

# 論文 小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験

大竹 雄介\*1・内藤 英樹\*2・中野 聡\*3・鈴木 基行\*4

**要旨:** 電磁コイル式の小型起振機を用いたコンクリート橋 (上部工) の強制振動試験を提示した。はじめに、供試体長さ 1.5m のコンクリートはりを作製し、強制振動試験による固有振動数と理論値との整合性を確認した。さらに、スパン 10.4m のコンクリート橋を対象として、小型起振機を用いた強制振動試験、重錘落下による衝撃振動試験、およびダンプトラックによる静的載荷試験を行い、これらの実験結果を比較した。その結果、小型起振機による強制振動試験は、衝撃振動試験や静的載荷試験の結果とも良い整合を示し、高周波数域まで精緻な共振曲線が得られることを確認した。

**キーワード:** コンクリート橋, 強制振動試験, 衝撃振動試験, 静的載荷試験

## 1. はじめに

我が国の社会基盤施設は一斉老朽化を迎える段階にあり、近年、コンクリート橋においても著しい劣化事例が報告されている。橋梁上部工・下部工を対象とした常時微動計測や衝撃振動試験が報告されているが、これらの振動試験は、構造全体系の 1 次固有振動数に着目して長大橋の耐風設計を検討するもの、あるいは地震によって生じた橋脚基部の著しい損傷を検査すること<sup>1)</sup>、などを目的としている。経年劣化によって局所的かつ段階的に進展する損傷を構造全体系の 1 次固有振動数から判断することは容易ではなく、維持管理を目的とした橋梁の健全度評価では、高周波数域の振動特性や振動モードの変化に着目した手法などが提案されている<sup>2)</sup>。

著者ら<sup>3)</sup>は、単純支持のはりと平板において、損傷が局所的かつ非対称に存在することにより、振動モードの節 (共振時に最も振動が励起されない箇所) が損傷側に移動することを理論によって示した。また、稲田ら<sup>4)</sup>や Douka et al.<sup>5)</sup>は、局所的な損傷が存在することによって、反共振周波数 (ある箇所にて最も振動が励起されない周波数) が変化することを報告している。このような振動モードの節や反共振周波数を得るためには、共振点のみならず反共振点も評価できる精緻な振動試験が必要である。入力加速度 (調和振動) の振幅を一定として周波数を変化させる周波数スイープ試験は、材料や機械などの損傷探査手法として広く認知されており、コンクリート材料の耐久性評価<sup>6)</sup> (JIS A 1127: 共鳴振動試験) にも応用されている。この試験方法は、外力に対する構造物の応答波形をフーリエ解析する手法と比較して、共振曲線を精緻に得ることが可能である。しかし、大型起振機を用いた長大橋の周波数スイープ試験<sup>7)</sup> (以下、強制振動試験) は、起振機の運搬や設置、交通規制の必要性、ある

いは入力波の制御などの点から容易ではない。古川ら<sup>8)</sup>は、スパン 47m の鋼トラス橋を対象とした小型起振機による強制振動試験を行っている。近年、電磁コイル式起振機の小型化とデジタル振動制御技術が発達しており、参考文献 8) を見る限りでは、このような小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験も可能と考えた。

そこで、本研究は、機材の運搬や取扱いが容易であり、かつ高周波数域までの振動制御が可能であることから、電磁コイル式の小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験を提示する。なお、本研究の目的は、反共振点に着目したコンクリート上部工の健全度評価手法の構築であるが、本稿はその前段として、橋梁の振動試験方法に関する基礎的検討を報告する。具体的には、小型起振機によるコンクリートはり供試体の強制振動試験を行い、理論値との比較により試験方法の妥当性を検討する。さらに、実コンクリート橋の強制振動試験への応用を示し、提案手法の有用性を考察する。

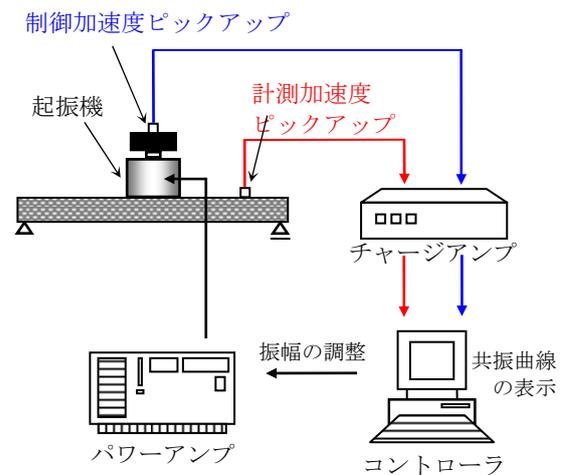


図-1 強制振動試験の概要

\*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

\*3 (株)福山コンサルタント リスクマネジメント事業部 博(工)

