $\sigma_Z$ で除し、 $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ で与えられる。また性能関数 $Z$ の平均値は $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ 、標準偏差は $\sigma_Z = (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$ で求まる。表-1は破壊確率と $\beta$ 指標の関係を示す。ISO13822<sup>7)</sup>では $\beta$ 指標を3.8に確保して、構造物を維持管理することが目標とされている。

###### (1) プレートガーダー橋のけた端部腐食の事例

冬季に凍結防止剤を使用する北陸道では、鋼橋のけた端部に局所的な腐食が生じていることが多い。性能関数 $Z$ の平均値 $\mu_Z$ は、 $\mu_Z = F_y - (D+L)/A$ と表現できる。ここに $F_y$ は降伏強度の平均値、 $D$ は死荷重強度の平均値、 $L$ は活荷重強度の平均値、 $A$ は柱としての有効断面の平均値をそれぞれ示す。表-2に $\beta$ 指標を試算するための対象部の諸元の平均値、標準偏差を示す。 $\beta$ 指標の算定にあたり、Advanced First Order and Second-Moment（以下、AFOSM）を用い、表-3の結果を得る。なお表-3には許容応力度設計法（Allowable Stress Design Method, 以下、ASD）における安全率も併記している。

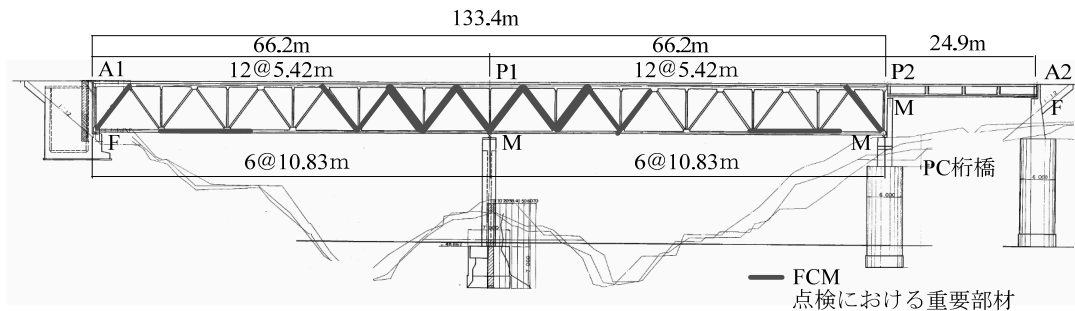


図-4 リダンダンシー評価結果の例

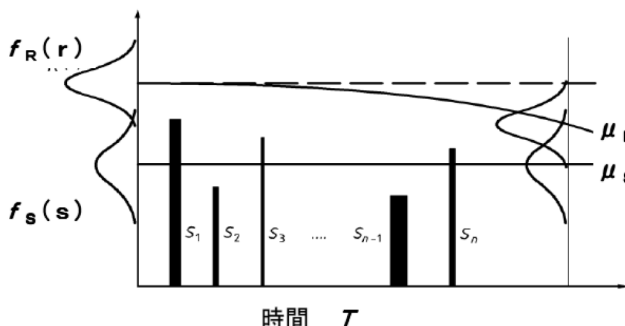


図-5 時間経過に伴う信頼性評価指標 $\beta$ のイメージ

表-1 破壊確率と $\beta$ 指標の関係

破壊確率	$\beta$ 指標	破壊確率	$\beta$ 指標
0.50	0.00	$10^{-4}$	3.72
0.16	1.00	$10^{-5}$	4.27
$10^{-1}$	1.29	$10^{-6}$	4.75
$10^{-2}$	2.32	$10^{-7}$	5.20
$10^{-3}$	3.09	$10^{-8}$	5.61

表-2 不確定要因の平均値と標準偏差の一覧

不確定要因		基準値	平均値／基準値	標準偏差
作用側要因	死荷重	RC 床版 2.50tf/m <sup>3</sup>	1.050	0.0138
		鋼重 7.85tf/m <sup>3</sup>	1.002	0.0121
		舗装 2.30tf/m <sup>3</sup>	1.030	0.0500
	活荷重	TL20	0.65~1.30	0.0560
抵抗側要因 けた端部	降伏強度	JIS 規格下限値 SM41	1.232	0.1011
	板厚	計測値	計測値	0.2mm
抵抗側要因 高力ボルト	すべり係数	0.40	1.480	0.0670
	軸力	202kN	0.956	0.0190
	多列配置	耐荷力 10%低下を考慮する。		

