

モニタリングデータの活用と性能照査型維持管理に向けて

APPLICATION OF MONITORING DATA AND  
PERFORMANCE-BASED BRIDGE MAINTENANCE

長山 智則\*

Tomonori NAGAYAMA

**ABSTRACT** Monitoring of structures to evaluate their actual performance as opposed to performance assumed during design phases is important in rational management of infrastructure. Load and resistance factor rating (LRFR) practiced by FHWA is considered to provide a framework to integrate such structural performance monitoring into bridge maintenance. In this paper, after brief review of LRFR, possible applications of monitoring data in the context of performance-based bridge maintenance are discussed.

**KEYWORDS**: モニタリング, 性能評価, 耐荷力

Monitoring, Performance evaluation, Load carrying capacity

## 1. まえがき

社会インフラの確実な維持管理が求められるなかで、構造物のモニタリングに対する社会の期待は従来になく大きい。構造物のモニタリングに関する研究は数十年来続いているが、近年では電気、通信、機械といった他分野の知見も動員した様々な学際的な取り組みが進められつつある。しかしながら、地震警報システムや、劣化構造物の特定変状の経過観察の目的でモニタリングが利用される例はあるものの、「モニタリング」という概念に寄せられる多様な期待（手間／コストはかかっても非破壊検査技術のように特定の橋梁の特定の形態の劣化を確実に見つけたい、どんな劣化・事故の事象でもモニタリングから見つけたい、膨大なインフラを大まかにスクリーニングしたい、等現実性は別として様々である）に対してごく一部しか実現していない。特に、「構造ヘルスマニタリング」という言葉や、機械・化学系のモニタリングから想像される、劣化進展や事故の事前検知・アラート、という側面に対しては期待のみが大きく先行しているように思われる。

インフラを長期的にマネジメントしていく上では、様々なモニタリングの中で特に、構造物の実性能を評価し、設計、施工、維持管理、補修・補強にフィードバックすることが重要と考える。設計時に想定されていない劣化・事故が少なからず生じ、補強あるいは架替が生じている現状を鑑みると、点検やモニタリングにより実性能を把握する技術や仕組みの必要性は明らかである。目視点検で対応できるものもあれば、目視では直接分からない応力、たわみ、振動数、減衰比等の物理量や、目視点検時のように一時的な調査では分からない重交通や地震／風応答の把握はモニタリングによらざるを得ないであろう。一方で、点検やモニタリングに基づいて設計／施工上の知見が充実し、様々な劣化・事故モードを設計、施工段階で確実に考慮し防ぐことができれば、新設構造物や、一旦、モニタリングや補修・補強対策をした構造物については、モニタリングの必要性を低減できるであろう。

---

\*Ph. D. 東京大学大学院准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

しかしながら、モニタリングによる実性能評価の概念はあっても具体論に乏しいのが現状であろう。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では、性能照査型維持管理にむけてモニタリングデータを活用するための調査研究をすることとしており、実性能評価の具体論を探る事が1つの重要なテーマとなる。著者は、モニタリングデータを既設橋の性能評価に取り入れ得る仕組みとして、米国における Load and Resistance Factor Rating (LRFR)<sup>1)</sup>が参考になると考えている。仕組み、枠組みができれば、その中で、精度、信頼性、汎用性、実務性向上といった個別モニタリング技術の研究開発の方向性も揃ってくるものと考えられる。

とはいえ、LRFRも2003年には既に成文化しており、Rating自体は更に歴史が長い。米国においても未だLRFRの枠組みの中で、モニタリングが実性能評価に多に利用されているかというところでもないと思う。さらに、LRFRによる評価が行われている中でも2007年8月のミネアポリスにおける落橋事故は発生した。特に事故の未然防止等リスクマネジメントの観点からはこれだけでは不十分であるが、合理的なアセットマネジメントのための評価方法と考えている。ここでは、まずモニタリングデータ活用の観点から、米国のLRFRについて述べたい。そして、更なるモニタリングデータ活用と実性能評価のための幾つかの提案と、利用可能性の高い個別のモニタリング技術を幾つか紹介したい。

なお本稿は、小委員会での検討を開始しようとしている内容に対する私見である。正確さにかける点や異なった観点もあると思われるが、今後議論を深めて行くためにぜひご指摘いただきたい。

## 2. Load and Resistance Factor Rating<sup>1)</sup>とモニタリング

米国では Load and Resistance Factor Design (荷重抵抗係数設計法)<sup>2)</sup>に対応して、活荷重を対象とした既設橋梁の耐荷力評価法である Load and Resistance Factor Rating が採用されている。最新版は2011年に AASHTO Manual for Bridge Evaluation<sup>1)</sup>として出版されている。Rating Factor (RF) は、次式に基づいて算出する。

$$RF = \frac{C-DL}{\gamma_L(LL+IM)} \quad (1)$$

ここで、 $C$ は耐力、 $DL$ は死荷重、 $LL$ は活荷重効果、 $IM$ は動荷重増幅率、 $\gamma_L$ は活荷重係数を表す。分子は耐力から死荷重を減じたもので、分母は活荷重である。2年に一度の橋梁点検時に、強度限界状態と使用限界状態についてそれぞれ RF 値を算出し、1よりも小さい場合は、荷重制限や補強などの対応が必要となる。この Load Rating には、橋梁維持管理を合理的に、かつ経済的に行うために、目視点検やモニタリング、非破壊検査から得られる状態や実性能の評価結果を反映する仕組みがある。

