

地方自治体が管理する橋梁の損傷と動特性に関する 実験的研究

舞鶴工業高等専門学校建設システム工学科 教授 玉田和也
長岡技術科学大学環境・建設系 准教授 宮下 剛

概要：

橋梁の動特性による健全度評価については、古くから調査研究が実施され一部の特殊橋梁では実用化されている。本研究では、地方自治体の管理する橋梁の大多数を占める単純桁を対象として、橋の損傷と動特性の関係を明らかにすることで動特性の測定結果を力学的（客観的）な健全度指標として確立する。これにより、市町村における点検精度の向上、精密点検実施の選別などに活用するとともに、目視点検を補完することで点検費用の削減を図る。

上記目的のため、京都府管理の撤去橋梁のうち実証実験が可能な町ヶ谷橋および福井県管理の川上橋の提供を受け、損傷と動特性に関する実験を行い損傷の進行と動特性の変化を計測した。また、舞鶴市内の橋長15m以上の重要橋梁のうち50橋の振動計測を実施し、実橋への適用に関する課題の抽出を行った。最後に、京都府伊根町の4連の単純RC橋について振動計測を活用した健全度診断を実施し、本研究課題の成果の一例を報告する。

キーワード: 動特性, 振動計測, 健全度, 実験, 長寿命化, 維持管理, 点検, 診断

1. 研究背景

社会基盤ストックの老朽化が問題となっている。現在、予防保全による橋の長寿命化対策が全国的に実施されているが、地方自治体（特に市町村）では目視点検のばらつき（技術者不足）や継続的な点検費用が問題視されている。本研究では、橋の動特性（固有振動数、減衰、モード形状）の変化から健全度を評価する手法を確立するため、撤去橋梁に人為的に損傷を与え損傷と動特性の相関関係について実証実験を実施する。これにより市町村が管理する橋梁の特徴を踏まえた維持管理手法の確立を目的とする。

本研究の目的とする健全度評価システムの形態として、多数の橋梁の動特性計測との比較による「直接評価法」と、同じ橋梁の固有振動数を長期間計測し、固有振動数の経年変化を調べる「経年評価法」が考えられる。

直接評価法は、同時期に多数の橋梁を計測し、固有振動数の予測値と比較することにより、異常のある橋梁を検出する方法である。この方法では、橋梁の固有振動数を推定する式として梁の曲げ振動方程式¹⁾と単純桁の道路橋に対する島田式²⁾を用いるものとする。振動方程式を(1)式に、島田式を(2)式に示す。

$$F = \frac{\pi \cdot i^2}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

$$F = \frac{86.65L^{-0.8869}}{0.01678 + 0.7093 \frac{L}{100}} \quad (2)$$

ここに、F：固有振動数(Hz)，L：支間長(m)

i：モード数，E：ヤング係数(kN/m²)

I：断面2次モーメント(m⁴)

A：断面積(m²)

経年評価法は、同じ橋梁の固有振動数を長期間計測し、橋梁の経年劣化による固有振動数の変化から橋の異常を検出する方法である。建造時の初期値を計測している場合は非常に有効な評価法と言える。

本研究では経年劣化による固有振動数の減少傾向を把握するため、橋梁に人為的に損傷を与えることにより、経年劣化を模擬的に再現し、損傷と動特性変化の相関関係³⁾

について調べる。また、舞鶴市内の 50 橋に対し振動計測を行い、振動計測を用いた健全度評価法の実用化に向けた課題の抽出を行う。最後に、京都府伊根町の 4 連の単純 R C 橋について振動計測を活用した健全度診断を実施し、本研究課題の成果の一例を報告する。

2. 町ヶ谷橋による実橋実験

(1) 対象橋梁

今回対象とした橋梁は京都府亀岡市稗田野町にある国道 372 号に架かる車道橋である(写真-1)。構造形式は鋼 I 桁橋で橋長 11.39m, 支間長 11.02m, 幅員は 5.15m, 斜角 30°, 竣工年月は不明である。また、6 主桁の間に 5 主桁の増設、コンクリート床版の増打ちが行われている。



写真-1 対象橋梁(桁下の状況)

