

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
—橋梁ヘルスマニタリングの事例を通じた所感—APPLICATION OF MONITORING DATA AND
TOWARD PERFORMANCE-BASED BRIDGE MAINTENANCE
—IMPRESSIONS THROUGH BRIDGE HEALTH MONITORING—

宮下 剛*

Takeshi MIYASHITA

ABSTRACT Firstly, bridge health monitoring projects that author was partially responsible are introduced. Then, present bridge monitoring project is explained. Based on the experiences through these projects, necessary matters are described in order to establish Performance-based bridge maintenance in our country.

KEYWORDS: 性能照査型維持管理, モニタリング, 鋼橋

Performance-based bridge maintenance, Monitoring, Steel bridge

1. はじめに

筆者が、2015年4月から、幹事長を仰せ付かった委員会の名称は、「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」である。ここでのキーワードは、もちろん「性能照査型維持管理」と「モニタリング」であり、両者のリンクが鍵となる。ただし、現状、我が国では、これらのどちらも具現化されていなかったり、実務での展開がなされていない。ハードルは高い。

一方、海外に目を向けると、アメリカのAASHTOでは、Load Resistance Factor Rating (LRFR)として、維持管理における部分係数法の体系が一部採用されている。我が国でも、遠くない将来に、道路橋示方書が部分係数法へと移行すると耳にする。ここで、AASHTOのように、我が国の維持管理においても部分係数法の体系を整備しようとするのは理に適っており、国際競争力の観点からも重要と考える。

筆者自身がLRFRなどの限界状態設計法に関する勉強はこれからであり、これらの調査、整理が小委員会の大きな柱をなすのであるが、AASHTO Manual for Bridge Evaluationにある既設橋の耐力評価法であるLoad Ratingに関する文献を紐解くと、既設橋の耐力は、設計活荷重に対して、その何倍の耐力があるかを表すRating Factor (RF)によって評価される¹⁾。具体的にRFは、損傷劣化した部材強度から死荷重作用を減じて活荷重作用で割った量として与えられる。よって、分母における実態活荷重の評価として、Bridge Weigh-in-motionによるモニタリングを実施することは意味がある。一方、RFの分子にある部材耐力は、公称部材耐力と、状態係数、構造システム係数(リダダンシーに関する係数)、抵抗係数(抵抗側の安全係数)の積で表される。状態係数は、橋梁点検の結果を受けて決定される係数であり、無損傷時のときが1.0で、腐食による断面欠損などの損傷がある場合は最大0.85まで減じられる。状態係数にモニタリングの結果を反映することができそうである。

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

しかし、ここでも以下の問いが容易に想定される。“状態係数の決定のために何をどうやって測るのか？管理値をどのように決定するのか？”。今までと何も変わらない。そこで、本文では、この現状を多少なりとも打破するために、筆者がこれまでに行ってきた橋梁モニタリングのうち、比較的良い結果が得られたと思われるものをはじめに紹介し、その後現在の取組みを紹介する。そして、これらの経験を通じて感じた所感をもとに、「性能照査型維持管理」と「モニタリング」をリンクさせるために、必要な事項を述べたい。

2. 鉄道橋のヘルスマニタリング

鋼橋は薄板の組み合わせで構成されており、列車走行の高速化による低次モードを中心とした全体モードだけでなく、板としての振動を伴う高次モードによる振動が大きな問題となる可能性がある。このような高次モードによる局部振動は、低次モードでは励起されないような大きな局部応力を伴うことも予想され、耐久性への影響が懸念される。局部振動がどのようなメカニズムで発生するのかを把握することは、列車の高速運転への対応を考える際に極めて重要である。

ここで対象とした鋼箱桁橋は、完成後 40 年が経過した、標準的な断面を有する支間 40 m の 4 径間連続鋼一主箱桁橋である。橋梁を通過する列車は 16 両編成で、270 km/h を上限とする。本橋において、主桁ウェブの垂直補剛材下端回し溶接部に変状が発生した。この変状は列車走行に伴う振動現象が原因であると推測されたため、同一の構造ディテールを有する部位は変状の有無にかかわらず全て補強が施された（図-1）。その後、不具合は報告されていない。しかし、振動性状と局部応力との関係は明確でない点もあり、より詳細な検討が必要と考えられた²⁾。

実橋の振動現象、局部振動と局部応力、列車速度との関係を明らかにするため、補強材を取り外した状態で垂直補剛材下端部の応力と主桁ウェブの加速度、主桁下フランジの加速度の計測を実施した。主桁下フランジの応力波形には、列車全体が橋梁に載荷されることによる大きな 1 つの波形と、規則的に並ぶ 17 個のピークが見られた。後者は規則的な車軸、台車の通過によるピークであり、「連行荷重による速度効果」として知られているものである。これは台車の規則的な通過周波数が列車速度に依存するためであり、 $f_b = V/90$ で表すことができる。ここで、 f_b は列車走行時における振動のスペクトルの 1 次のピークを与える周波数 (Hz)、 V は列車走行速度 (km/h) である。これは、列車が走行するときに軸重が桁に対して、周期的に加える強制振動の周波数となる。

連行荷重による速度効果により説明される主桁の振動性状と、主桁下フランジの局部振動の関係に着目する。図-2 (a) に、主桁下フランジにおいて補強材を取付ける前に加速度計により計測した全 39

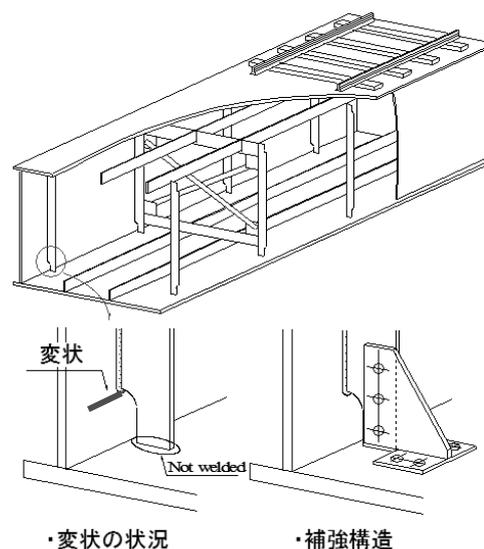
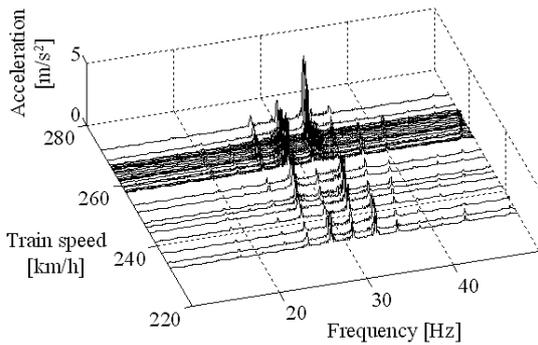
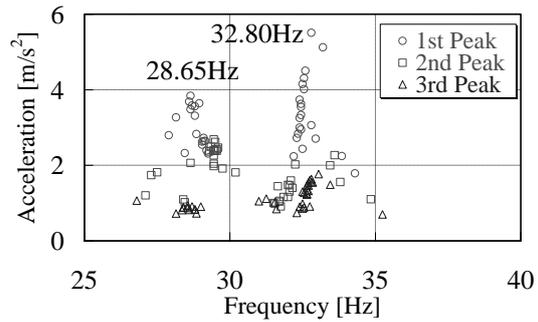