まず、強度限界状態の Load Rating における耐力 $C$ は、点検・検査結果に基づく公称部材耐力 $R_n$ 、状態係数 $\phi_c$ 、システム係数 $\phi_s$ 、LRFD 抵抗係数 $\phi$ を用いて $C = \phi_c \phi_s \phi R_n$ と表されるが、状態係数 $\phi_c$ には、橋梁点検時に評価される健全性に基づいて0.85-1.00の値が使われる。つまり、健全性が低い場合には耐力を15%減じて評価する。このように耐力を低減して評価する背景として、部材劣化とともに不確実性と耐力のばらつきが大きくなること、そして、劣化部材は健全部材と比べて劣化進行が速いため次の点検までの間に劣化が進行し得ること、が挙げられる。一方で、部材特性が正確に求められれば、不確実性を低減できることから、断面形状等の実測から公称部材耐力を求めれば、状態係数が1を上回らない範囲で、0.05割り増して良いことになっている。モニタリングにより、公称部材耐力を求めたり、その不確実性を低減したりできれば、Load Rating 上は、部材耐力 $R_n$ と、状態係数 $\phi_c$ の観点から有利に扱うことができる。

次に、動荷重増幅率であるが、通常は現地の舗装状態を反映せずに一律に33%に設定されているが、舗装状態がよい場合は、10%-20%に低減することができる。これは、プロファイル計測値や国際ラフネス指標 IRI、平坦性といった指標を要求するものでなく、橋梁点検者の目視判断により舗装・ジョイントの状態を反映できるものとなっている。さらに車両走行試験を行って動荷重増幅率を実計測から求めることもできる。

活荷重については、設計時に75年間の活荷重変動を見越して活荷重係数を設定しているのに対して、設計時の活荷重係数による評価でRF値が1を下回る場合は、向こう5年間の活荷重を対象としたより小さな係数で評価し直すことができる。さらに、Weigh-In-Motion等を利用して実交通荷重を計測し活荷重係数 $\gamma_L$ に反映することができる。交通量の季節変動、曜日による変動等を考慮した交通荷重の実態を把握して、それに基づいた活荷重係数を用いる。なお、交通量が少ない場合、活荷重係数が小さくなるものの、場合によっては活荷重係数が大きくなることもあり得る。

さらにProof Load Testを実施して、RF値自体を割り引いたり、割り増したりすることができる。Proof Load Testでは主に、設計時に安全側に仮定している荷重分配効果や前述の動荷重増幅率の実測による推定がなされる。

以上のように、LRFRにはモニタリングデータを耐力評価に反映し得る仕組みがある。変状・損傷を見つけ評価するだけでなく、設計時には安全側に仮定せざるを得ない様々な変数も、実測や点検を通じて、また、より短い期間を対象として、現在の実性能で評価し、信頼性理論に基づいて合理的に橋梁を管理しようとするものである。

### 3. モニタリングを活用した性能評価の可能性

今後、Load Ratingの考え方を参考に、鋼構造物の維持管理にモニタリングデータを活用していく場合、例えば次のような取り組みが考えられる。

#### 3.1 性能評価の枠組みに関するもの

公称部材耐力をモニタリングや非破壊検査により求める場合、前述のように実測に基づく公称部材耐力評価では現状では、状態係数 $\phi_c$ を0.05割増せることになっている。しかし、必ずしも信頼性高く耐力評価できる技術や状況ばかりとは限らない。モニタリング技術や非破壊検査技術自体の信頼性を部分係数の一部として評価に取り込めば、様々な信頼性、特性をもつモニタリング技術、非破壊検査技術を利用して同じ尺度で、式(1)に従って評価できると考える。

次に、地震、台風等の災害が多い我が国では、活荷重のみならず、地震荷重、風荷重に対する実性能の評価にモニタリングデータを反映できるよう、Load and Resistance Factor Ratingの考えを応用できればと思う。米国においても耐震性能の評価については別途Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridgesがあるが、イベントに対するモニタリングデータの扱いも何らかの形で含める事が必要と思われる。耐震・耐風性能は、減衰比、地盤条件、空力特性等の想定に大きく依存するため、モニタリングから不確実性を低減して実性能を評価する方法論<sup>3),4)</sup>が必要であろう。

さらに現在のLoad Ratingにおいて、客観性、相対的整合性にかける部分にモニタリングを活用することが考えられる。例えば、動荷重増幅率の決定においては、必ずしもプロファイル計測値やIRI、平坦性、ジョイント段差量等の計測値は必要でなく、点検者の主観により実情を反映することとなっているが、ここにモニタリング技術を活用して値を決定することができれば、Ratingの客観性および多数橋梁評価における相対的整合性や経時的整合性が向上する。著者も車両応答を利用して路面乗り心地やジョイント段差量を評価する研究を進めており、安価に簡単に、かつ頻繁に路面状態を把握する技術は現実のものとなってきている<sup>5)</sup>。なお、舗装の維持管理においてはIRI値を指標として性能照査型維持管理契約を交わし、そのコストを低減したとみがいいくつかある<sup>6)</sup>。橋梁においては明確で簡易な管理値による性能照査型維持管理契約には至っていないと理解しているが、客観的かつ整合的にRF値を算出できれば橋梁を対象とした性能照査型維持管理契約にも利用できるのではないかと考える。

Proof Load Testingにおいては、荷重車走行時あるいは静止時における歪計測をし、荷重分配などを確実に把握することができるが、歪ゲージの貼り付け、配線などの手間、コスト、時間がかかるため実施橋梁は限られる。著者らは、無線センサノードに応力聴診器を接続し、多点の歪応答値を同時に簡易に計測出来る仕組みを構築している(図-1)<sup>7)</sup>。従来の応力聴診器は一点だけで計測するケースが多かったが、複数点で同期して計測することで、荷重分配の実態を簡易に評価できる。Proof Load

