

論文 共鳴振動法によるコンクリート内部の損傷評価

齊木 佑介*1・内藤 英樹*2・平岡 拓朗*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部材の共鳴振動試験を提示した。提案手法は、小型起振機をコンクリート部材の上に配置することにより部材厚さ方向に振動を与え、縦振動の1次固有振動数からコンクリート内部の損傷を評価するものである。内部に空隙を導入した10体のコンクリート供試体に対して共鳴振動試験を行った結果、空隙の大きさに伴って1次固有振動数(縦振動)が低下することが示された。さらに、共鳴振動試験と3次元FEM解析との比較でも、このような空隙の大きさと固有振動数の低下との関係を見出すことができた。

キーワード：共鳴振動試験, 固有振動数, 縦振動, モード解析

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、道路橋においてもコンクリート床版の土砂化が健在化するなど、著しい劣化事例が報告されている。これまでもコンクリート内部のひび割れや空隙を検出する非破壊検査法は多く報告されており、鋼球の打撃による衝撃弾性波法¹⁾や超音波法²⁾などが挙げられる。しかし、これらの手法は、コンクリート内部の損傷の位置や大きさなどの詳細な情報が得られるが、検査対象となる領域が小さいため、橋梁などの大型構造物の点検では多くの測定が必要になる。これに対して、著者ら³⁾は、共鳴振動法に基づくコンクリート部材の健全度評価を検討している。提案手法は、振動系の1次固有振動数(部材厚さ方向の縦振動)を指標としてコンクリート内部の損傷の有無を判断するものであり⁴⁾、ひび割れ性状などの情報は得られないが、より広域を対象とした簡便な手法によって部材や構造物の中での最劣化箇所などが特定できれば、コンクリート構造物の維持管理に貢献できると考えている。

著者ら³⁾は、10cm×10cm×40cmの角柱供試体に模擬ひび割れを導入し、共鳴振動試験による縦振動の1次固有振動数に着目して、ひび割れ深さが高い精度で推定できることを示した。しかし、通常、コンクリート工学分野における共鳴振動試験(JIS A 1127⁵⁾)は材料の耐久性評価に用いられており、大型構造部材の共鳴振動試験を実施するためには、大きな加振力による強制振動を与える必要がある。これに対して、近年、電磁コイル式起振機の小型化およびデジタル振動制御技術が発達しており、このような小型起振機を用いればコンクリート部材の共鳴振動試験も可能になると考えた。

そこで、本研究は、小型起振機を用いたコンクリート

部材の共鳴振動試験を提示する。提案手法は、**図-1**に示すように、構造物の上に小型起振機を配置し、掃引試験(周波数スイープ試験)を行うことにより、起振機直下の共振(縦振動)を励起する。本稿はその基礎的検討として、内部損傷を模擬したコンクリート供試体を作製し、小型起振機による共鳴振動試験を行う。そして、試験方法の妥当性を検討し、コンクリート内部の損傷パターンと固有振動数の関係を整理した。

2. 小型起振機による共鳴振動試験

2.1 供試体の概要

供試体諸元と概略図をそれぞれ**表-1**と**図-2**に示す。A0は損傷を与えない供試体(以下、健全供試体)であり、これを基準として、**表-1**に示すように損傷の位置や大きさをパラメータとした計10体の供試体を作製した。供試体の一例を**写真-1**に示す。供試体は、**図-1**に示すようなコンクリート部材の一部を切り出したものを想定して、供試体高さ(部材厚さ)を250mmとした。また、縦振動の共振とそれ以外の振動モードが近接しないように、断面寸法を150mm×150mmとした。

9体の供試体では、厚さ10mmの発泡スチロール板を打設時に埋め込み空隙を導入した¹⁾。なお、本実験は基礎的検討に位置づけられるものであり、縦振動に対して

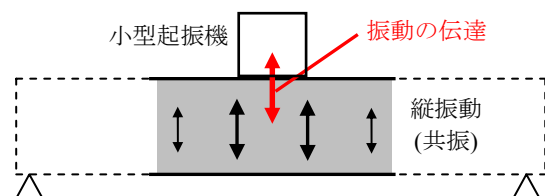


図-1 起振機による共鳴振動試験のイメージ

*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 静岡県 交通基盤部

*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)