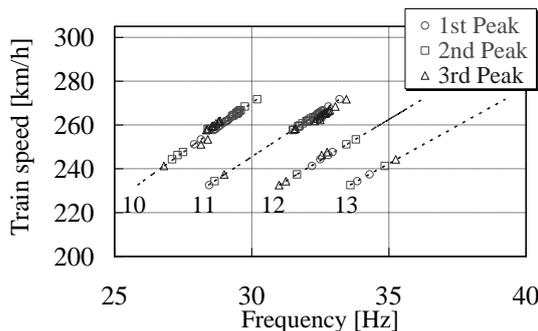
図-1 対象橋梁（鉄道橋のヘルスマニタリング）



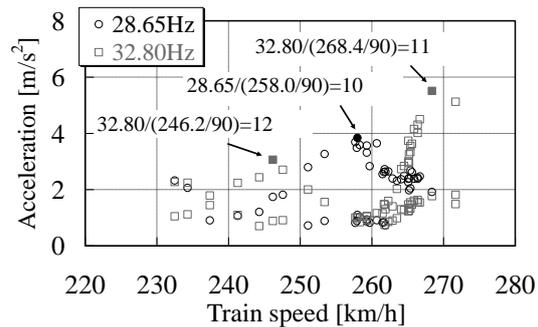
(a) 周波数－列車速度－フーリエ振幅スペクトル



(b) 周波数－フーリエ振幅スペクトル



(c) 周波数－列車速度



(d) 列車速度－フーリエ振幅スペクトル

図-2 列車走行時の主桁下フランジ加速度応答のスペクトル分析

列車分の加速度時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルを周波数－列車速度－フーリエ振幅スペクトルの関係として図示する。まず、図-2(a)において、各列車速度のフーリエ振幅スペクトルに対して上位3つのフーリエ振幅スペクトルとそのときの周波数(以下、卓越周波数)についてまとめた図を図-2(b)に示す。これは、共振曲線となる。次いで、図-2(a)を卓越周波数と列車速度についてまとめた図を図-2(c)に示す。図中、連行荷重による速度効果の式により算出された強制振動 f_b の整数倍にあたる数値線を併記した。ピーク周波数は列車速度に依存し、また、周波数 30 Hz 付近を中心として等間隔に分布していることがわかる。また、それらのプロットは f_b の整数倍(10~13倍)に一致していることが確認される。さらに、図-2(a)において、列車速度と卓越周波数におけるフーリエ振幅スペクトルについて、各固有振動数に着目してまとめた図を図-2(d)に示す。それぞれの固有振動数に対して、ある速度においてフーリエ振幅スペクトルが大きくなっているが、この時の主桁下フランジの卓越周波数は主桁の振動数の整数倍となっている。つまり、主桁の強制振動数 f_b と主桁下フランジの局部振動の固有振動数の比が整数となると、局部振動が増幅され、これに起因して変状が発生した。今回の実橋でのモニタリングを通じて、このような現象が初めて明らかとなった。

3. 道路橋のヘルスマニタリング

対象橋梁は新潟県長岡市の信濃川に架かる一般国道 351 号の長生橋であり、1937 年(昭和 12 年)に供用が開始された下路式 13 径間鋼ゲルバートラス橋である(図-3)。橋長は 850.8 m(支間長: 67.5 + 11@65.0 + 67.5 m)、有効幅員は 7.0 m、ゲルバーヒンジは偶数径間の上弦材にある。平成 7~8 年度には、ゲルバーヒンジ部の可動支承取替工と落橋防止装置設置工が実施されている。長生橋の供用期間は、75 年を超えることから、今後の維持管理に向けて、現況の把握、性能の評価のために载荷試験ならびに短期的なモニタリングが 2013 年 6 月に実施された³⁾。

計測項目は、各径間のひずみ、たわみ、加速度である。また、代表点の温度計測を P6 - P7 間の垂直

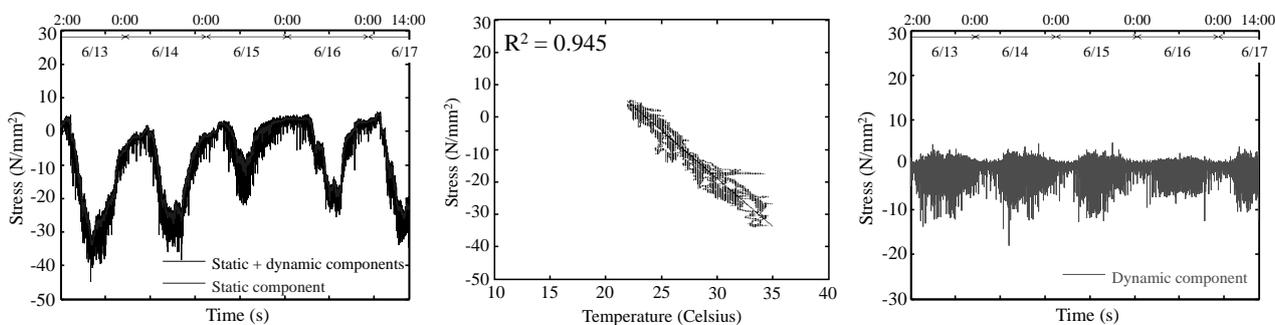
材近傍で実施した。ひずみの計測位置は、各径間中央付近の下流側にある上弦材とした。さらに、吊径間では、ゲルバーヒンジから径間中央に向けて接続する二本の下流側斜材に計測点を設けた。ひずみゲージは、軸力と二軸曲げの影響を考慮するため、各部材の各断面に四枚を貼付した。