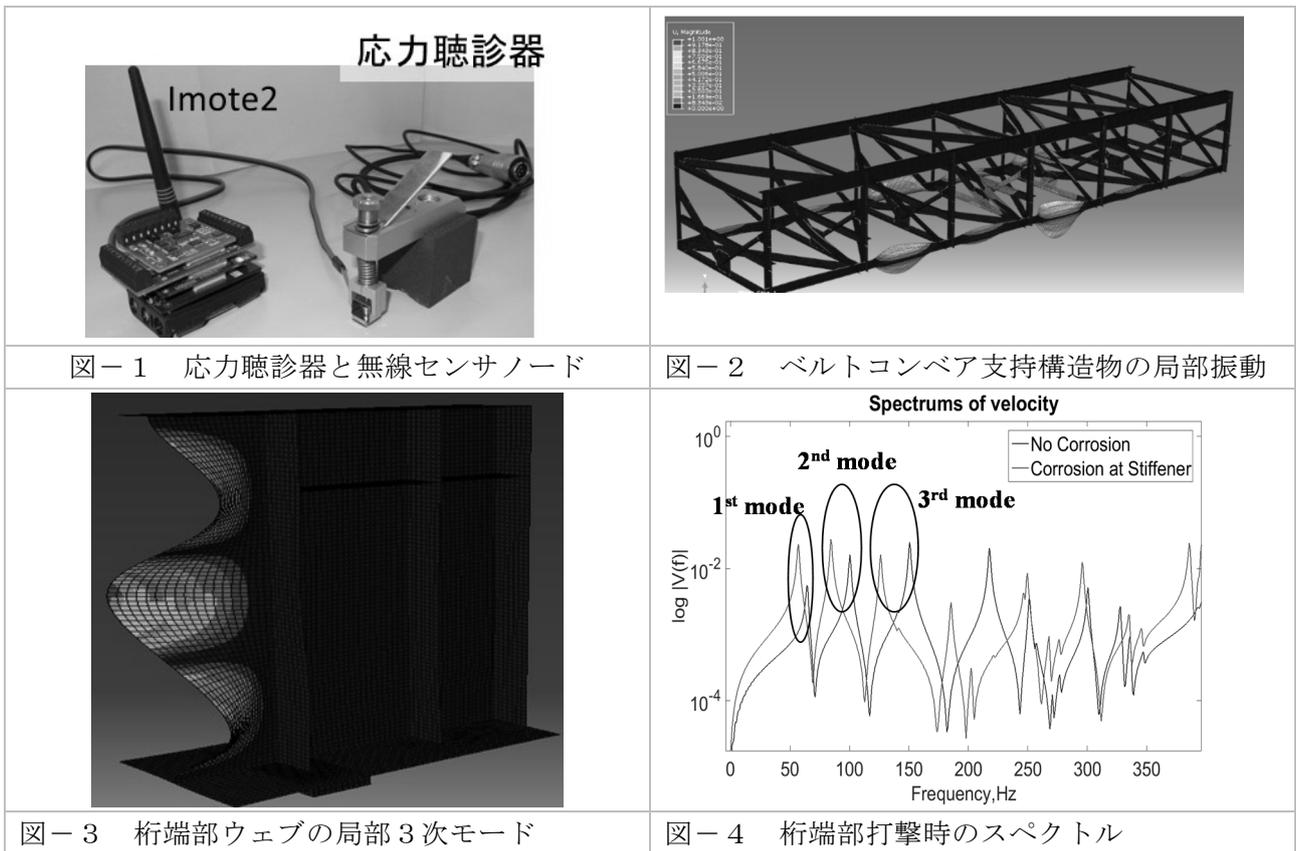


図-1 応力聴診器と無線センサノード

図-2 ベルトコンベア支持構造物の局部振動

図-3 桁端部ウェブの局部3次モード

図-4 桁端部打撃時のスペクトル

Testing の費用が低減する一方で、それによる RF 値の割増、割引など効用が明らかになれば、Proof Load Test を利用した応力状態の把握が進み得ると考えている。

### 3.2 耐荷力評価技術に関するもの

著者らはこれまで、腐食したベルトコンベア支持構造物を対象にして、局部振動（部材振動）に基づく部材耐力評価手法を開発してきた<sup>8)</sup>。構造物の固有振動数は、質量と剛性によって決まるため、剛性低下を伴う構造劣化は固有振動数の変化として現れるとの考えから、振動数変化を詳細に調べる取り組みは古くからある。しかしながら、一般に固有振動数は構造劣化に対する感度が低く、状態変化を捉える事が難しい。まして、部材耐力へ変換することは困難であった。しかし、極めて多数存在するモード群の中から特定の局部振動に着目すると、局所的な変状に敏感であることがわかった。そこで、この局部振動を励起・抽出し、各部材の等価剛性、板厚、耐荷力を推定する仕組みを開発している（図-2）。

この部材耐荷力評価法を橋梁にも応用して、桁端部の耐荷力評価に取り組んでいる。局部振動はどのような部材にも存在するわけではないし、板厚やガセットプレート等の詳細にも依存するため、適用可能な部材は限定的であるが、桁端部ウェブや端部補剛材に局部振動が存在するケースがある（図-3）。この局部振動の振動数は腐食量に対して敏感に変化する。図-4はウェブ下部に局所的な腐食を想定した減肉をモデル化し、ハンマー打撃後の速度応答のスペクトルを計算したものである。明らかな振動数変化が確認できる。様々な腐食レベルに対して局部振動数が図-5のように求められる。一方で、耐荷力解析を経て、腐食量に対して耐荷力が得られる（図-6）。ここでは支点位置上部に鉛直载荷した場合の直応力に対する耐荷力を示している。両者をあわせると、局部振動の振動数から耐荷力を推定できる。