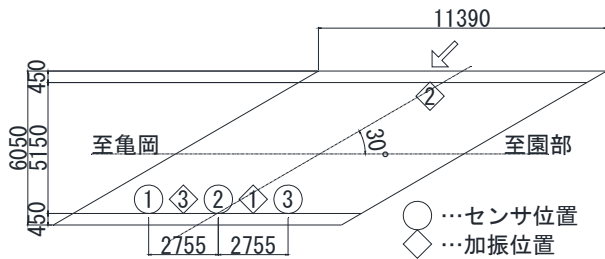


図-1 加速度センサ及び加振位置図

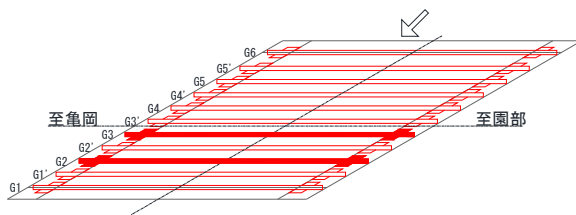


図-2 対象橋梁への損傷付与図

表-1 固有振動数の予測値との比較

損傷ケース	1次モード 固有振動数 (Hz) (実測値)	比率 (実測値)	1次モード 固有振動数 (Hz) (予測値)	比率 (予測値)
1	13.50	1.000	13.10	1.000
2	13.38	0.991	13.03	0.995
3	13.30	0.985	12.97	0.990

(2) 計測方法

本実験の振動計測には、白山工業株式会社の SU-100(静電容量式, サンプル周波数 100Hz)を使用した。計測時は平成 25 年 4 月 6 日～7 日の 2 日間行った。計測時の天候は雨、気温は 12～15℃であった。センサ設置位置を図-2 に示す。センサは下流側車道部に設置し、次節で説明する各損傷ケースに対し強制加振による振動の鉛直成分を計測した。強制加振方法としては、質量 10kg の錘を高さ 50cm から自由落下させる。振動計測は各損傷ケースにつき、図-1 に示した 3 箇所で強制加振を行う。強制加振は加振後、振動が完全に減衰することを確認するまで計測を行い、これを 3 回繰り返す。

(3) 計測条件

桁の損傷付与図を図-2 に示す。損傷ケースは損傷を与えていない状態を Case-1, G2 桁に損傷を与えたものを Case-2, 更に G3 桁に損傷を与えたものを Case-3 とする。損傷は、錆による断面欠損を想定し、下フランジの片側をガス切断することで与える。本研究ではこの 3 つの損傷ケース毎に強制加振を行い、その振動を計測した。

(4) 固有振動数の実測値と予測値の比較

固有振動数の実測値と予測値の固有振動数とその低減の比率を表-1 に示す。固有振動数を比較すると、実測値と予測値が共に 13Hz 程度を示しており、予測式による固有振動数の算出結果は概ね実測値と整合していると言える。また比率は、Case-1 から Case-2, Case-2 から Case-3 において実測値と予測値の比率が概ね整合していると言える。

(6) まとめ

町ヶ谷橋の実験では、実橋に段階的に損傷を与え、振動計測を行った結果と、予測式を用いた固有振動数の算出を行った。以下に本実験から得られた知見をまとめる。

- ①実橋の振動計測では、段階的に損傷を与えることによる固有振動数の低減を確認することができた。
- ②斜角 30° という特異な橋梁においても健全時の計測結果を取得していれば発生する損傷を振動計測によって評価出来る可能性がある。

3. 川上橋による実橋実験

(1) 対象橋梁

対象橋梁は福井県大飯町にある川上橋で、橋長は 30.50m, 幅員は 4.55m, 斜角は 70° で、昭和 30 年に架設され、建設後から 58 年経過している。この橋の撤去にともない、実橋実験を行った。

(2) 計測概要

川上橋撤去の際、4 主桁のうち主桁 1 本を取り出し(写真-2) 単純支持状態(写真-3)にして実験を行った。桁断面を写真-4 に示し、桁寸法を図-3 に示す。振動計測は、桁を 6 等分するように、サンプリング周波数 200Hz のサーボ型