表-1 供試体諸元の一覧

供試体名	損傷の位置	損傷率 (%) (損傷面積 / 部材断面積)
A0	なし	(健全)
A13	Type A	13
A28		28
A54		54
A64		64
B13	Type B	13
B28		28
B54		54
C	Type C	13%×4 箇所
D	Type D	54%×2 箇所

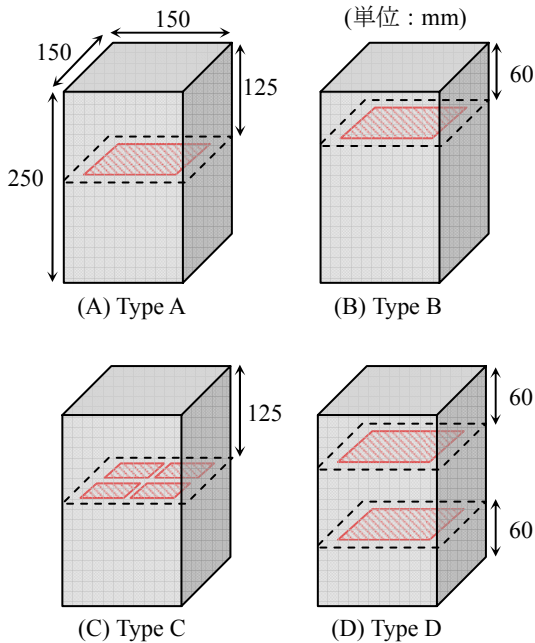


図-2 供試体概略図

損傷の影響が表れやすいように供試体上下面に対して水平に空隙を導入し、空隙の面積を段階的に変化させた。図-2に示す Type A の損傷パターンは、損傷位置を供試体高さの中央とし、損傷面積/部材の断面積(以下、損傷率)を13~64%まで変化させた。Type B の損傷パターンは、Type A の損傷位置を供試体の上部(供試体高さの1/4)に移動したものである。また、Type C は損傷率を54%として、供試体中央の模擬損傷を4つに分割した。Type D は供試体上部と下部の2箇所にそれぞれ損傷率54%の模擬損傷を導入した。

φ10cm×20cm の円柱供試体によるコンクリートの材料試験の結果は、動弾性係数 30,800MPa、密度 2.23g/cm³ であった。円柱供試体の動弾性係数は、JIS A 1127⁵⁾ に適