表-3 けた端部の腐食減肉と安全率、 $\beta$  指標の関係  
(設計荷重強度の平均値×1.3の場合)

残存板厚(mm)		ASD による 安全率	$\beta$ 指標
腹板	ウェブ		
22	9	1.72	4.67
22	6	1.62	4.34
22	4	1.55	4.09
22	2	1.48	3.82
20	2	1.35	3.24

表-4 腐食した高力ボルトの本数の割合  
( $\beta$  指標 3.8 を確保する状態)

活荷重評価	著しく腐食した 高力ボルトの本数割合
L×0.65	35%
L×0.80	30%
L×1.00	25%
L×1.30	13%

## (2) 高力ボルトの腐食の事例

高力ボルトが著しく腐食するとボルトの残存軸力は低下する。この試算では、著しく腐食した高力ボルトの残存軸力をゼロと仮定し、 $\beta$  指標 3.8 を確保する高力ボルトの本数の割合を算出する。高力ボルトの残存軸力の性能関数  $Z$  の平均値  $\mu_z$  は、 $\mu_z = \rho N - (D+L)$  と表現できる。ここに  $\rho$  は高力ボルト 1 本あたりの耐力、 $N$  は軽微および腐食がない高力ボルトの本数、 $D$  は死荷重によるフランジ軸力分、 $L$  は活荷重によるフランジ軸力分とする。表-2 に  $\beta$  指標を試算するための諸元の平均値、標準偏差を示す。なお  $\beta$  指標の算定は AFOSM を用い、表-4 に結果を示す。

高力ボルトの腐食による信頼性評価の試算結果から、設計活荷重 (L×1.00) が作用する場合は 25% 未満の本数の高力ボルトが著しく腐食しても  $\beta$  指標 3.8 を確保できる。これは道路橋示方書 ASD と、信頼性理論に基づく  $\beta$  指標の評価の差であると考え、道路橋示方書 ASD は信頼性理論に基づく  $\beta$  指標 3.8 に比べて 25% の余裕があることがわかる。また北陸道の活荷重実態調査に基づく活荷重評価 (L×0.65) の場合は、35% 未満の高力ボルトが著しく腐食しても  $\beta$  指標 3.8 を確保できると試算された。

## 5. 構造安全性能の事後確認

### (1) 腐食進行の情報

道路橋の抵抗側に関する影響度 (R) の設定として、定期点検の間隔である 5 年後の鋼材の腐食進行を予測することが重要である。鋼材の腐食進行を予測するため、海岸からの飛来塩分や凍結防止剤が影響する代表橋 (4 か所) において、図-6 のワッペン型鋼材片 (SM490A, 50×50×2mm) を鈹桁橋のウェブや下フランジの上面に曝露し、経過時間と鋼材の腐食量の関係を調べている。鋼材片の曝露は 2015 年 1 月頃から始まり、所定期間後の鋼材腐食の質量減少を計測することで、将来の腐食進行が予測できるようになる。定期点検において鋼材腐食が発見された場合、ノギスなどによる腐食減肉量の計測値に加え、曝露試験の予測値を加算することで、抵抗側に関する影響度 (R) を補正できる。

## (2) 荷重実態の情報

道路橋の作用側に関する影響度 (S) を設定するため、Bridge Weigh-in-Motion (以下、BWIM) による大型車荷重の実態を把握している。図-7 は BWIM で得た荷重モデルから主桁の最大曲げモーメントを算出し、道路橋示方書の設計荷重との比較している。大型車が並走する場合、活荷重係数は 0.65 と試算される。今後も実荷重に関するデータを収集し、より信頼ある定量的な評価が可能となる。

## (3) FE モデルの情報

FE モデルによる構造安全性能の確認は、FE モデルと現地状況を同定することが重要となる。現地状況と FE モデルを構造同定する方法として、実橋の振動特性やたわみ特性が活用できる。たわみ特性の活用は実橋での載荷試験を行う必要があり、振動計測に比べ試験費や作業性に劣る。このため図-8 に示す加速度計を橋面上に設置し、実橋での振動特性を把握し、FE モデルの構造同定を試している。