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)



写真-1 小型起振機 (左: Type A, 右: Type B)

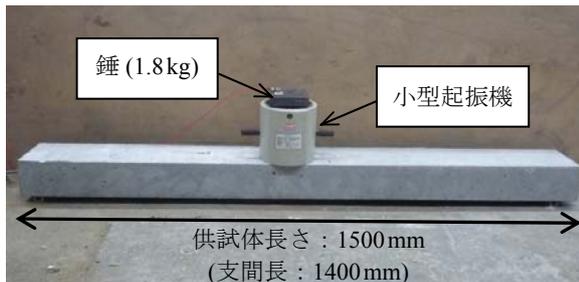


写真-2 供試体実験の状況

## 2. 小型起振機を用いた強制振動試験

強制振動試験の概要を図-1 に示す。また、本研究で使用した小型起振機を写真-1 と表-1 に示す。振動テーブルに錘を固定し、起振機を構造物上に設置して錘を鉛直方向に加振することにより、起振機本体に生じる振動を構造物に伝達させる。振動テーブルには図-1 の制御加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)を貼付し、振動テーブルの加速度振幅が一定になるように、コントローラによって起振機の出力を自動制御する。本試験システムでは、指定した周波数帯での掃引試験も可能とする。さらに、構造物の表面に貼付した計測加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)によって、構造物の共振曲線(周波数-応答加速度関係と位相特性)を得る。

## 3. コンクリートはり供試体を用いた基礎的検討

### 3.1 実験概要

基礎的検討として、長さ 1,500mm の無筋コンクリートのはり供試体を作製し、図-1 の強制振動試験を行った。断面寸法は 150mm×100mm (幅×高さ) とした。また、円柱供試体(φ100mm×200mm)の動弾性係数と密度は、それぞれ 33,800MPa および 2,300kg/m<sup>3</sup> であった。

写真-2 に示すように、供試体の両端からそれぞれ 50mm 位置にアルミニウム円管を用いて支間長 1,400mm の単純支持とし、供試体上に小型起振機を両面テープにより固定した。なお、供試体による基礎的検討では、表-1 に示す Type A の小型起振機(最大加振力 49N)を使用した。振動テーブルに 1.8kg の錘を固定し、加速度振

表-1 小型起振機の性能

	Type A (供試体試験)	Type B (実橋試験)
最大加振力	49 N	500 N
最大加速度	377 m/s <sup>2</sup>	417 m/s <sup>2</sup>
最大速度	1.14 m/s	1.2 m/s
最大変位	7 mm	25 mm
可変周波数	2~20,000 Hz	D.C.~5,000 Hz
直径	150 mm	205 mm
高さ	152 mm	270 mm
質量	9.5 kg	26 kg

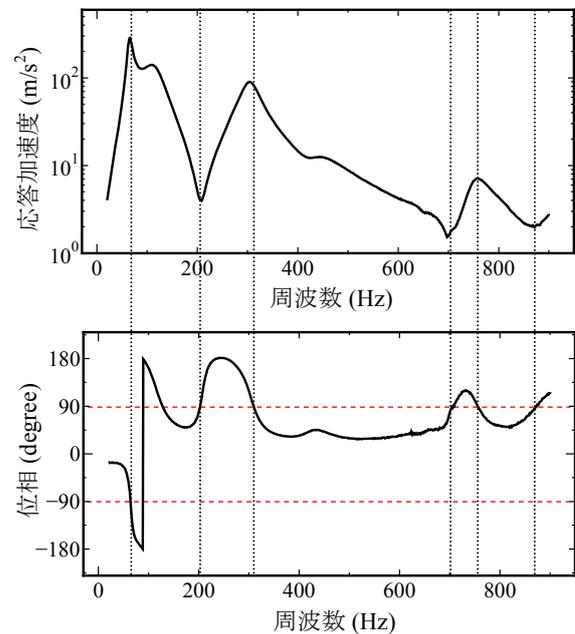


図-2 コンクリート供試体の共振曲線

幅 10m/s<sup>2</sup> を一定として、掃引周波数を 20~900Hz まで連続的に変化させた。計測時間は 5 分間である。

### 3.2 実験結果

起振機の設置および応答加速度の測定は、いずれもスパンの 1/4 点付近とした。強制振動試験によって得られた共振曲線(周波数-応答加速度関係と位相特性)を図-2 に示す。応答加速度が極大となる点において位相が ±90° となった。このときの周波数が固有振動数となる<sup>9)</sup>。