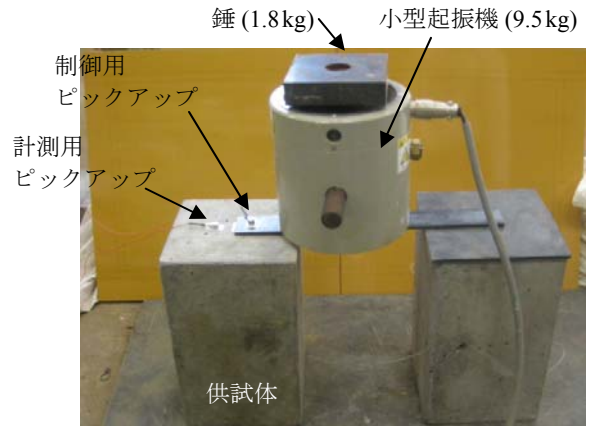


写真-1 測定状況

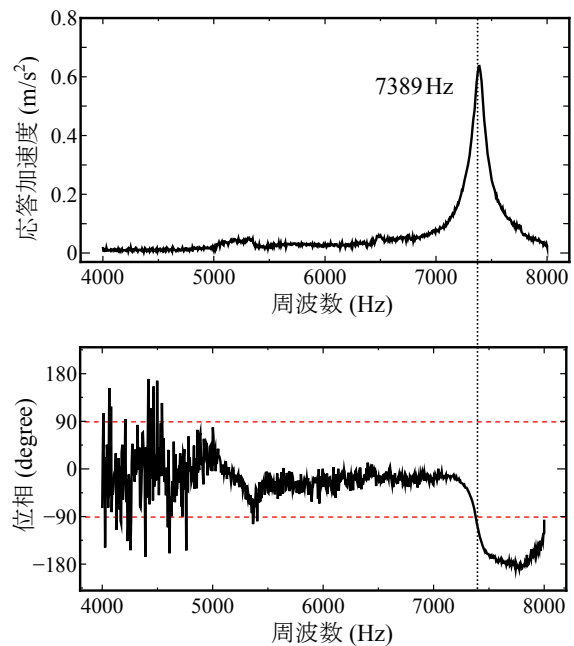


図-3 健全供試体 (A0) の共振曲線

合したコンクリート材料試験用の測定機器によって測定した。

2.2 試験方法

小型起振機を用いたコンクリート供試体の共鳴振動試験の状況を写真-1に示す。振動テーブルに錘(1.8kg)を固定した起振機を供試体の上に設置し、錘を鉛直方向に振動させる。起振機下面に貼付した鋼板を介して、起振機本体に発生する振動を供試体上面から伝達させた。供試体上面に接している鋼板の先端には、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、入力加速度の振幅が一定になるように、デジタル振動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、2~10,000Hzの周波数帯での掃引試験が可能である。さらに、供試体上面に貼付した測定加速度ピックアップ(圧電素子加速度センサ)によって、供試体の共振

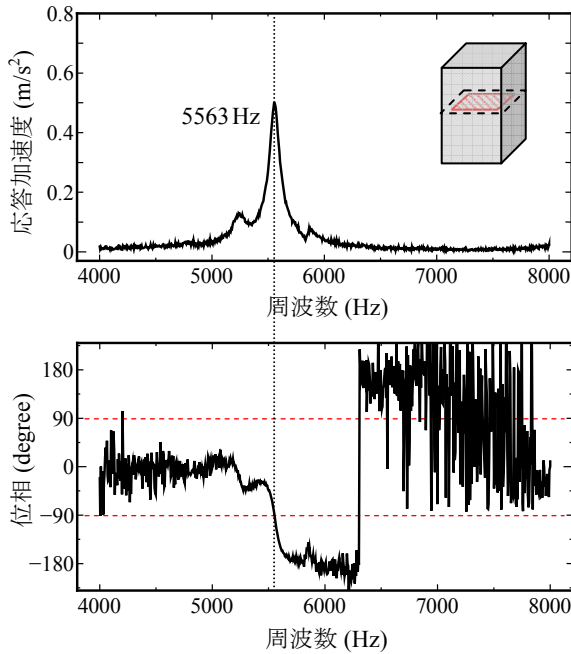


図-4 A54 供試体の共振曲線

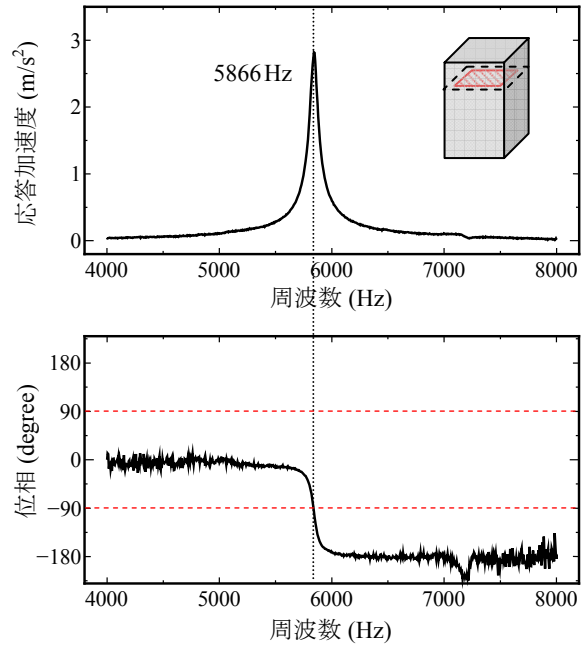


図-5 B54 供試体の共振曲線

曲線(周波数-応答加速度関係)と位相特性を得る。

本実験では、掃引周波数を4,000~8,000Hzとし、制御加速度ピックアップの振幅が2.0m/s²となるように起振機の出力を制御した。測定時間は5分間である。

2.3 実験結果

写真-1の共鳴振動試験によって得られる健全供試体A0の共振曲線と位相特性を図-3に示す。図-3より、健全供試体A0では7389Hzに明確な応答加速度のピークが見られた。このとき、位相は-90°に対応しており、7389Hzが縦振動の1次固有振動数となる⁶⁾。ポアソン比を無視したときの縦振動の1次固有振動数の理論式を以下に示す。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 f は1次固有振動数、 E_d は動弾性係数、 L は供試体高さ(部材厚さ)、 ρ は密度である。

健全供試体A0の1次固有振動数($f=7389$ Hz)を式(1)に代入して得られる動弾性係数は31,700MPaであり、円柱供試体の試験結果(30,800MPa)と概ね対応した。このことから、小型起振機を用いた写真-1の測定は妥当であると判断される。

損傷箇所を供試体中央としたType Aの中で、損傷率を54%としたA54供試体の共振曲線を図-4に示す。図-4より、明確な応答加速度のピークが表われ、位相-90°と対応した。コンクリート内部に損傷が存在することにより、固有振動数が健全供試体よりも低下し、5563Hzが1次固有振動数となった。

損傷箇所を供試体上部としたType Bの中で、損傷率を

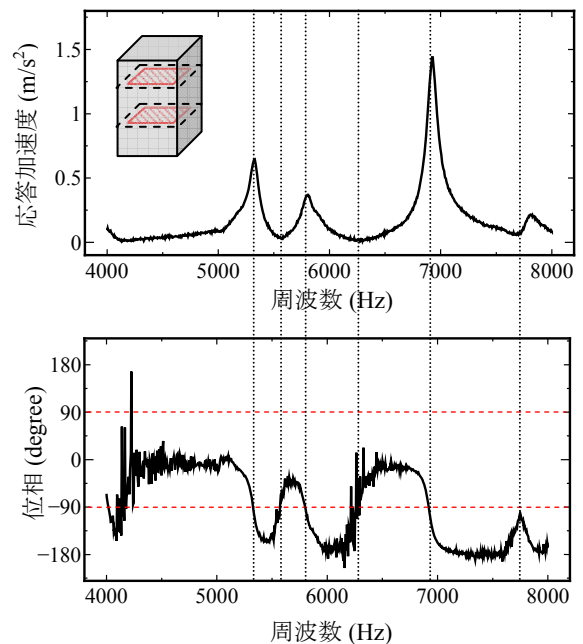


図-6 D 供試体の共振曲線

54%としたB54供試体の共振曲線を図-5に示す。振動方向に対して損傷が非対称に存在する場合でも、図-3や図-4と同様に、応答加速度に明確なピークが見られた。このとき、位相特性は-90°に対応しており、A54供試体よりもやや高い5866Hzが1次固有振動数となった。損傷位置が異なるA54供試体との固有振動数の違いは、後述するFEM解析でも検討する。なお、Type Bシリーズでは、供試体の上下面を反転させた測定でも同様の共振曲線が得られることを確認した。

A54供試体の損傷を4等分したC供試体でも、明確な

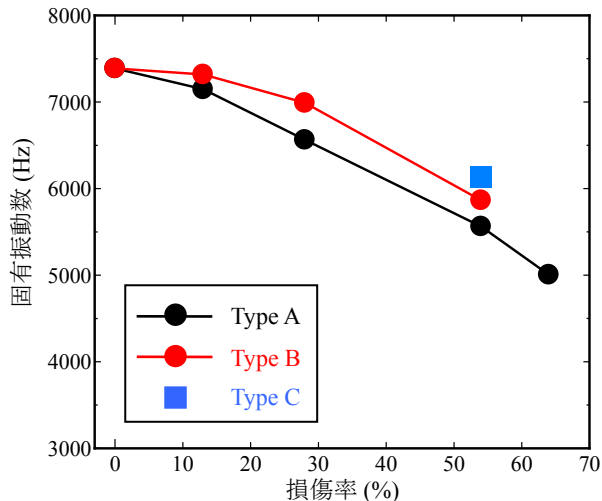


図-7 損傷率と固有振動数の関係

応答加速度のピークが見られ、A54 供試体よりもやや高い 6136Hz が 1 次固有振動数となった。

模擬損傷を供試体の上下部分に導入した D 供試体の共振曲線を図-6 に示す。その他の供試体とは異なり、応答加速度に複数のピークが表れた。このとき、位相特性も複数の箇所にて -90° となった。別途行った FEM 解析の検討では、これらの複数の共振点がどのような振動モードに対応するかは明らかにできなかったが、健全供試体 A0 とは明らかに異なる共振曲線を描くことから、損傷の有無を判断することは可能である。また、図-6 の共振曲線では、振動が最も励起されない周波数(反共振周波数)に対して位相 -90° に対応した^{7),8)}。提案する小型起振機による共鳴振動試験は、このような小さな応答加速度しか得られない周波数帯に対しても、精緻な共振曲線の評価が可能であった。

その他の供試体の固有振動数を図-7 にまとめて示す。前記のように、D 供試体では固有振動数が特定できないため図-7 からは除外している。損傷位置が異なる Type A と Type B の比較では、いずれの損傷率に対しても供試体中央に損傷がある Type A の固有振動数が小さい。また、縦振動の 1 次固有振動数の低下には、損傷の位置や形状の違いよりも、損傷の大きさ(損傷率)が影響することを確認した。

2.4 試験方法の有用性に関する考察

以上より、小型起振機を用いたコンクリート部材の共鳴振動試験は可能であり、縦振動の 1 次固有振動数の低下に着目してコンクリート内部の損傷が探査できる可能性が示唆された。しかし、図-7 の損傷率と固有振動数の関係に示されるように、損傷の位置と大きさ、あるいは損傷形状の組み合わせによっては同じ固有振動数が得られるため、固有振動数のみをパラメータとしても

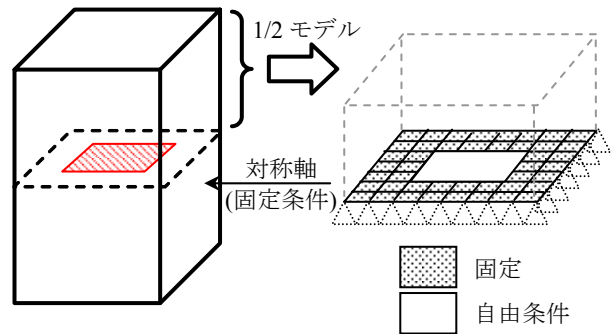


図-8 FEM モデルの概要

これらの損傷パターンを一意に定めることはできない。さらに、実際の構造物では、図-2 に示すような単純化された損傷が分布することはなく、図-6 の測定結果のようにピークが複数存在する共振曲線が得られることが予想される。しかし、健全部分との比較により、起振機直下にある損傷の存在を確認することは本試験方法を用いて可能であると考えられる。

提案手法は、小型起振機の加振力を増減することにより、検出可能な領域を変化させることができる。しかし、そのためには、今後、大型供試体や実構造物を対象とした振動試験を行い、加振力と対象領域の関係、および検出可能な損傷レベルを明らかにする必要がある。

3. FEM によるモード解析

3.1 概説

上記の小型起振機を用いたコンクリート供試体の共鳴振動試験によって、模擬損傷の大きさや位置に対する固有振動数の低下を整理した。以降では、3 次元 FEM モデルによるモード解析(固有値解析)を行い、実験結果の妥当性を検討する。

3.2 解析モデルの概要

式(1)は両端自由条件における等断面棒部材の振動方程式(縦振動)の解であるが、図-2 に示すような部材内部にひび割れなどの損傷がある場合には、この振動方程式の解を陽に得ることができない。そこで、表-1 の供試体諸元に対して、FEM によるモード解析を行う。

汎用有限要素法プログラム MARC を用いて、モード解析により縦振動の 1 次固有振動数を求めた。解析モデルの概要を図-8 に示す。解析は 1/2 モデルとし、16 節点立方体ソリッド要素(1000 要素)を用いてモデル化した。すなわち、供試体高さの中央面は固定条件である。一方、供試体内部の空隙箇所では、この 1/2 モデルの作成において境界条件を自由とした⁹⁾。なお、損傷が非対称に存在する Type B の解析では、図-8 に示す対称軸が供試体高さの中央と一致しないため、整合性が得られるまで対

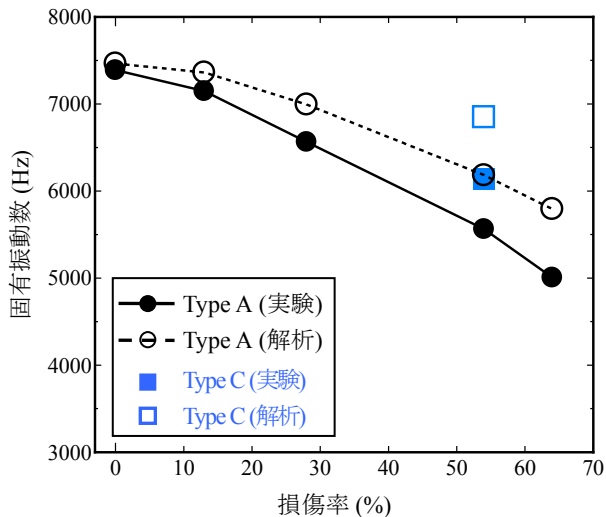


図-9 FEM 解析による固有振動数 (TypeA, TypeC)

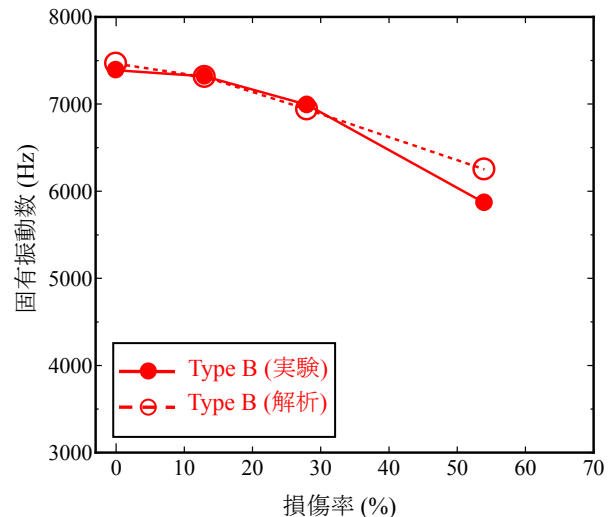


図-10 FEM 解析による固有振動数 (TypeB)

称軸の高さを変更して解を得た。材料特性は、円柱供試体の材料試験結果より、動弾性係数 30,800MPa、密度 2.23g/cm³とし、動ポアソン比は 1/6 を仮定した。

3.3 解析結果

FEM 解析の結果と実験結果を併せて図-9 および図-10 に示す。損傷率が高い供試体では、解析結果は実験結果よりもやや大きい固有振動数を算定した。しかし、損傷の大きさと共振周波数との関係は、FEM 解析でも実験結果と同様の傾向を得ることができた。なお、本解析モデルでは、損傷位置による固有振動数に有意な差異は見られなかった。

以上より、損傷率の増加による固有振動数の低下は、解析結果と実験結果で概ね整合していることから、前記の実験結果は妥当であると判断される。

4. まとめ

本研究は、小型起振機を用いたコンクリート部材の共鳴振動試験を提案し、供試体実験と FEM 解析との比較から、試験方法の妥当性を確認した。また、コンクリート供試体による検討では、内部の損傷によって縦振動の 1 次固有振動数(縦振動)が低下することを確認し、本実験の範囲では、損傷の位置や形状よりも損傷の大きさが固有振動数の低下に大きく影響することを示した。

提案手法は、例えば、コンクリート床版の上面から作業によって、コンクリート内部の損傷の有無が推定できると考えられる。提案手法では、ひび割れの位置や大きさなどの詳細な情報は得られないが、衝撃弾性波法や超音波法よりも広範囲の領域が検査可能であり、今後、衝撃弾性波法や超音波法などの 2 次診断と併用した合理的な維持管理手法への適用が期待される。しかし、そのためには、小型起振機の出力と検査領域(振動の伝達範囲)および検査精度・検査可能な損傷レベル、配筋の影響な

どを明らかにする必要がある、今後、はり部材や床版部材を模した供試体実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 中山和也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 大西弘志: 衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2113-2118, 2009.7
- 2) 吉田秀典, 高橋恵介, 塚孝司: 超音波法を用いたコンクリートのひび割れ深さの同定に関する研究, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.121-133, 2003.5
- 3) 林弘, 内藤英樹, 鈴木基行, 齊木佑介, 山洞晃一, 古賀秀幸: 共鳴振動試験によるコンクリートのひび割れ深さの推定, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-214, pp.425-426, 2009.9
- 4) 伊東良浩, 魚本健人: ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の打撃音, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.169-176, 1997.5
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 規準編, 2005.
- 6) 小坪清真: 入門建設振動学, 森北出版, 2000.
- 7) 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.
- 8) E. Douka, G. Bamnias and A. Trochidis: A method for determining the location and depth of cracks in double-cracked beams, *applied acoustics*, Vol.65, pp997-1008, 2004.
- 9) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有する繊維補強コンクリートの凍結融解試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1135-1140, 2009.7