このことを利用して、点検時に小型加速度計を桁端部の部材表面に一時的に貼り付け、ハンマー打撃することで、簡易に耐荷力推定する方法を目指している。現地で腐食桁端部の板厚を測定するには

手間がかかる一方で、腐食量を正確に把握できるとも限らない。腐食が目視確認される桁端部には全て適用出来る程度に簡易で、耐荷力を一定の精度で推定する技術が求められる。局部振動を用いる方法は、腐食形状により耐荷力推定精度にばらつきがあるものの、目視情報との組み合わせによる推定精度の向上や、耐荷力推定の信頼性も部分係数に加えるなどして、評価手法として確立したい。

次に、走行車両応答を計測・解析することで橋梁固有振動数を推定する取り組みについて紹介したい<sup>9)</sup>。一般的に亀裂や腐食などの個別変状に対する橋梁全体系固有振動数の感度は低いが、金属支承の固着など境界条件の変化に対しては振動数が少なからず変化する。支承が固着すると、桁端部近くの応力状態が変化し、場合によっては亀裂や局部座屈の発生に至るため注意が必要である。ここで紹介する、車両応答を利用した橋梁固有振動数同定は、多数橋梁の支承固着状況を判断する効率的な方法として応用可能な技術である。

車両加速度応答から橋梁固有振動数を同定する試みは従来からあるものの、プロフィールに由来する振動成分、車両ばねに由来する振動する成分などにより、橋梁固有振動数成分をロバストに抽出することが実務上は困難であった。図-7に車両応答加速度のスペクトルを示すが、橋梁固有振動数以外にも、確かに多数の卓越するピークがある。そこで、複数車両を利用して加速度応答を同期計測し、両車両の信号の共通成分を抽出することで、橋梁固有振動数同定性能の向上を図った(図-8)。実橋梁で2台の車両に同期加速度計測システムを設置して、走行試験を行った。図-9(a)には、各車両の鉛直加速度応答パワースペクトルを示すが、明瞭な橋梁振動のピークは見られない。しかし、両信号のクロススペクトル(図-9(b))をとると、共通する成分として明瞭な橋梁振動ピークが現れる。1回の走行による固有振動数同定値の精度は必ずしも高くなく平均化が必要があること、他のピークを誤同定するケースが依然として存在すること、等は今後の検討課題はある。多数の橋梁の固有振動数を頻繁に更新、管理することで、支承固着状態を準リアルタイムに判別できる可能性があると考えている。