ひずみの計測点数は、上弦材について4点/断面×1点/径間×13径間 = 52点、斜材について4点/断面×2点/径間×6径間 = 48点であり、合計100点である。これら全てをサンプリング周波数を200Hzとして同期計測することとした。モニタリングの期間は、2013年6月13日2時～6月17日14時の108時間である。また、P1～P2間に設置された雪底対策用のウェブカメラを用いて、交通流の動画撮影も実施した。本文では、計測項目のうち上弦材のひずみに着目する。

4.5 日間のモニタリングで上弦材に発生した軸力に起因する垂直応力度の最小値は、第6径間で発生した-44.6 MPaであった(図-4(a))。ここで計測結果(黒線)は、温度変化による静的な成分と活荷重による動的な成分が足し合わされたものである。そこで、両者を分離するために、各時刻で移動平均をとり、静的な成分を抽出した(図-4(a), 青線)。この結果、静的成分の最小値は、第6径間で-33.7 MPaとなった。本来、第6径間は吊径間であることから、温度変化による静的な応力成分は発生しないはずである。しかし、鋼材の線膨張係数とモニタリング期間の最大温度変化量($\Delta t = 13^{\circ}\text{C}$)を用いて発生温度応力度を計算すると、-31.2 MPaとなる。ここから、第6径間のゲルバーヒンジ可動部は、可動機構が機能していないことが分かる。温度と上弦材の静的な軸方向応力の関係図を図-4(b)に示す。さらに、計測結果から静的成分を差し引くことで、活荷重に起因する動的成分を得ることができる(図-4(c))。この最小値は、第4径間での-19.7 MPaであった。ここからも、ゲルバーヒンジの固着によって、温度による発生応力度が活荷重による発生応力度よりも卓越していることが分かる。よって、今後の維持管理においてゲルバーヒンジを補修する際は、可動部の固着が確認された径間を優先すべきと言える。



図-3 対象橋梁 (道路橋のヘルスマニタリング)



(a) 静的成分+動的成分

(b) 温度と静的成分の関係

(c) 動的成分

図-4 上弦材の軸方向応力

4. 高速道路における橋梁モニタリングの取組み

2014年7月20日に、舞鶴若狭自動車道の小浜IC～敦賀JCT区間が開通した。これに先立って、新設橋梁の初期値取得という観点から、舞鶴若狭自動車道の新規開通区間にある全45橋（148径間）に対して、開通前に、バッテリー駆動が可能なポータブル振動計を用いて単点の振動計測を実施した。その結果として、図-5に示す径間長 L と1次固有振動数 f_1 の関係図を得た。径間長と固有振動数は、剛結構造であるポータルラーメン橋を除いて、多少のばらつきが見られるものの、道路橋耐風設計便覧⁴⁾にある径間長と1次固有振動数の関係式($f_1 = 100/L$)に概ね従うことが確認できる。

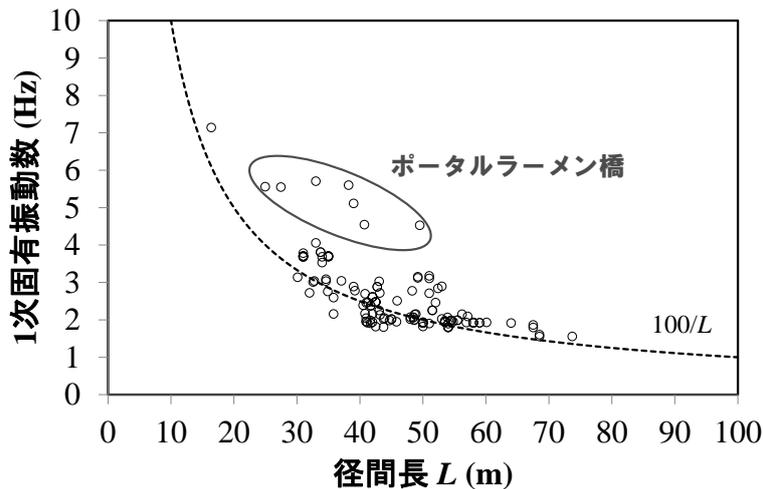


図-5 径間長 L と1次固有振動数 f_1 の関係

周知のとおり、剛性の変化に対しては、固有振動数よりもたわみの方が感度が高い。一方、計測実施の観点からは、たわみの計測では不動点を必要とするのに対して、加速度計測はセンサを設置するのみで良い。作業期間の制約があり、後者の観点から加速度計測を実施したのであるが、この結果を橋梁点検の高度化へとどのように役立てられそうかについて、この際、方法論の妥当性はいったん脇に置いて考察を加えたい。

はじめに、固有振動数は温度に依存して変動することが知られている。この変動幅を把握する必要がある。そして、この変動幅を超えるような損傷イベントと程度を同定する必要がある。後者に対しては、同じ構造形式で、損傷程度が異なる複数の橋梁を徹底的に計測することで、合理的な維持管理に資する効果的なモニタリングの計測量、管理値が見えてきそうな気がする。あるいは、将来的にはCIM (Construction Information Modeling) と連携させたFEAモデルに、その橋梁の架設地点における損傷シナリオを考慮した損傷を導入して、固有振動数、たわみ、ひずみなどの損傷イベントならびに損傷程度と変化量の関係を把握することが考えられる。

本検討会では、損傷とモニタリング量の関係性把握を目的として、いくつかの鋼2主桁桁橋を対象にFEAモデルを作成し、桁端部の腐食、疲労き裂、床版のASR劣化を考慮して、固有振動数、たわみ、ひずみの変化を確認した^{5),6)}。この結果、固有振動数は、コンクリートのASR劣化に伴ってヤング係数が大きく低下する場合には有効そうではあるものの、その他の損傷については感度がやはり非常に低い。

次に、固有振動数の温度に対する変動幅を把握することを目的として、舞鶴若狭自動車道にある鋼2径間連続2主桁桁橋（橋長119 m = 60.1 m + 56.9 m）に、複数個の加速度計（航空電子MEMS型JA-70SA）を設置して、長期遠隔モニタリングを試行している。この橋梁では、振動モードを把握するために、事前に現地振動試験を実施しており、その結果として得られた振動モード形を図-6に示す。