図-6 ワッペン試験片による腐食計測



図-8 振動特性による構造同定

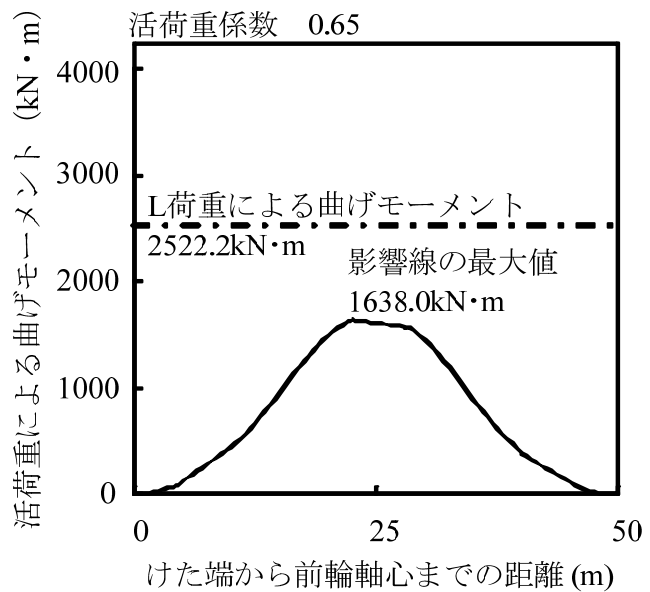


図-7 BWIM で得た主桁の最大曲げモーメント

## 6. まとめ

本稿では既設鋼橋の維持管理に対して、「より科学的・合理的に説明できる保全」を目指した試みについて概説した。5年1回の頻度の定期点検を支援するため、まず冗長性が少ない鋼トラス橋ではリダンダンシー評価し、北陸道の代表的な変状事例を対象に信頼性評価指標  $\beta$  の試算した。さらに5年後の状態を予測した腐食進行の情報や、荷重実態の情報を蓄積するとともに、既設鋼橋の構造安全性能の照査法を試行している。今後は鋼橋の性能照査型維持管理に向けて、地域特性を考慮した劣化シナリオの拡充や、構造安全性能のフィジビリティ・スタディーを行い、既設鋼橋の点検診断の高度化を目指していく考えである。

## 参考文献

- 1) 上東泰：橋梁構造物の耐久性向上に関する実践的研究，京都大学博士論文，2015
- 2) 平成25年度 国土交通白書，国土交通省，2013
- 3) 道路橋定期点検要領，国土交通省，2014
- 4) 安全性向上3カ年計画，中日本高速道路，2013
- 5) Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges, Volume I: Final report, FHWA, 2001
- 6) Highway Accident Report Collapse of I-35W Highway Bridge, NTSB, 2007
- 7) ISO 13822, Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures, ISO/TC 98, 2010
- 8) The Manual for Bridge Evaluation, Second Edition, AASHTO, 2011
- 9) Steel Bridge Design Handbook: Redundancy, FHWA, 2012

### 鋼橋の性能照査型維持管理と モニタリングに関する調査研究小委員会

#### 既設道路橋の性能照査型維持管理の試み

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 石川裕一 橋吉宏  
中日本高速道路 金沢支社 森山 守  
長岡技術科学大学 長井正嗣 岩崎英治 宮下 剛



### 自己紹介



いしかわ ゆういち  
石川 裕一(40)

専門: 橋梁の維持管理  
構造学

論文: 60編  
受賞: 論文奨励賞 1回(JCI)  
優秀発表者賞 2回(JSCE)  
Design award 1回(SFR)

略歴  
1999.3 長岡技術科学大学 修士取得  
1999.4 建設コンサルタント (橋梁の補修設計)  
2003.7 高速道路技術センター (委員会運営)  
2008.5 NEXCO中日本エンジニア名古屋 (現職)  
2013.9 長岡技術科学大学 博士号



### はじめに

安全のためにできる、  
すべてのことを。  
NEXCO中日本

安全性向上3カ年計画  
具体的な取組み

- 1.安全を最優先する企業文化の構築
- 2.構造物の経年劣化や潜在的リスクに対応した業務プロセスの見直し
- 3.安全管理体制の確立
- 4.体系化された安全教育を含む人材育成
- 5.安全性向上に向けた事業計画

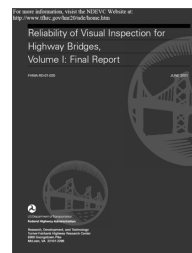
NEXCO中日本HPより

構造安全性能の確保



### はじめに

既設鋼橋の維持管理において  
構造安全性能の確保が求められている。



これまでの定期点検は定性的な  
評価が行われてきた？

FHWA レポート 2001  
～外観調査の信頼性～  
⇒点検員の知識や経験により  
点検結果にばらつきが生じる。

構造安全性能の確保は、重大損傷の  
看過しや、曖昧な判定を排除する体系が  
必要である。

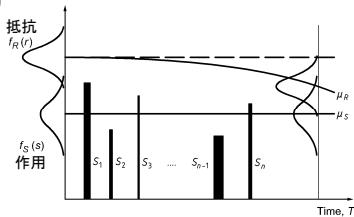


### 世界の趨勢(欧米)

経験則型維持管理法⇒性能照査型維持管理法

要求性能の定義: 要求性能が満足されているかの照査(法)は  
自由(競争を促す)