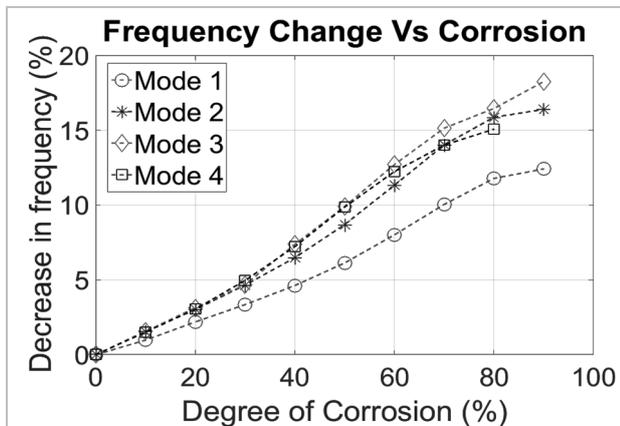


図-5 腐食量と局部振動数変化

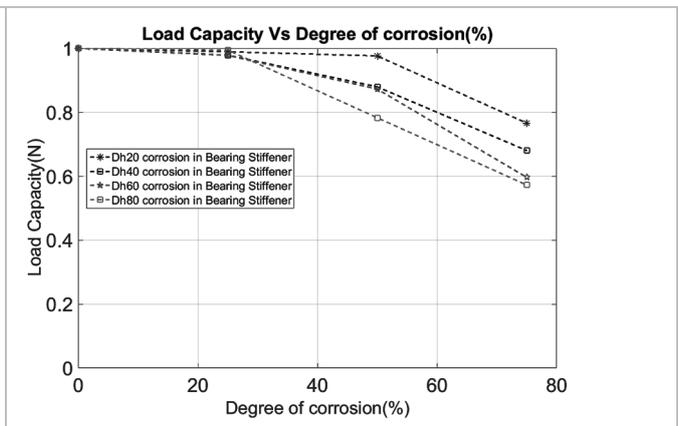


図-6 腐食量と耐荷力変化

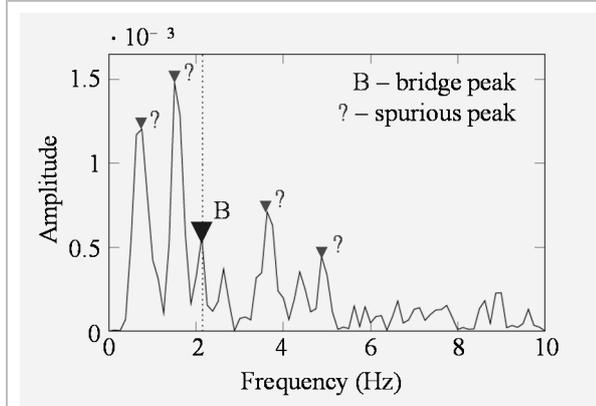


図-7 車両応答加速度スペクトル

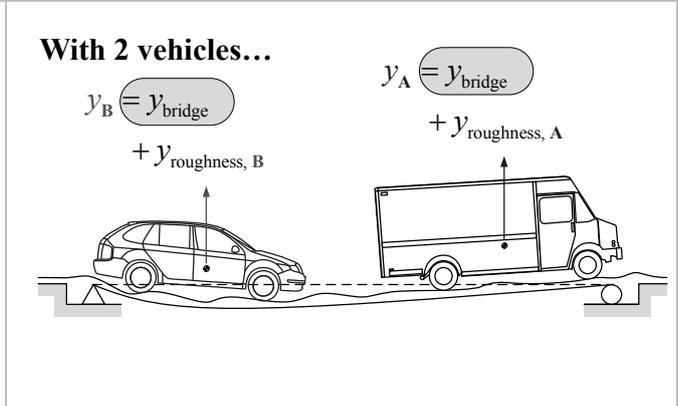
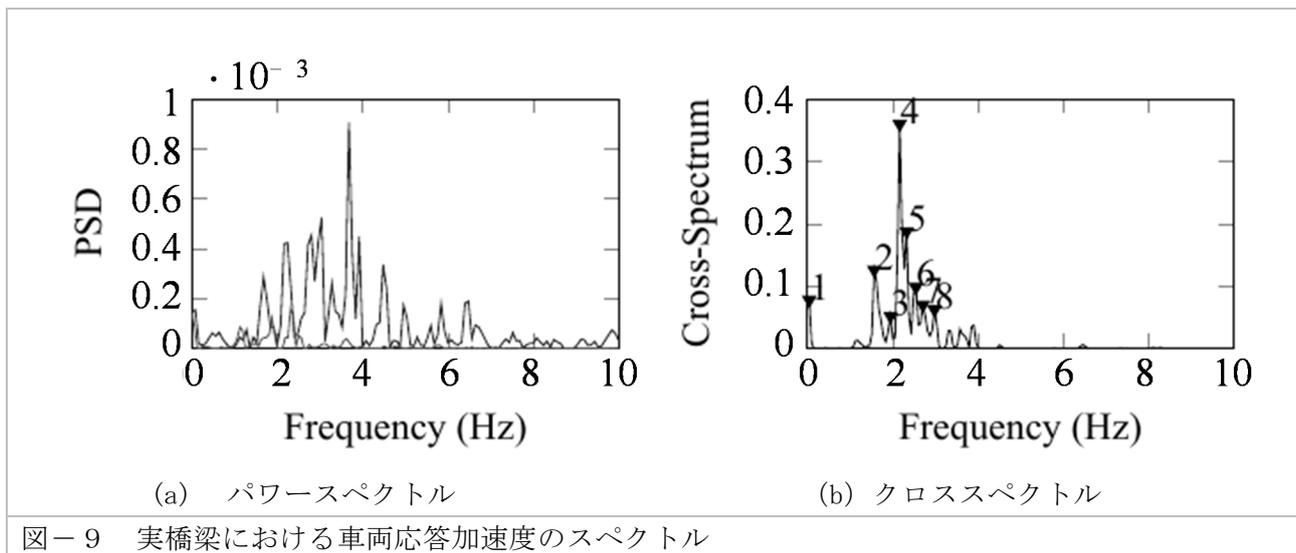


図-8 2車両の加速度応答に共通する橋梁振動



#### 4. まとめ

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では、モニタリングデータを活用した実性能評価の具体論を探る事が1つの重要なテーマとなる。これまで述べてきたように米国におけるLRFRの枠組みが参考になる。一方で、Load Ratingを長く実施している米国でも課題は多く、現実に落橋事故も起きている。モニタリング等が解決する課題、設計、施工、補修・補強等に対応すべき課題、それらにフィードバックすることで解決する課題等整理しながら、取り組んでいきたい。

#### 参考文献

- 1) AASHTO: Manual for bridge evaluation (2nd edition) with 2011, 2013, 2014 and 2015 interim revisions
- 2) AASHTO: AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S. units, 7th edition, with 2015 interim revisions
- 3) Siringoringo, D.M. and Fujino, Y.: Seismic response analyses of an asymmetric base-isolated building during the 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake, Struct. Control Health Monit., DOI: 10.1002/stc.1661, 2014
- 4) Nagayama, T., Abe, M., Fujino, Y., and Ikeda, K.: Structural identification of a non-proportionally damped system and its application to a full-scale suspension bridge, Journal of Structural Engineering, 131(10), pp1536-1545, 2005.
- 5) Nagayama, T., Miyajima, A., Kimura, S., Shimada, Y., and Fujino, Y.: "Road condition evaluation using the vibration response of ordinary vehicles and synchronously recorded movies," Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2013, Proc. of SPIE volume 8692, San Diego, USA, 2013.
- 6) 水野 高志: PPP 最新事情 米国の性能規定型維持管理契約(PBMC)の概要と我が国への示唆—道路の維持管理業務を題材として, 土木技術, 66 (3), pp.54-58, 2011.
- 7) 巨大構造物ヘルスマニタリング~劣化のメカニズムから監視技術とその実際まで~, エヌティエーエス, 2015
- 8) Rana, S., Nagayama, T., Hisazumi, K., and Tominaga, T.: A Numerical Study on Corrosion Damage Detection of Belt Conveyor Support Structure based on Cross Sectional Vibration Characteristics, Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Applied

*Sciences*, Hokkaido, Japan 2015.

- 9) Nagayama, T. Reksowardojo, A. P., Su, D., Mizutani, T., and Zhang, C. : Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles, Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering and 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Urbana, USA, 2015.