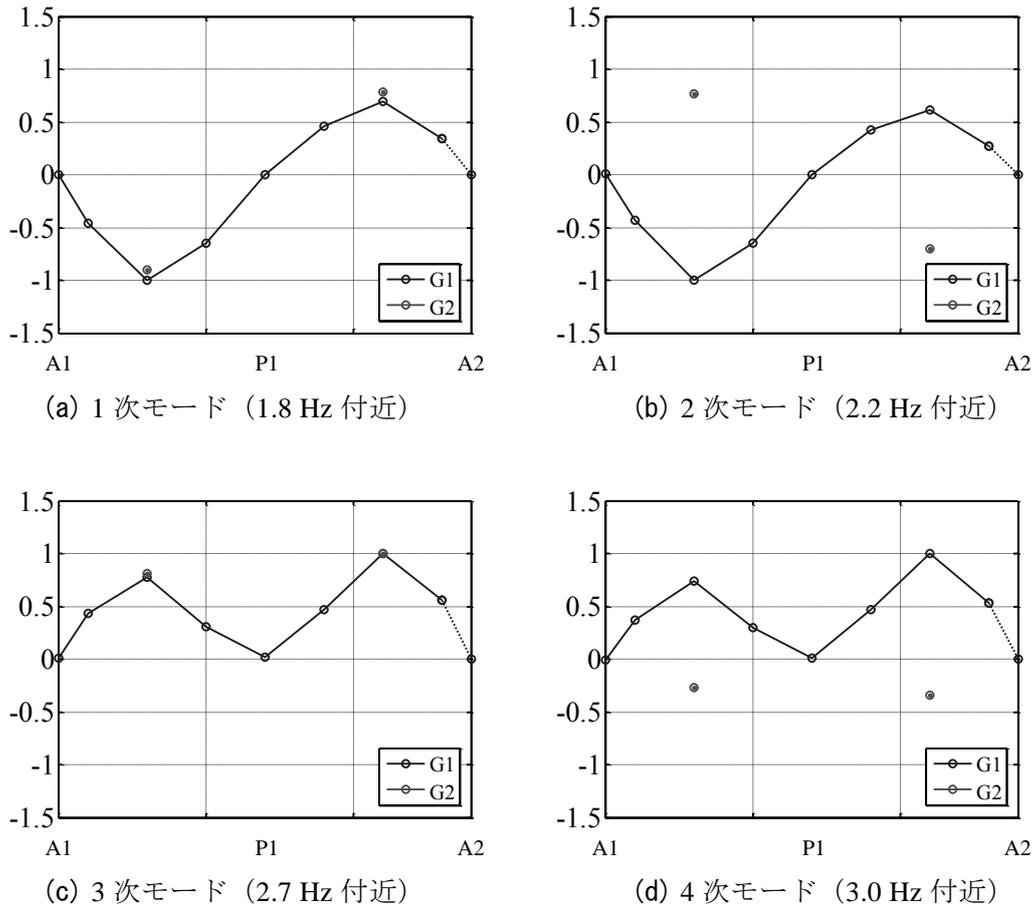
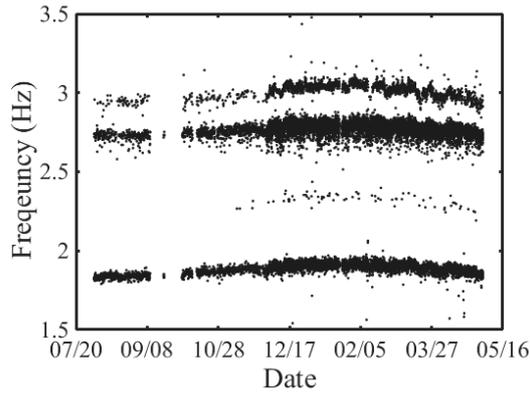


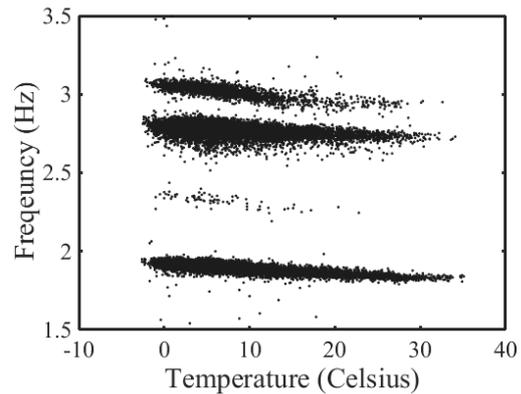
図-6 同定された振動モード形

モニタリングの開始は、2015年8月1日からであり、はじめは1時間に10分間の計測としていたが、12月1日以降は常時モニタリングとしている。設置した加速度計は、1軸加速度計が10個、三軸加速度計が2個であり、サンプリング周波数を1000 Hzとしている。10分間ごとに作成されるテキストファイルの容量は約90 MBであり、現地からインターネット回線を用いてファイルを転送するには時間がかかりすぎることから、TeamViewerというソフトウェアを利用して、現地に設置した計測用PCに遠隔的にアクセスし、その場でデータ分析を行って、固有振動数や最大加速度、加速度RMSなど、必要な情報のみを手元に転送している。

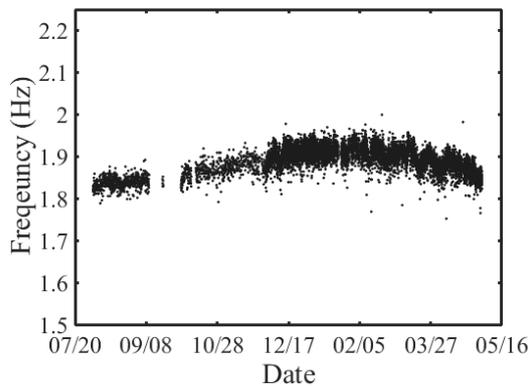
このようにして得られた鉛直方向の振動に関する固有振動数の時刻歴の一例を図-7(a)に示す。分析対象とした計測データの期間は2014年8月1日～2015年5月2日の約9カ月である。また、現地に設置した温度計と付近の気象庁観測点で観測された温度に高い相関性があることを確認した上で、温度と固有振動数の関係を図-7(b)に示す。最高温度と最低温度は、それぞれ35.1℃と-2.6℃である。図-7(a)は自由交通流下で、10分間の時刻歴波形に対して周波数解析を実施して得られるフーリエ振幅スペクトルにおいて、10 Hz以下の周波数のうち、フーリエ振幅の最大ピークを与える周波数を抽出したものである。これは、車両や衝撃の影響を含むため、厳密には橋梁の固有振動数とは異なるが、外乱がランダムであると見なすと、データ数が多くなると中心極限定理に従って、平均値が橋梁の固有振動数を与えると考えられる。