強制振動試験による固有振動数と理論値との比較を表-2 に示す。中間に質点を有する単純ばりの固有振動数は式(1)より得られる<sup>9)</sup>。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

ここで、 $f$  はたわみ振動の固有振動数 (Hz)、 $l$  は部材長さ (m)、 $E$  は動弾性係数 (N/m<sup>2</sup>)、 $I$  は断面 2 次モーメン

表-2 コンクリート供試体の固有振動数

次数	固有振動数 (Hz)		振動モード
	振動試験	理論式	
1	63.6	80.9	たわみ1次
2	309	307	たわみ2次
3	756	754	たわみ3次

ト ( $m^4$ ),  $\rho$  は密度 ( $kg/m^3$ ),  $A$  は断面積 ( $m^2$ ) である。また,  $\lambda$  は次式を満足する値として得られる。

$$\frac{2}{\gamma \lambda l} = \frac{\sin \lambda l_1 \cdot \sin \lambda l_2}{\sin \lambda l} - \frac{\sinh \lambda l_1 \cdot \sinh \lambda l_2}{\sinh \lambda l} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{m_0}{\rho A l} \quad (3)$$

ここで,  $m_0$  は集中質量 ( $kg$ ),  $l_1$  は支点から質点までの距離 ( $m$ ),  $l_2$  は他方の支点から質点までの距離 ( $=l-l_1$ ) ( $m$ ) である。

式 (1) を計算する際に,  $l_1=350mm$ ,  $l_2=1050mm$  とし,  $m_0$  は小型起振機の質量 ( $9.5kg$ ) とした。また, 動弾性係数と密度は, 前記の円柱供試体の測定値を用いた。

表-2 より, 1~3 次のモードについて, 実験結果と理論による固有振動数は概ね対応した。また, 振動試験において, 供試体の各点の応答加速度を測定し, 振動モードが理論と対応することも確認した。なお, 供試体実験では支点の設置状況などが固有振動数に影響したが, 表-2 の 1 次モードの測定値と理論値の差異についてその理由を明らかにすることはできなかった。

以上より, 小型起振機を用いた図-1 の方法によってコンクリートはりの強制振動試験は可能であり, 高周波数域までの共振曲線が得られた。また, 図-2 の共振曲線では, 応答加速度が極小となる点 (反共振点) においても位相が  $\pm 90^\circ$  に対応した。機械分野における研究<sup>4),5)</sup>では, 反共振周波数に着目した損傷同定手法が提案されており, 今後, コンクリート部材の健全度評価への応用を検討する予定である。これに対して, 小型起振機を用いた強制振動試験によって, このような応答加速度が小さい周波数帯の共振曲線も精緻に得ることができた。

## 4. コンクリート橋の強制振動試験

### 4.1 概説

コンクリート供試体を用いた基礎的検討により, 小型起振機による強制振動試験の妥当性を確認した。そこで, 実橋梁への応用として小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験を行った。本実験では, 提案する強制振動試験と併せて, ダンプトラックによる静的載荷試験, および重錘落下による衝撃振動試験も行った。以降