# モニタリングデータの活用と 性能照査型維持管理に向けて

東京大学大学院工学系研究科  
准教授 長山智則

## 橋梁点検・モニタリングと性能評価

- 米国における既設道路橋の性能評価の枠組み  
Load and Resistance Factor Rating

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)}{\frac{(\gamma_{LL})(LL + IM)}{AASHTO, \text{ Manual for bridge evaluation}}}$$

耐力-死荷重  
活荷重

For the strength limit states:  $C = \phi_c \phi_s \phi_R R_n$

For the service limit states:  $C = f_R$

- $RF$  = Rating factor
- $C$  = Capacity
- $f_R$  = Allowable stress specified in the LRFD code
- $R_n$  = Nominal member resistance (as inspected)
- $DC$  = Dead load effect due to structural components and attachments
- $DW$  = Dead load effect due to wearing surface and utilities
- $P$  = Permanent loads other than dead loads
- $LL$  = Live load effect
- $IM$  = Dynamic load allowance
- $\gamma_{DC}$  = LRFD load factor for structural components and attachments
- $\gamma_{DW}$  = LRFD load factor for wearing surfaces and utilities
- $\gamma_P$  = LRFD load factor for permanent loads other than dead loads = 1.0
- $\gamma_{LL}$  = Evaluation live load factor
- $\phi_c$  = Condition factor
- $\phi_s$  = System factor
- $\phi_R$  = LRFD resistance factor

## モニタリングによる評価更新: 耐力 $C = \phi_c \phi_s \phi_R R_n$

- 健全性に応じてCondition Factorを修正

Table 6A.4.2.3-1—Condition Factor:  $\phi_c$

Structural Condition of Member	$\phi_c$
Good or Satisfactory	1.00
Fair	0.95
Poor	0.85

Table C6A.4.2.3-1—Approximate Conversion in Selecting  $\phi_c$

Superstructure Condition Rating (SI & A Item 59)	Equivalent Member Structural Condition
6 or higher	Good or Satisfactory
5	Fair
4 or lower	Poor

- 非破壊検査等に応じて $R_n$ を修正

## モニタリングによる評価更新: 動的増幅率 Dynamic Load Allowance IM

通常はIM = 33%だが、路面状態に応じて割り引く

Table C6A.4.4.3-1—Dynamic Load Allowance:  $IM$

Riding Surface Conditions	$IM$
Smooth riding surface at approaches, bridge deck, and expansion joints	10%
Minor surface deviations or depressions	20%

## モニタリングによる評価更新: 活荷重

Site-specific live load factor  
(Weigh-In-Motion等から求められる実活荷重による補正係数)

For the single-lane loading case, the live load factor for the Strength I limit state shall be taken as:

$$\gamma_L = 1.8 \left[ \frac{W^* + t_{(ADTT)} \sigma^*}{120} \right] > 1.80 \quad (C6A.4.4.2.3a-2)$$

where:

$W^*$  = Mean truck weight for the top 20 percent of the weight sample of trucks (kips)

$\sigma^*$  = Standard deviation of the top 20 percent of the truck weight sample (kips)

$t_{(ADTT)}$  = Fractile value appropriate for the maximum expected loading event—given below in Table C6A.4.4.2.3a-1

## モニタリングによる評価更新: 載荷試験

載荷試験をしてひずみ等を計測して実能力を推定  
→Rating Factorを割増・割引

$$RF_T = RF_c K \quad (8.8.2.3-1)$$

$RF_T$  = load-rating factor for the live-load capacity based on the load test result

$RF_c$  = rating factor based on calculations prior to incorporating test results (Eq. A6.4.2.1-1 should be used).

$K$  = adjustment factor resulting from the comparison of measured test behavior with the analytical model (represents the benefits of the field load test, if any)



応力聴診器  
磁石で取付可能な  
ひずみ計測用無線  
ノード

Load and Resistance Factor Rating

- 米国における2年に1度の点検時に適用。2年間を対象に適用。  
→設計時より緩くなり得る。
- 「良い」橋梁は目視と設計時の性能で判断。疑わしい橋梁はモニタリング、非破壊検査等も含めて詳細に。それでもRF<1の場合は重量制限
- 評価を要求しながらも、補修・重量制限を抑えられる仕組み。
- 古い設計基準の橋梁も、現在の基準で評価し直し。

課題と今後の取り組み

- モニタリング、非破壊検査法により、耐力評価の信頼性は様々。モニタリング・非破壊検査自体の信頼性も取り入れる？  
→新しいモニタリング・非破壊検査を取り入れやすくなる？
- 活荷重に対する評価のみ。地震・風荷重は？
- Load Ratingの主観的判断にモニタリングデータを活用。例えば路面状態。
- RFを使った性能規定型維持管理契約？
- 無線センサ+応力聴診器などを利用して、簡易に安価にProof Load Testingをし、荷重分配評価等できるしくみを作る？

7

耐力評価の個別技術

局部振動を利用した耐力評価  
ベルトコンベア支持構造物

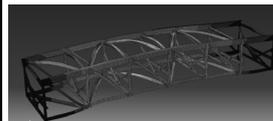
ベルトコンベア支持構造物  
のモニタリングと評価

- ◆ ベルトコンベアは製鉄所等を支える重要産業インフラ
  - ✓ 数10kmに及ぶことも
  - ✓ 一箇所止まればライン全体が止まる、産業が止まる
- ◆ 構造は複雑
  - ✓ 機械部品、歩廊、トラス。
  - ✓ 機械部品、歩廊の割合が大きい
  - ✓ 歩廊、機械部品の交換頻度
  - ✓ 類似設計だが、個別に異なる。
- ◆ 腐食が進む
  - ✓ 数10年経過
  - ✓ 粉塵により腐食が進む、腐食が見えない
  - ✓ 人的被害・経済的被害

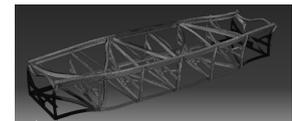
9

グローバルモード

固有値解析:

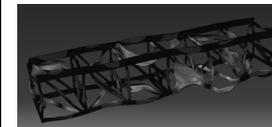


1次曲げモード, F = 42.4 Hz

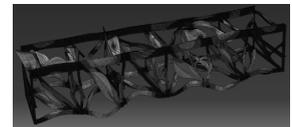


1次ねじれモード, F = 44.4 Hz

低周波数のモード



曲げ連成モード, F = 217.7 Hz



ねじれ連成モード, F = 237.4 Hz

高周波数のモード

特定の部材ではなく、(ほぼ)全ての部材が振動に寄与。局在化していない。

局部断面振動モード

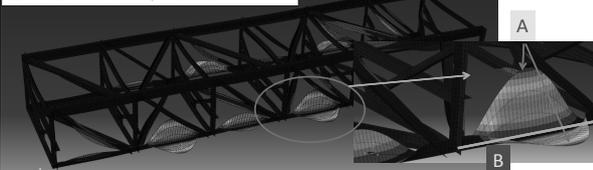
主部材のみが断面方向に大きく振動するモード

局部断面モード:

A ウェブとフランジが同位相で面外方向に振動

B 振動の節(振動レベルが小さい)

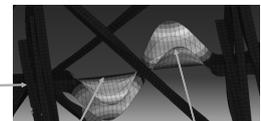
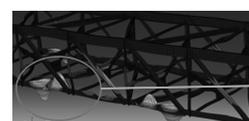
1次局部断面振動モード, F = 137 Hz



類似構造のパネルが軸方向に連続するため、振動は連成。小さな周波数帯域内に複数の断面振動モードが存在。

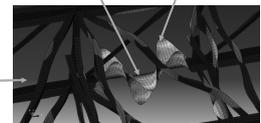
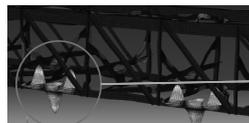
11

2<sup>nd</sup> Local Cross Sectional Vibration Mode

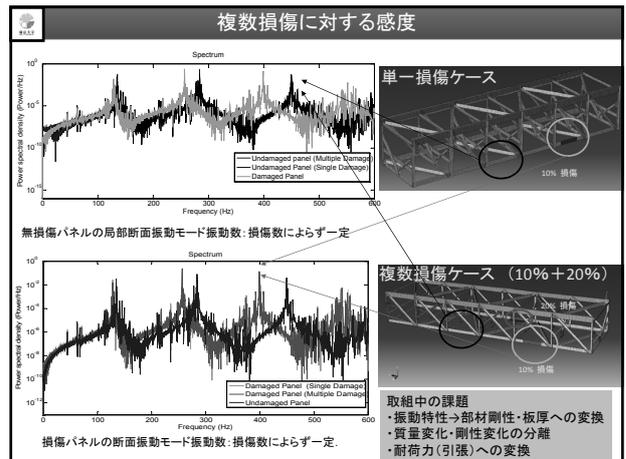
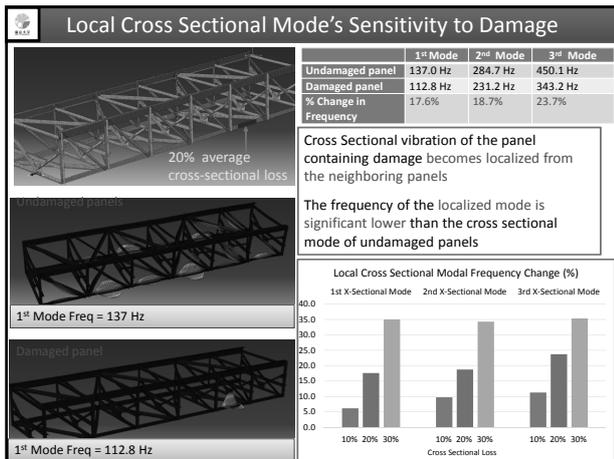


Nodal Line out of plane vibration

3<sup>rd</sup> Local Cross Sectional Vibration Mode



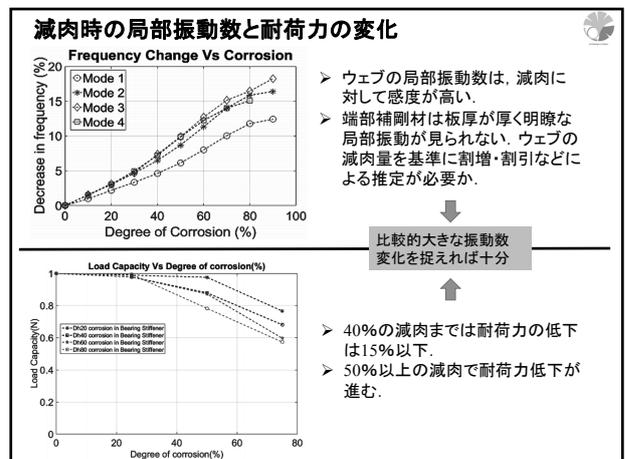
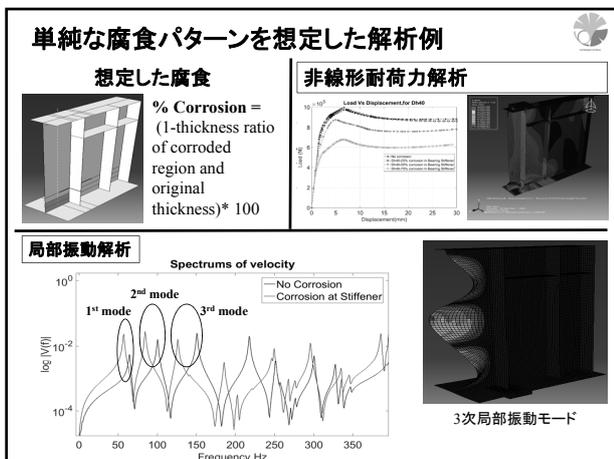
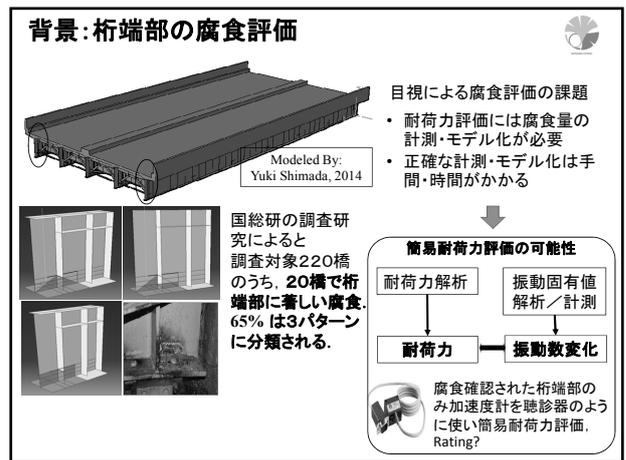
12



## 耐力力評価の個別技術

### 局部振動を利用した耐力力評価

#### 桁端部



## 耐荷力評価の個別技術

### 車両応答を利用した橋梁固有振動数評価

### Dynamic Response Monitoring System (DRIMS) -Bridge- 車両応答を利用した橋梁固有振動数の間接推定

橋梁固有振動数:

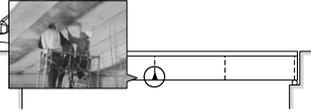
- 境界条件の変化に敏感 (金属支承の固着)
- 周期的外力に対する共振条件
- 設計と実構造物を比較する簡易指標

基本的特性量にも関わらず、実構造物の振動数はほとんど計測されていない



**振動数推定法:**

- 直接法**  
センサを対象構造物に直接設置。
- 膨大な橋梁群への適用は高価で手間がかかり非現実的



20

### Dynamic Response Monitoring System (DRIMS) -Bridge- 車両応答を利用した橋梁固有振動数の間接推定

橋梁固有振動数:

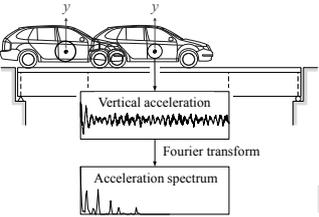
- 境界条件の変化に敏感 (金属支承の固着)
- 周期的外力に対する共振条件
- 設計と実構造物を比較する簡易指標

基本的特性量にも関わらず、実構造物の振動数はほとんど計測されていない



**振動数推定法:**

- 直接法**  
センサを対象構造物に直接設置。
- 間接法**  
センサを車両に設置. Yang (2004)
- 構造物にアクセスする必要なし
- しかし、課題も多い

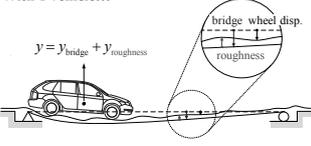
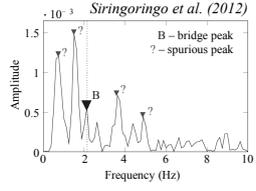


21

### Background 課題

橋梁の振動成分は、車両応答に比べて小さく、抽出・判別が容易でない。

With 1 vehicle...

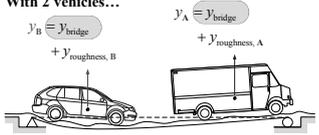
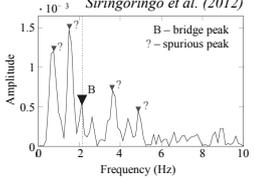



22

### Background 課題

橋梁の振動成分は、車両応答に比べて小さく、抽出・判別が容易でない。

With 2 vehicles...

橋梁振動は  $y_A$  と  $y_B$  との共通成分

**目的:** 複数車両の応答信号を利用して橋梁振動成分を抽出する。

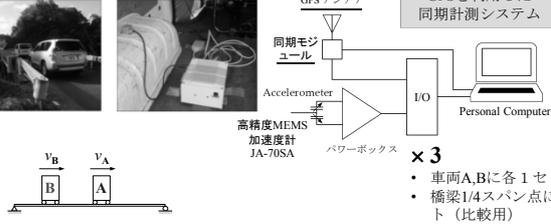
クロススペクトル法, frequency domain decomposition法, スペクトル平均法などを検討。クロススペクトル法が最も効果的

23

### Experimental test 実橋梁における走行試験

千葉県君津市月毛橋

Type	鋼箱桁 (simply supported)
Length	59 m
Total mass	260 ton

GPS アンテナ  
同期モジュール  
Accelerometer  
高精度MEMS 加速度計 JA-70SA  
パワーボックス  
GPSを利用した同期計測システム  
I/O  
Personal Computer

×3

- 車両A,Bに各1セット
- 橋梁1/4スパン点に1セット (比較用)