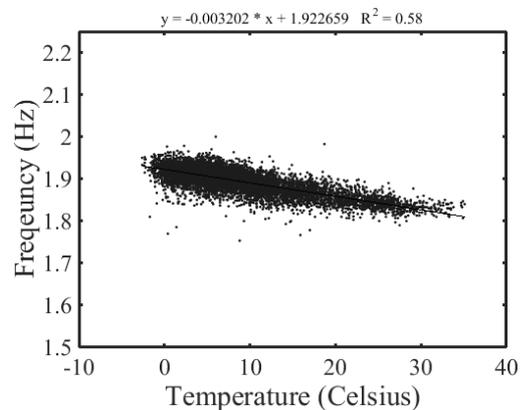
(a) 固有振動数の時刻歴



(b) 温度と固有振動数の関係



(c) 1次固有振動数の時刻歴



(d) 温度と1次固有振動数の関係

図-7 固有振動数の時刻歴と温度と固有振動数の関係

そして、固有振動数のうち、抽出する振動数の範囲を 1.75 Hz から 2.05 Hz として、1 次固有振動数のみを抽出すると図-7(c)、図-7(d)のようになる。温度 T と 1 次固有振動数 f_1 の決定係数は最も大きいところで 0.58 (抽出データ数は 8443) であり、両者の関係式は下記で与えられる。

$$f_1 = -0.003202T + 1.922659 \quad (1)$$

いま、最大の温度変化 ΔT は、 $35.1 - (-2.6) = 37.7^\circ\text{C}$ であり、式(1)を用いると、 $T = 35.1^\circ\text{C}$ のとき $f_1 = 1.8103 \text{ Hz}$ 、 $T = -2.6^\circ\text{C}$ のとき $f_1 = 1.9310 \text{ Hz}$ となるので、固有振動数の低下率は $1.8103/1.9310 = 0.9375$ から、6.25%の低下となる。さて、この固有振動数の変化は何に起因するものなのだろうか？筆者だけが知らないのかと思い、方々に話を聞いてみると、(a) 温度変化によって径間長 L が変化したことによる影響、(b) 温度変化によってアスファルトなどの物性 E が変化したことによる影響、(c) 可動支承の固着によって、温度変化による伸縮が阻害されて梁の軸力 N として導入される影響などと話があがってくる。

ここで、単純梁の固有振動数の式にもとづいて簡単な計算を行ってみると、(a) について 6.25%の固有振動数低下を引き起こす伸縮量の変化は 2 m 程度となり、非現実的である。次に、(b) については、ヤング係数が 12% 程度低下することに相当する。(c) については、支承が動かないことで梁に圧縮軸力が導入されて約 12%の曲げ剛性が低下したことに相当する。別途、対象橋梁で実施した(ゴム)支承の水平変位計測からは、温度変化に応じた水平変位が理論値どおりに生じることが分かっている。ここから、消去法的にはあるが、可能性として(b)が残されるが、確たる計測データを得るまでには至っていない。

5. まとめ

以上を通して述べたいことは、実橋梁においてその挙動が十分に把握されているのだろうか？ということである。分かっているようで、分かっていないのではないだろうか？周知の通り、「観測」は科学の重要な柱をなす。良くわからない事象や現象については、それらの理解に向けて“まるで子供のように”まずは事象や現象を良く見てみるのが大切な姿勢と思われる。このプロセスが欠けると、性能とリンクさせるモニタリングは難しいように感じる。

管理者や事業者は、費用対効果を常に意識せざるを得ない。このため、計測データはいらぬ、白か黒の判断のみが必要である、との意見もある。これに対して筆者は、実務への適用に向けてはまだ課題があるものの、**図-9**に示すセンサを提案としたい。これは、ボルトのワッシャーのように活用できる小型ロードセルであり、ロードセルのコバに導光路を設けて軸力の大きさをLEDを点灯させることが可能である。LEDの点灯は、軸力の減少あるいは増加のどちらにも対応ができ、道路構造物ではトンネル内のジェットファンなど、近接が困難な箇所への適用が想定される。例えば、点灯させることで、パトロールによる日常点検で、定期点検相当が可能になると考える。

このセンサの開発体験を通して感じたのは、土木分野以外のプレイヤーが参画することで、これまでは無い、世の中をドラスティックに変革させる技術が開発できるのではという感触である。文献7では、外資系コンサルタントの立場から、世界的に最もイノベティブな企業群の分析を通じて、「本質的な発見によって新しいパラダイムへの転換を成し遂げる人間の多くが、年齢が非常に若いとか、或いはその分野に入って日が浅いかのどちらかである」、「異なる分野のクロスオーバーするところにこそイノベティブな思考が生まれる」との指摘がなされている。自らがパラダイムの転換を起こすなどとは、到底おこがましいのであるが、個人的な経験では、炭素繊維シートを用いた鋼構造物の補修の研究^{8),9),10)}では、橋梁振動で学んだ解析方法を活用している。

委員会の立ち上げでは、筆者がお付き合いさせて頂いている耐荷力とモニタリングの比較的若手の専門家にお声掛けをさせて頂いた。この中には、両分野の研究を実施されている先生方もおられるが、筆者は両分野の研究者が一堂に会して議論する場というのは少ないように感じていた。ここでも、完全な異分野ではないものの、クロスオーバーを通じたイノベーションを期待したい。

しかし、**図-9**に示すセンサは最終的な“見せ方”の部分でもある。その前に、橋梁モニタリングに



図-9 ボルト締結力監視センサ

おける計測量，管理値などを明確にする必要がある。このためには，短期的な視点ではなく，長期的な視点に立って，新しい技術を自由に気兼ねなく，誰でも試せるフィールドや体制が必要なのではないだろうか？いまから 20 年近く前になるが，私が学生のときに話を聞いて，胸を躍らせた「スマートブリッジ」は実現しているのだろうか？中国や韓国には，非常に多くのセンサが設置された橋梁¹¹⁾があるが，個人的には，これらがスマートであるとは思えない。必要がなければ無意味な橋梁モニタリングは，当然必要ないと思うが，日本発の「スマートブリッジ」の実現に向けた取り組みが，産官学が一体となって，現場で実施されているだろうか？筆者の郷土の偉人である山本五十六の「やってみせ，言って聞かせて，させてみせ，ほめてやらねば，人は動かじ」という有名な言葉が胸に沁みる。