写真-2 桁取り出しの様子



写真-3 単純支持の様子

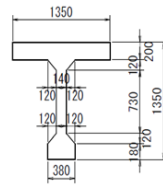


図-3 断面寸法

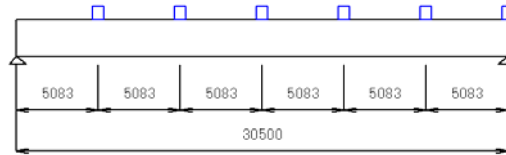


図-4 センサ配置

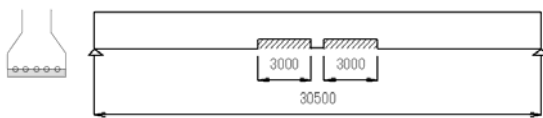


図-5 STEP 1

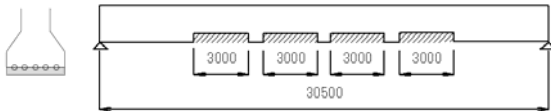


図-6 STEP 2

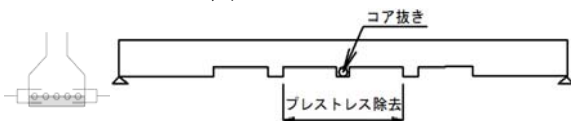


図-7 STEP 3

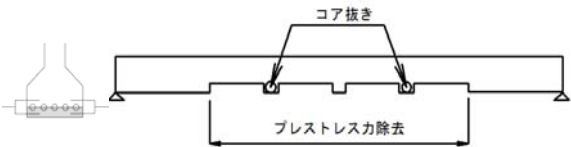


図-8 STEP 4

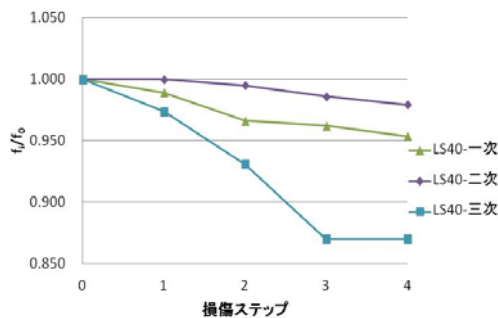


図-9 損傷ステップごとの固有振動数の変化率

加速度計 LS40 を設置した。センサ配置の様子を図-4 に示す。また、桁に対して 4 ステップにわけて強制的に損傷を与えた。桁を取り出した状態を STEP 0 とし、そこから桁の下面のかぶりコンクリートを 2 回に分けてはつり、P C 鋼線も 2 回に分けて切断した。加振方法は重りを自由落下させる強制加振と人力加振を損傷ステップごとに行った。各損傷ステップを図-5 から図-8 に示す。

(3) 計測結果

振動計測より得られた LS40 の加速度波形を高速フーリエ変換 (FFT) し、得られた加速度スペクトルのピークを読み取り、各ステップの固有振動数とした。また、固有振動数を STEP 0 の値でそれぞれ正規化したグラフを図-9 に示す。

(4) 振動方程式を用いた実験値との比較

1 次モードに着目し振動方程式を用いて、実験値との比較を行った。表-2 に計算結果、図-10 に変化率をグラフ化した結果を示す。これより、P C 桁の変位の計算に用いられているコンクリート全断面と P C 鋼線を有効とした場合の断面 2 次モーメントを用いれば、振動方程式により、固有値の推定と変化を追跡できた。実験値と計算値で値が一致しなかった。原因として、支点条件や地盤の影響が考えられる。

(5) 提案手法を用いた実橋の検証

提案手法を用いて大川橋(写真-5)の検証を行った。写真-5 で、右側の桁(G 1)は損傷が激しく(写真-6)、左側の桁(G 2)は比較的健全であった。大川橋での振動計測により得られた固有振動数を表-3 示す。ここで、健全な G 2 の固有振動数を健全状態での値とする。G 2 桁が単純支持状態である場合の固有振動数を振動方程式により求めると、7.414Hz であった。計測値が 11.680Hz であったので、支点条件の違いによる絶対値の不一致を補正し、G 1 桁の健全状態の固有振動数を求めると、11.427Hz となる。実験値が 9.880Hz であったので、固有振動数の低下率は 0.865 となり、断面二次モーメントの低下率は 0.748 となった。

表-2 実験値と振動方程式を用いた計算結果

	損傷ステップ				
	0	1	2	3	4
コンクリート断面	2.558	2.506	2.449	2.583	
PC鋼線換算断面	2.668	2.647	2.597		
実験値	3.333	3.292	3.217	3.190	3.189

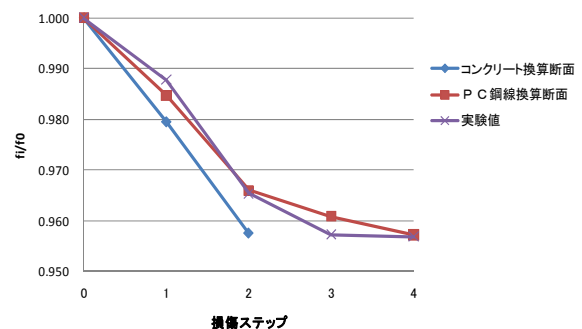


図-10 損傷ステップごとの固有振動数の変化



写真-5 大川橋

写真-5 G1

表-3 固有振動数計測結果

桁番号	G1	G2
1次モード(Hz)	9.880	11.680

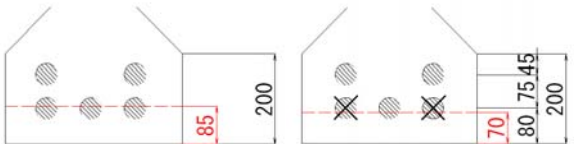


図-11 検討結果1

図-12 検討結果2

断面二次モーメントが25%低下する断面を検討した結果、検討結果1(図-11)として、PC鋼線が健全で、かぶりコンクリートが85mm全長に渡って剥落している状態、もしくは、検討結果2(図-12)として、PC鋼線が2本損傷し、かぶりコンクリートが全長に渡って70mm剥落している状態と同等であることが検討の結果わかった。

(6) まとめ

川上橋を対象とした振動計測を行い、損傷を与える度に固有振動数は低下し、固有振動数の変化率は、モード次数によって異なった。1次モードに着目すると、PC鋼線切断より、かぶりコンクリートの欠損の方が、固有振動数に与える影響は大きいことがわかった。また、1次モードに着目し、固有振動数の変化率の推定手法を提案し、提案手法を用いて大川橋の検証を行った。その結果、提案手法による検討を行えば、橋の修繕や架けかえの客観的で合理的な判断材料になることがわかった。

4. 舞鶴市が管理する橋梁50橋の振動計測

(1) 対象橋梁

舞鶴市では、橋長15m以上の橋を重要橋として位置づけしており、その数は140橋(全管理橋梁数は835橋)である。そのうち50橋を河川単位で抽出し、動特性の計測を行った。選定した橋梁の建造年代、橋長について偏りがないことを確認している。

(2) 計測結果

図-13に示すとおり、支間長と固有振動数の関係はほぼ島田式の周りに分布している。ただし、計測した橋梁には単独の歩道橋や、車道橋に隣接(接触)して施工されている歩道橋も含まれている。そのため、構造形式や架橋環境による分類が望まれる。

(3) 課題

50橋の計測では、地覆上に加速度センサを設置して計測

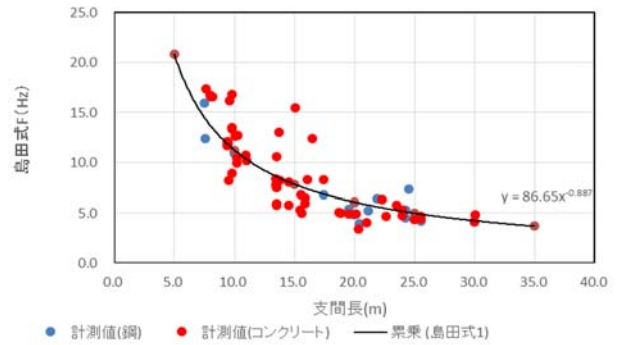


図-13 計測結果と支間長の関係

を行った。機械的に計測することを試みたが、架橋条件や路面の利用状況により、工夫や配慮が必要な場合が多々あり、一巡目の計測でのノウハウを計測マニュアルに反映させるなどの検討が必要である。

5. 日月橋の健全度診断

(1) はじめに

ここでは振動計測により得た固有振動数の実測値と、予測式より算出した予測値を比較し、その相関から実際の橋梁の健全度評価を行う。そして目視点検による点検結果より橋梁の健全度評価点を算出し、固有振動数を用いた健全度評価との相関を確認する。また、橋梁の再現設計を行い、振動計測結果より算出した断面性能と比較し、再度供用が可能な条件を提案する。