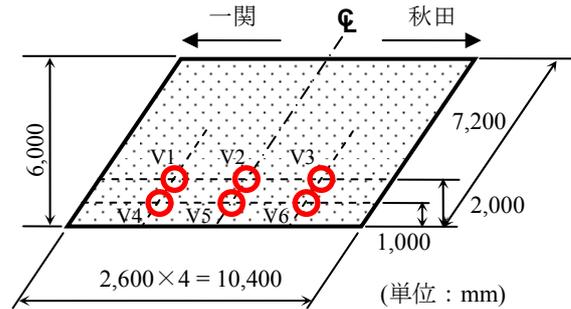


図-3 実橋試験における加振位置と測定位置

表-3 実橋試験における起振機の加速度

周波数	加速度の最大振幅
10~15 Hz	14 $m/s^2$
15~20 Hz	30 $m/s^2$
20 Hz~	40 $m/s^2$

では, これらの実験結果を比較し, 提案手法の妥当性を検討する。

### 4.2 対象橋梁

一般国道 342 号 (岩手県一関市:真湯~須川間) のオーレン 6 号橋を対象とする。オーレン 6 号橋は, 昭和 42 年に建設された支間長 10.4m, 有効幅員 6.0m, のコンクリート床版橋 (斜橋) である。本橋は 2008 年の岩手・宮城内陸地震の復旧対象地域に架設されており, 測定当日は, 工事車両が数分に 1 台程度の割合で通過していた。著者らの目視調査では, 本橋にひび割れなどの目立った損傷は見られなかった。なお, 本橋の詳細な図面などは入手できなかったため, 本研究では静的載荷試験や衝撃振動試験との整合性に着目して, 小型起振機を用いた強制振動試験の妥当性を検討する。

### 4.3 実験概要

#### (1) 強制振動試験

実橋試験では, 表-1 に示す Type B の小型起振機 (最大加振力 500N) を使用した。加振点および測定点は, 図-3 に示すように, 工事車両の通行に配慮して地覆から 2m の位置とし, V1, V2, V3 (スパン  $L$  に対して  $L/4$ ,  $L/2$ ,  $3L/4$ ) とした。強制振動試験は, V2 あるいは V3 に小型起振機を設置し, V1~V3 の応答加速度を計測した。小型起振機は厚さ 5mm 程度のゴムシートを挟んで, 両面テープにより橋面と固定した。

実橋試験では, 振動テーブルに 10kg の錘を固定し, 表-3 に示す加速度振幅を基準として起振機を制御した。最大加振力 500N に対して 10kg の錘を振動させるため, 加速度は  $50m/s^2$  以下となる。さらに, 低周波数域において大きな加振力を得るためには大きな変位振幅が必要



写真-3 ダンプトラックによる静的荷重試験

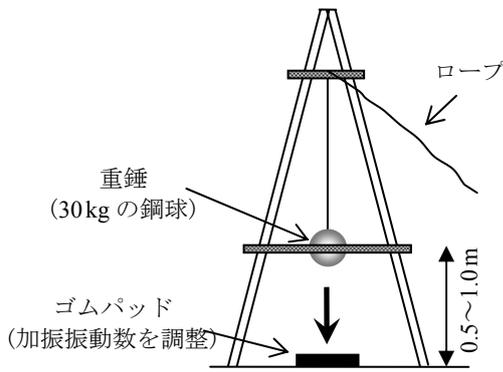


図-5 衝撃振動試験の概要

になるが、著者らが所有している小型起振機の振動テーブルの可動変位の上限は 25mm であり、この上限値によって表-3 の加速度振幅は低周波数域において小さな値となった。

掃引周波数を 10~90Hz とし、10 分間あるいは 15 分間に周波数を連続的に増加させた。なお、この測定時間内においても数台の工事車両が通過したが、車両走行下でも振動試験を継続した。

### (2) 静的荷重試験

写真-3 に示すように、総重量 196kN のダンプトラックを積載した静的荷重試験を行った。前輪および後輪の総荷重はそれぞれ 57kN および 139kN である。ダンプトラックの寸法と輪荷重の荷重位置を図-4 に示す。静的荷重試験では、スパン中央の桁下に変位計を鉛直方向に設置し、上部工のたわみを測定した。

### (3) 衝撃振動試験

衝撃振動試験では、図-5 に示すように、ロープで重錘 (30kg) を 0.5~1m 程度引き上げ、橋面上に落下させて衝撃力を与えた。重錘の落下点は、図-3 の V1, V2, V3, V5 とし、このとき V1~V6 の応答速度をサーボ型速度計により計測した。これらの 6 つの応答速度波形をフーリエ解析することにより、速度スペクトルと位相差スペク

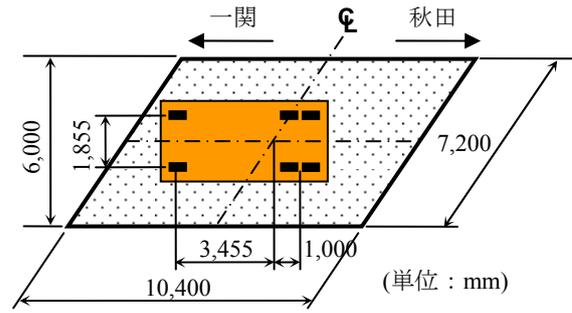


図-4 ダンプトラックの荷重位置

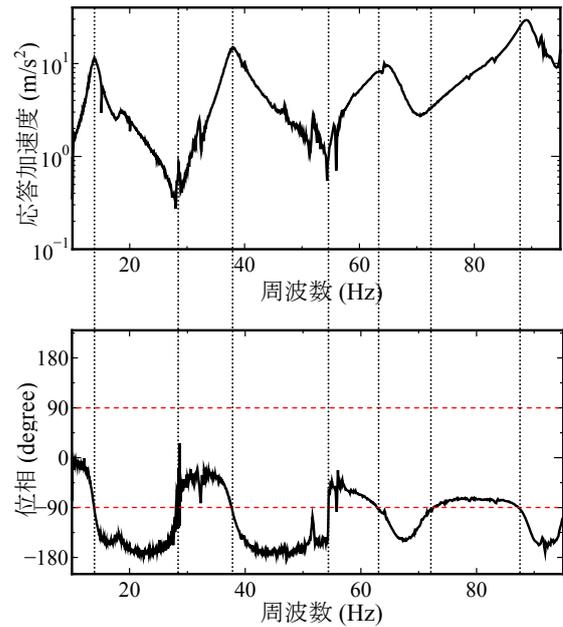


図-6 コンクリート橋の共振曲線

トルを求める。

## 4.4 実験結果

### (1) 静的荷重試験との比較

強制振動試験によって得られた共振曲線の一例として、加振点および測定点を V2 とした実験結果を図-6 に示す。なお、共振曲線に示される応答加速度の値は、表-3 の制御の値に対して、入力加速度 40m/s<sup>2</sup> と等価になるように補正した。前記のように、振動試験の最中にも工事車両が数台通過しており、図-6 の共振曲線においてスパイク状の応答が表れたが、振動特性を評価する上で大きな問題ではなかった。共振曲線から得られる本橋の 1 次固有振動数 (1 次のたわみ振動) は、13.9Hz であった。

一方、図-4 に示すダンプトラックの輪荷重の荷重位置に対し、スパン中央でのたわみは 0.65mm となった。なお、本実験では両支点の沈下量は測定していない。これらの静的荷重試験および強制振動試験の結果から推定される上部工の曲げ剛性を比較することによって、強

制振動試験の妥当性を検討する。

本橋が斜橋であることを勘案して、FEM 解析により上部工の曲げ剛性を評価した。解析は汎用有限要素解析ソフト MARC を使用した。図-7 に示すように、上部工を橋軸方向に 100 分割および橋軸直角方向に 78 分割し、4 節点シェル要素 (7,800 要素) によりモデル化した。橋軸直角方向は、地覆を含めた長さが 7,800mm であったが、上部工は地覆も含めて同じ厚さの要素とし、高欄の影響は無視した。なお、シェル要素の材料特性は等方性を仮定した。すなわち、橋軸方向と橋軸直角方向の曲げ剛性を同一とする簡易モデルである。ダンプロックによるたわみの計算は静的解析とし、上部工の固有振動数はモード解析 (固有値解析) により算定した。支承条件は単純支持とした。

静的載荷試験による荷重-たわみ関係および強制振動試験による 1 次の固有振動数に対して、FEM 解析によってそれぞれの曲げ剛性を推定した。2 つの実験結果に基づいて推定される曲げ剛性の比は、(静的載荷試験) / (強制振動試験) が 0.92 となった。動弾性係数が静弾性係数よりもやや大きくなることを考慮すると、強制振動試験と静的載荷試験の結果は概ね整合している。

## (2) 衝撃振動試験との比較

図-6 の共振曲線から得られる各モードの固有振動数を衝撃振動試験および FEM 解析の結果と併せて表-4 に示す。なお、表中の振動モードは強制振動試験および衝撃振動試験における V1~V6 の位相差と応答速度を基に判断した。表-4 の比較より、2 次モードを除く 1~5 次までの固有振動数について、強制振動試験と衝撃振動試験は良好な一致を示した。しかし、強制振動試験では、明確な 2 次モードの共振点を見出すことはできなかった。図-3 に示すように、小型起振機を幅員の中央付近 (V1 あるいは V2) に配置したため、上部工のねじり振動が十分に励起されなかったものと推定される。衝撃振動試験でも 2 次モード (ねじり振動) は小さな応答しか得られなかったことから、本橋に対する加振動条件ではねじり振動が励起されにくいものと考えられる。なお、図-7 の FEM 解析はシェル要素の剛性を均一 (等方) とした簡易