- ・ AASHTO LRFR
- ・ ISO 13822



構造物の経年劣化と信頼性評価のイメージ図  
(ISO13822より引用)



### 鋼橋の性能照査型維持管理の枠組み

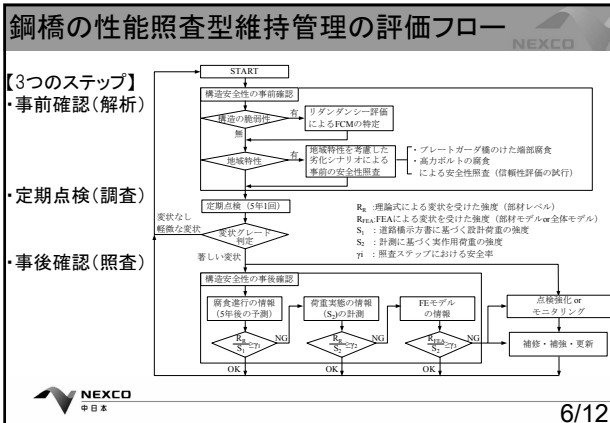
限られた人的資源で、より多くの既設鋼橋において、  
「より科学的・合理的に説明できる保全」が求められている

現有する構造性能を把握し、照査する技術

KEYWORDSは、性能照査型維持管理

劣化の度合いに従い、構造安全性能の照査にメリハリ  
をつけ、重篤な判定に進むごとに、より精密かつ定量的な  
評価を実施する。





### 【ステップ1】構造安全性の事前確認

- リダンダンシー評価 FCM(Fracture Critical Member)を特定し、効率的な点検を行う。

- 地域特性を考慮した劣化シナリオによる信頼性評価  
どのぐらいの腐食まで大丈夫なのか??  
⇒信頼性評価の試行

7/12

### 【ステップ1】構造安全性の事前確認

#### 地域特性を考慮した劣化シナリオによる信頼性評価

腐食による断面欠損は問題ないか?

ここに断面欠損があると、柱として照査した場合に許容応力度オーバー  
余裕がない部位なので、断面欠損が認められると即OUT!

①鉛直方向応力度分布 ②せん断応力度分布

8/12

### 【ステップ1】構造安全性の事前確認

残存板厚および抵抗面積		許容応力度設計	信頼性指標 $\beta$
ts mm	tw mm	安全率	( $\sigma_M=0.2\text{mm}$ )
22	9	1.72	4.67
22	6	1.62	4.34
22	4	1.55	4.09
22	2	1.48	3.82
20	2	1.35	3.24
18	2	1.23	2.55
16	2	1.10	1.70
14	2	0.97	0.64

⇒ISOの目標  $\beta=3.8$

$\beta$ 指標の算出はAFOSM法 (Advanced First-Order Second Moment Method)

9/12

### 【ステップ2】: 定期点検

安全のためにできる、すべてのことを。NEXCO中日本

vol.02

高速道路には、維持管理のためのもうひとつの道があります。

100% 点検アクセスの体制

10/12

### 【ステップ3】構造安全性の事後確認

- 腐食進行の情報  
50×50×2mmのワッペン型鋼材片 (SM490A)を曝露し、経過時間と鋼材の腐食量の関係を調べる。  
5年後の腐食進行を予測するためのデータとなる。
- 荷重実態の情報  
BWIMIによる荷重係数の試算。  
路線特性を考慮した活荷重の部分係数を試行できる。

11/12



### 【ステップ3】構造安全性の事後確認

- FEモデルの情報 固有値解析による支承条件の構造同定計測



#### コンピュータシミュレーションの援用

- 1) 経年解析(Aging analysis)  
[部材の腐食劣化を想定→何が起るか?  
→変状度合いとモニタリング指標のリンク]
- 2) 終局強度解析(Failure analysis)  
[2D-梁要素設計→3D-FEAで実体強度  
→どの部材の余裕が少ないか]



NEXCO  
新日本

12/12