謝辞

鉄道橋のヘルスマニタリングでは，横浜国立大学 藤野陽三 上席特別教授(研究当時 東京大学教授)，双葉鉄道工業(株) 関雅樹氏(研究当時 東海旅客鉄道(株))，東海旅客鉄道(株) 庄司朋宏氏，(株)横河ブリッジホールディングス 石井博典氏の協力を賜りました。道路橋のヘルスマニタリングでは，長岡技術科学大学 長井正嗣名誉教授，岩崎英治教授，新潟県，(株)東京測器研究所，(株)構造技研新潟，イトラスト(株)，(株)中越興業の協力を賜りました。高速道路における橋梁モニタリングの取組みでは，中日本高速道路(株)金沢支社に，フィールドを提供して頂くと共に，現地計測の協力を賜りました。この場を借りて，関係者の皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 奥井義昭：限界状態設計法と維持管理，片山技報，No.33，pp.2-7，2014.
- 2) 宮下剛，石井博典，藤野陽三，庄司朋宏，関雅樹：レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.277-296，2007.
- 3) 宮下剛，岩崎英治，長井正嗣，Tran Duy Khanh：供用から 76 年が経過した鋼ゲルバートラス橋の現地載荷試験と短期間モニタリング，構造工学論文集 A，Vol.60，pp.439-450，2015.
- 4) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，2008.
- 5) 有馬直秀，石川裕一，橘吉宏，森山守，宮下剛，長井正嗣，岩崎英治：性能照査型維持管理法に向けた鋼 2 主 I 桁橋の劣化シナリオについて，第 69 回土木学会年次学術講演会，pp.65-66，2014.
- 6) D. G. Garcia, T. Miyashita, N. Arima and Y. Ishikawa: Analysis of steel bridge response assuming degradation scenarios for structural health monitoring, the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Torino, Italy, 2015.7. (to be presented)
- 7) 山口周：世界で最もイノベティブな組織の作り方，光文社，2013.
- 8) 宮下剛，長井正嗣：一軸引張りを受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析，土木学会論文集 A，Vol.66，No.2，pp.378-392，2010.
- 9) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，小林朗，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と耐力評価法，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.68，No.3，pp.635-654，2012.
- 10) 若林大，宮下剛，奥山雄介，秀熊佑哉，小林朗，小出宜央，堀本歴，長井正嗣：高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，Vol.71，No.1，pp.44-63，2015.
- 11) H. Li, J. Qu, X. Zhang, M. Pei and N. Li: Research and practice of health monitoring for long-span bridges in the mainland of China, Smart Structures and Systems, Vol.15, No.3, pp.555-576, 2015.

長岡技術科学大学
Nagaoka University of Technology

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

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 一橋梁ヘルスマニタリングの事例を通じた所感一

宮下 剛
環境社会基盤工学専攻
長岡技術科学大学

2015年8月7日、第18回鋼橋造と橋に関するシンポジウム、早稲田大学

自己紹介

2

みやした たけし
宮下 剛
SS0年新潟生まれ、埼玉育ち。http://researchmap.jp/mtakeshi/



【学歴】2001年 3月 東京大学 土木工学科 卒業
2002年 9月 東京大学 社会基盤学専攻修士課程 修了
2005年 9月 東京大学 社会基盤学専攻博士課程 修了

【職歴】2005年 10月～3月 学振特別研究員 東京大学
2006年 4月～2007年 3月 長岡技術科学大学 助手
2007年 4月～2008年 3月 長岡技術科学大学 助教
2008年 4月～2012年 3月 長岡技術科学大学 特任講師
2012年 4月～ 長岡技術科学大学 准教授

【専門分野】維持管理工学、構造工学、橋梁工学

【キーワード】構造ヘルスマニタリング、橋梁、計測、振動、FEA、補修/補強、FRP

【社会活動】

- ・ 日本道路協会 鋼橋小委員会 部分係数設計WG 幹事、2015年4月～2016年5月
- ・ 中日本高速道路(株)金沢支社 金沢支社管内構造物に関する検討委員会、2014年4月～
- ・ 中日本高速道路(株)金沢支社 金沢支社管内点検の高度化に関する検討委員会、2014年4月～
- ・ 土木学会 構造工学委員会、構造工学論文編集小委員会、第9部門主査、2014年9月～2016年3月
- ・ 鋼橋技術研究会 センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会 副部会長、2014年4月～
- ・ 鋼橋技術研究会 補修補強設計部会、委員、2012年10月
- ・ 北陸地方整備局 下越・小国・金津ブロック総合評価審査委員会 委員、2015年3月～2016年3月
- ・ インフラ再生技術者育成新潟地域協議会 幹事会委員、2014年3月～2016年3月
- ・ 日本鋼構造協会 鋼橋の合理化構造・設計法研究委員会 合理化構造・設計法研究部会 幹事長、2013年8月～
- ・ 土木学会 鋼構造委員会、鋼・合成構造標準示方書小委員会、設計部会、幹事、2013年7月～2016年3月
- ・ 土木学会 鋼構造委員会、鋼橋の大規模修繕・大規模改築に関する調査研究小委員会、委員、2013年6月～2016年5月
- ・ 首都高技術振興、技術交流会、委員、2013年7月～

はじめに

3

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

■ 「性能照査型維持管理」

- Load rating (AASHTO LRFR)
 - 死荷重効果
 - Rating Factor: $RF = (C - DL) / LL$
 - 損傷劣化した耐力 ← C
 - 活荷重効果 ← LL ← BWIM
 - $C = \Phi_C \Phi_S \Phi_n R_n$
 - R_n : 公称強度 Φ_C : 状態係数 ← 「モニタリング」?

結局、「状態係数の決定のために何をどうやって測るのか？
管理値をどのように決定するのか？」

4

宮下剛、石井博典、藤野隆三、庄司朗宏、関雅樹: レーザ計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響、土木学会論文集A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.4.