(2) 対象橋梁諸元

本研究の対象橋梁は京都府与謝郡伊根町本庄地内に架かるRCT桁橋(2主桁)である(写真-7,8)。橋長40.0m、4径間の直橋で支間長は9.5m×4連、幅員2.52m、竣工年月は不明である。各径間損傷が進行しており、現在供用停止中である。

(3) 目視点検結果を用いた健全度評価点の算出

今回対象とした橋梁の目視点検結果より各径間の健全度評価点の算出を行った。本研究では上部工の健全度評価を行うため、耐荷性での評価を行った。評価点数を正規化したものを図-14に示す。これにより径間2の健全度が相対的に低いことが確認できる。

(4) 振動計測による健全度評価

本実験の振動計測には、日本航空電子工業株式会社製の1軸加速度計JA-MIS(サンプリング周波数1000Hz)を使用した。センサ設置位置を図-15に示す。計測は常時微動と強制加振による振動の鉛直成分を計測した。振動計測による固有振動数の実測値を表-4に示す。

橋梁の固有振動数を振動方程式から求め、健全時の固有振動数は12.60Hzとなった。固有振動数の実測値を予測値で正規化したものを図-16に示す。各径間の健全度の相関を確認すると、径間3の健全度が最も高く、径間2が最も低く、次いで径間1、4の健全度が低いことが分かる。これらの傾向を目視点検の健全度評価結果と比較すると、概



写真-7 日月橋全景



写真-8 日月橋桁下の状況

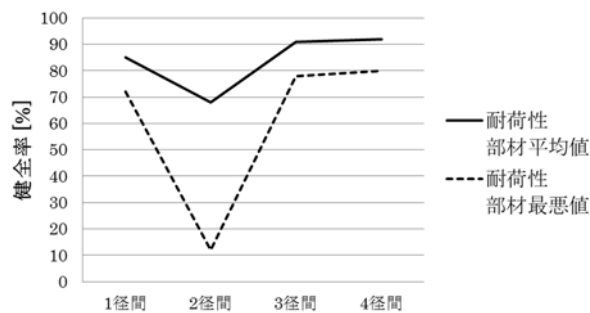


図-14 目視点検による健全度評価

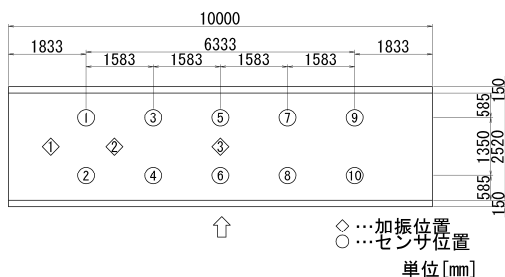


図-15 加速度センサおよび加振位置

ね整合しているが、目視点検では健全度が高いとされている
 径間4が振動計測による健全度評価では径間1と同様に
 低い健全度となっている。

(5) 径間 2 の断面性能評価

振動計測による固有振動数の実測値を用いて算出した断面性能減少率を表-4に示す. 径間2が最も断面性能が減少しており減少率は約17%であった.

また、径間2は鉄筋径の実測で1段目主鉄筋の鉄筋径がD22からD18程度に減少していることから(写真-9)、鉄筋断面減少後の鉄筋コンクリートT形断面梁の応力計算によると、健全時に比べ応力が約20%増大している計算とな

表-4 計測結果および断面性能比

	計測振動数 [Hz]	予測値との 比 [%]	算出断面2次 モーメント [m ⁴]	断面性能比 [%]
径間1	11.57	91.85	0.05226	84.40
径間2	11.45	90.84	0.05112	82.55
径間3	12.32	97.81	0.05926	95.70
径間4	11.72	92.99	0.05356	86.50

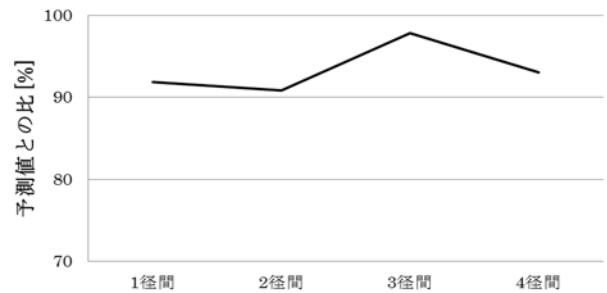


図-16 振動計測による健全度評価



写真-9 主鉄筋の錆びによる断面欠損

り、断面性能としては約16%低下していることになる。

これらより径間2において振動計測から求めた断面性能の減少率と実測による鉄筋径の減少から求めた応力計算による性能低下が概ね整合していると言え、振動計測による健全度評価の有効性を確認することができた。

(6) 荷重制限案の提案

以上の結果より、約 20%の断面性能が減少していると想定することができ、対象橋梁の安全率が低下していることが明らかとなった。断面計算より、設計時の安全率 1.7 を確保するには、活荷重を当初の 14t から 7t 以下に制限する必要がある。また歩道橋として供用する場合の安全率は 2.5 で余裕のある結果を得ることが出来た。いずれにしても現状より損傷を進行させないための対策が必須であることは言うまでもない。

(7) まとめ

本研究では、振動計測結果と目視点検結果から橋梁の健全度評価を行い、その整合性を確認することを目的としている。以下に本研究から得られた知見をまとめる。

①振動計測結果から橋梁の健全度評価を行い目視点検結果と比較することで目視点検では把握できなかった径間4の健全度低下を示す結果が得られた。

②振動計測結果と鉄筋径の実測から断面性能の減少率(約 20%)を求め、ほぼ同様の結果を得ることが出来た。

③活荷重を当初の 14t から 7t 以下に制限することや、歩道橋として使用することで、現在供用停止中の橋梁を再度供用可能とする案を提案した。その前提として橋梁の劣化をこれ以上進行させない対策を講じることが最低条件である。

6. 結論

動特性を利用した健全度診断法を研究開発するにあたり、次のようなご意見を多数の方からいただいた。①構造物の損傷を評価するのであれば構造物の剛性が平方根の中にある固有振動数ではなく、静的たわみで評価すべきではないか。②支承や伸縮装置に石が一つ挟まるだけで固有振動数は変化するので健全度評価には向かないのではないか。③初期値が不明であるため健全度評価は難しいのではないか。④固有振動数が変化するぐらいの不具合が生じているならば目視で判るはずではないか。

非常に理にかなった妥当な意見であり、本研究は常にこれらの指摘に向き合いながら実施してきた。以下に本研究で得られた成果と課題について述べる。

(1) 損傷と動特性の相関性について

地方自治体が管理する橋梁の大多数を占める単純桁に対象を絞り、鋼橋、RC 橋、PC 橋について実橋実験を実施した。その結果、振動方程式の手計算レベルで推定できるほど損傷と動特性の相関は明快にあると言える。ただし、既設橋梁の場合、支承、伸縮装置、耐震対策工によって桁端の境界条件が乱されているため検討が必要である。

(2) 地方自治体が管理する橋梁群への適用について

舞鶴市の橋梁を 50 橋計測した結果、計測環境によって動特性の計測精度が影響を受ける。また、構造形式や架橋

環境を考慮して動特性による健全度診断を実施する必要がある。

日月橋の場合、比較的良好な計測条件と境界条件であったため健全度診断を適正に実施できた。目視点検で見逃されていたと思われる損傷を振動計測により指摘できたことは、構造物の振動を利用した健全度診断の直接評価法における事例となる。

(3) 今後の課題

- ① 支点の拘束条件を診断に反映する方法
- ② 計測環境による影響の解消
- ③ 地方自治体の橋梁管理に必要なセンサリング体系の検討

謝辞：役割を終えた撤去橋梁を今後の維持管理のための実験供試体として利用するアイデアを推進できたのは JICE の研究助成によるところであり深謝いたします。貴重な実験フィールドを提供いただいた京都府および福井県には実験実施にあたり全面的に協力を頂きました。また、協力いただきました株式会社サンキ、株式会社フクセン、株式会社日本ピーエス、株式会社杉本組、株式会社桑原組、迫田工業その他、ご協力いただいた皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小坪清真.:土木振動学,森北出版,pp.182-184,1973.
- 2) 加藤雅史,島田静雄:橋梁実測振動特性の統計解析,土木学会論文報告集,第 311 号,pp.49-58,1981.7.
- 3) 宮下剛, 玉田和也, 劉翠平, 岩崎英徳, 長井正嗣: 振動を利用した健全度診断に向けた実橋の損傷と動特性変化, 土木学会論文集 A1,Vol.68,No.2, pp.367-383, 2012.