※ 地覆を含めてシェル要素でモデル化した。

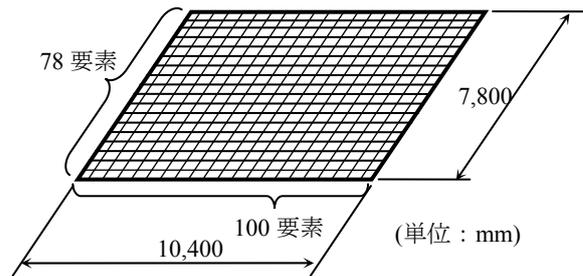


図-7 FEM 解析モデル

モデルであるが、結果として、FEM 解析と 2 つの振動試験の結果は概ね対応した。

また、図-6 に示す強制振動試験の結果でも、図-2 の供試体実験と同様に、高周波数域においても応答加速度の極大点 (共振点) と極小点 (反共振点) の位相が  $\pm 90^\circ$  に対応した。このことから、小型起振機を用いた橋梁の強制振動試験でも、高周波数域まで精緻な共振曲線を得ることができ、着目する周波数帯の調和振動を与えることによって、低次から高次モードまでの共振周波数や反共振周波数を評価できることを確認した。

## 5. まとめ

本研究は、取り扱いが容易な電磁コイル式の小型起振機を用いた橋梁の強制振動試験を提示した。スパン 10.4m のコンクリート橋に対して、小型起振機による加振力でも、高周波数域に至るまでの共振曲線が精緻に得られ、共振周波数のみならず反共振周波数も評価できることを示した。提案手法によって、これまで困難であった構造部材の周波数スイープ試験が可能になった。

今後は、反共振周波数に着目した損傷同定手法<sup>4)5)</sup>を応用したコンクリート部材の健全度評価を検討する予定である。また、小型起振機の加振力では、大規模橋梁への適用は難しいため、衝撃振動試験などの手法と併用した合理的な橋梁の健全度評価手法を提示したいと考えている。

表-4 オーレン 6 号橋の固有振動数

次数	強制振動試験	衝撃振動試験	FEM 解析※	振動モード
1	13.9 Hz	13.7 Hz	13.9 Hz	たわみ 1 次
2	検出されず	18.5 Hz	24.0 Hz	ねじり
3	37.4 Hz	36.6 Hz	51.9 Hz	たわみ 2 次+ねじり
4	63.5 Hz	62.2 Hz	57.7 Hz	たわみ 3 次
5	84.1 Hz	88.4 Hz	84.7 Hz	たわみ 3 次+ねじり

※ FEM 解析は 1 次固有振動数が 13.9Hz となるように動弾性係数を設定した。

## 謝辞

本研究は高速道路関連社会貢献協議会の研究助成によって行いました。オーレン6号橋の実橋試験を実施するに当たって、岩手県から多大なるご協力を頂きました。また、エミック(株)大野誠司氏には小型起振機の取り扱いについて有意な助言を頂きました。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 中川元宏, 庄健介, 上野勝大, 佐藤亮: 衝撃振動試験による構造物の健全性評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.595-600, 2000.7
- 2) 古川愛子, 大塚久哲: 高振動数領域のフーリエ振幅を用いた局所損傷同定, 応用力学論文集, Vol.11, pp.27-37, 2008.8
- 3) 大竹雄介, 内藤英樹, 鈴木基行: 共振特性に着目した RC 部材の剛性分布の推定, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-165, pp.327-328, 2009.9
- 4) 稲田貴臣, 島村佳伸, 轟章, 小林英男: 反共振周波数変化に基づく CFRP 積層梁のはく離領域の判定, 日本機械学会論文集, A 編, Vol.67, No.664, pp.1929-1935, 2001.
- 5) E. Douka, G. Bammios and A. Trochidis: A method for determining the location and depth of cracks in double-cracked beams, *applied acoustics*, Vol.65, pp997-1008, 2004.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] JIS 規格集, 2005.
- 7) 岡内功, 宮田利雄, 辰巳正明, 佐々木伸幸: 大振幅加振による長大斜張橋の実橋振動実験, 土木学会論文集, No.455/I-21, pp.75-84, 1992.10
- 8) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: 未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.258-267, 2007.3
- 9) 小坪清真: 入門建設振動学, 森北出版, 2000.