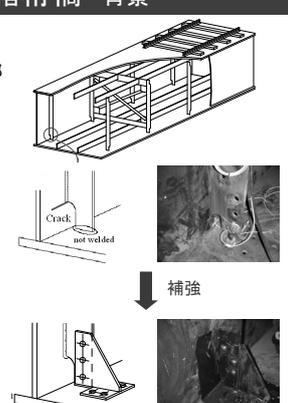


レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速 走行により発生する局部振動の把握と 列車速度の影響

新幹線鋼箱桁橋 背景

5

- 変状の概要
垂直補剛材下端部の主桁ウェブ溶接部
においてき裂が発生
- 変状の対策
補強材を高力ボルトで取付ける
同一の構造を有する部位全て
- 対策の効果
不具合の報告なし
- 変状の原因
杉本 (1997)
列車走行に伴う高次の局部振動
発生メカニズムは明らかではない

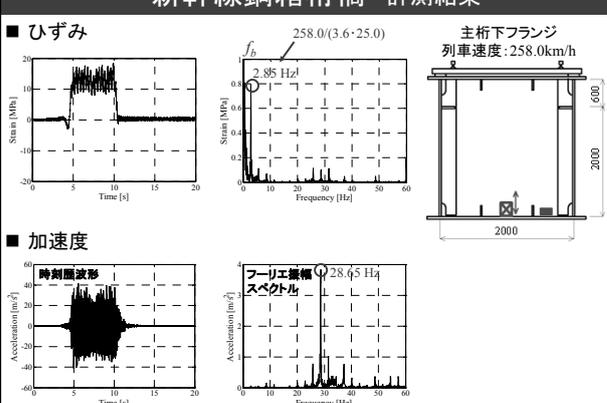


新幹線鋼箱桁橋 計測結果

6

■ ひずみ

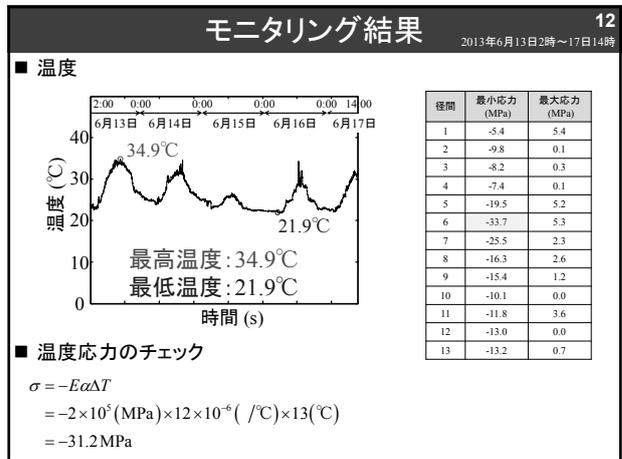
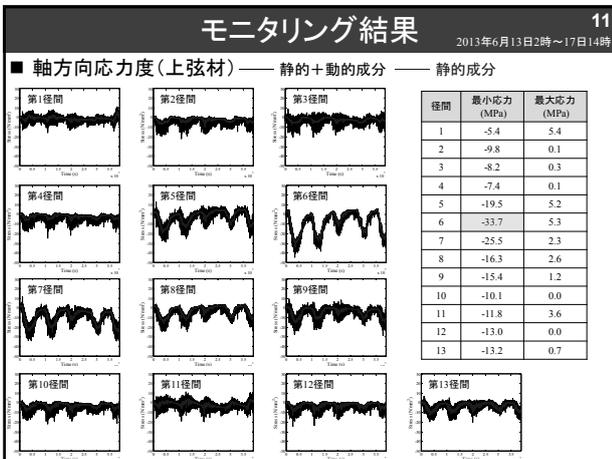
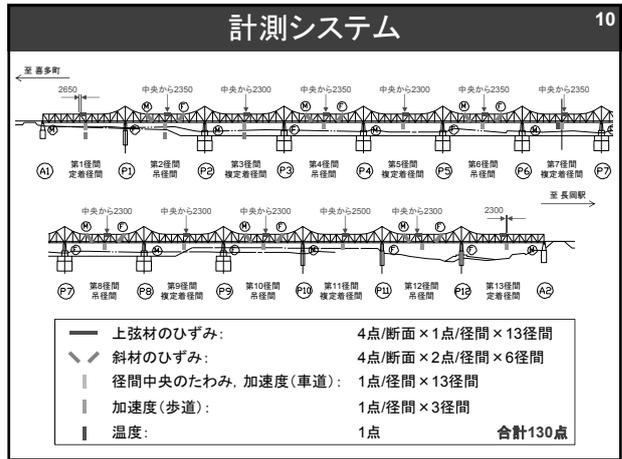
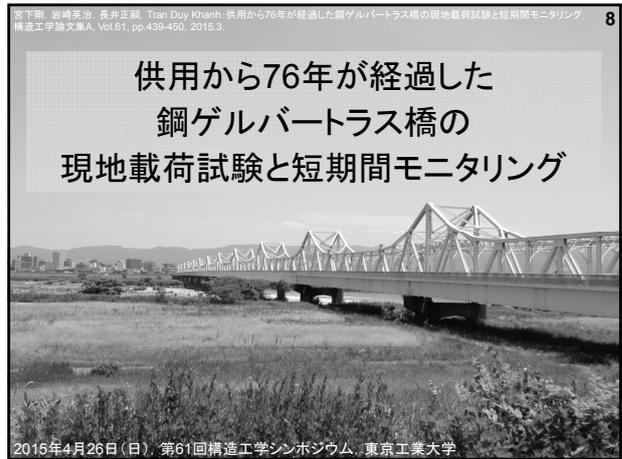
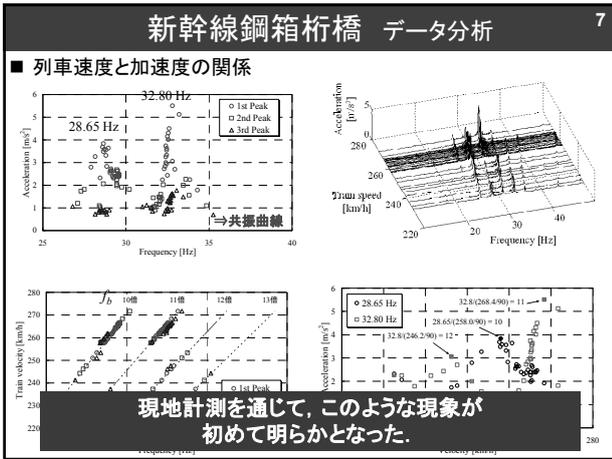
主桁下フランジ
列車速度: 258.0km/h

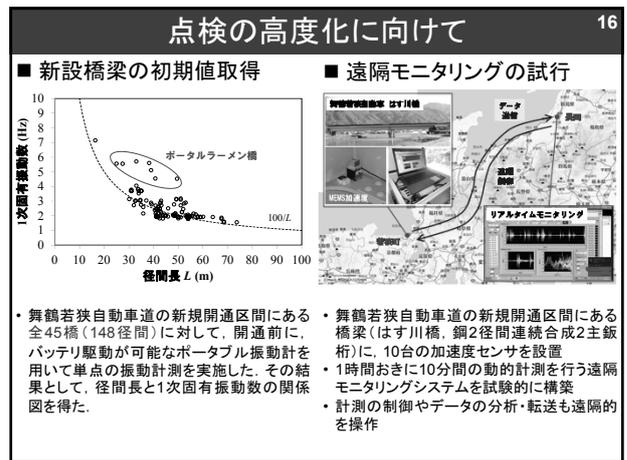
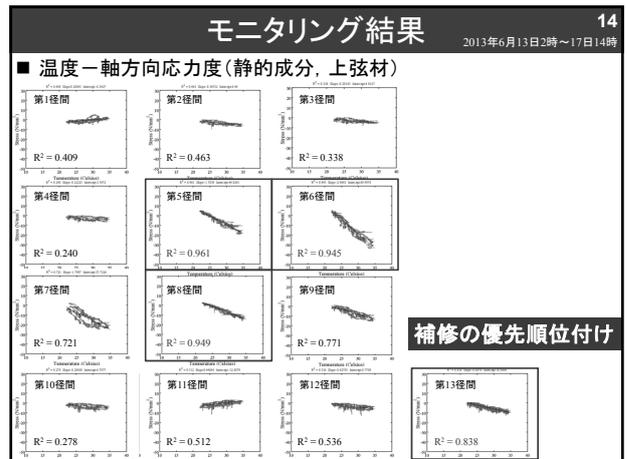
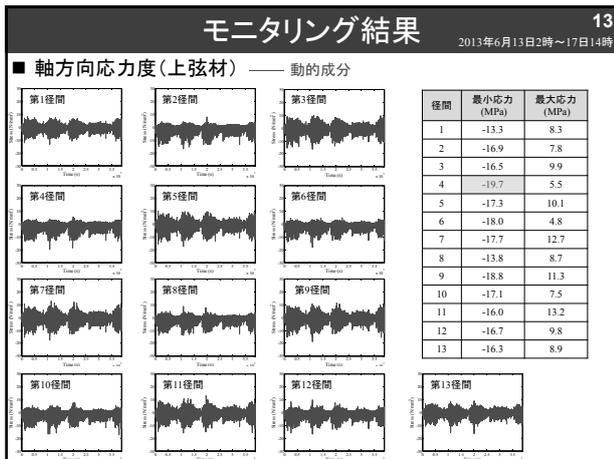


■ 加速度

時刻履歴波形 フーリエ振幅スペクトル

258.0 (3.6・25.0)
28.95 Hz





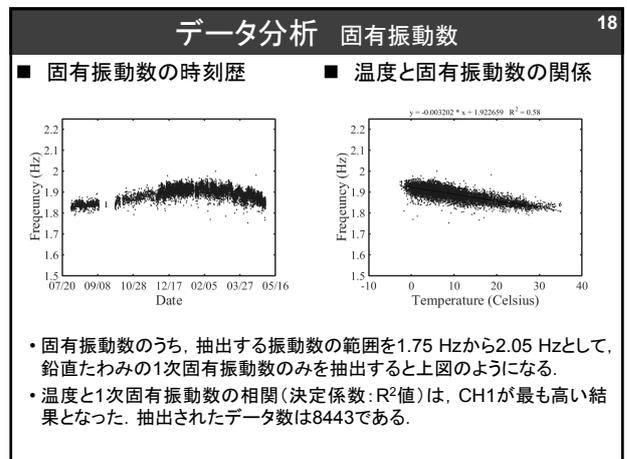
考察

17

- 剛性変化の感度: たわみ > 固有振動数
- 計測実施の観点: たわみ計測 < 振動計測

橋梁点検の高度化へどのように役立てられそうか？
方法論の妥当性をいったん脇に置いて考察を加える。

- 固有振動数は温度に依存して変動 ⇒ 変動幅の把握が必要
- 変動幅を超える損傷イベントと程度の同定が必要
- 同じ構造形式で、損傷程度が異なる複数の橋梁を徹底的に計測することで、合理的な維持管理に資する効果的なモニタリングの計測量、管理値が見えてこないか？
- あるいは、FEAモデルに、その橋梁の架設地点における損傷シナリオを考慮した損傷を導入して、固有振動数、たわみ、ひずみなどの損傷イベントならびに損傷程度と変化量の関係を把握



- 最大の温度変化: $35.1 - (-2.6) = 37.7^{\circ}\text{C}$
- 温度と1次固有振動数の関係
 $f_1 = -0.003202 \times T + 1.922659$
 $T = 35.1^{\circ}\text{C}$ のとき $f_1 = 1.8103 \text{ Hz}$
 $T = -2.6^{\circ}\text{C}$ のとき $f_1 = 1.9310 \text{ Hz}$
- 固有振動数の低下率
 $1.8103/1.9310 = 0.9375$ (6.25%の低下)
- 原因
 (1) 温度変化によって長さ L が変化したことによる影響
 (2) 温度変化によって物性 E が変化したことによる影響
 (3) 可動支承の固着によって、温度変化による長さの変化ができず、梁の軸力 N として導入

- 実橋梁の挙動は十分に把握されているだろうか？
- 「観測」は科学の重要な柱
- 観測のプロセスが欠けると、性能とリンクさせるモニタリングは難しいのでは。
- 事業者は、費用対効果を常に意識せざるを得ず、計測データは足りない、白か黒の判断のみが必要である、との意見も ⇒ボルト締結監視センサ
- モニタリングの計測量、管理値などを明確にする必要があり、長期的な視点に立つて新しい技術を自由に気兼ねなく、誰でも試せるフィールドや体制が必要では
- 耐力力とモニタリングの専門家が介して、日本発の「スマートブリッジ」を実現をするイノベーションを

Minebea
Precision to Exceed Precision

M24, M30, M36
小型ロードセル

2014.12.5

従来の引込、ロードセルにマイコン、無線通信を搭載して小型化を図る。

電源には、大容量キャパシタを利用して最低6年間、は使用させる。

軸力減少 or 増加

閾値の設定は任意

LEDが点灯

ご清聴ありがとうございました

mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp