

周波数スイープ音波を用いた壁面加振による コンクリート構造物の非破壊検査*

森 和也*¹, 鳥越 一平*²
百崎 敦彦*³, 岩本 達也*⁴

Nondestructive Inspection of Concrete Structures by Using Frequency Sweep Sound Wave

Kazuya MORI*⁵, Ippei TORIGOE,
Nobuhiko MOMOSAKI and Tatsuya IWAMOTO

*⁵ Department of Mechanical Engineering and Material Science, Faculty of Engineering, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

We developed a nondestructive-inspection method for concrete structures by using frequency sweep sound wave. When irradiating sound waves with one frequency produced by a speaker to a concrete wall with a defect, the region between the defect and the concrete surface resonates. Then by irradiating frequency sweep sound wave we can detect defects with arbitrary natural frequency. The vibration of the surface is measured with laser Doppler vibrometer and internal defects are detected based on the vibration. We inspected concrete specimens containing an artificial defect by the present method. As a result, a disk-shaped defect of 200 mm in diameter and 100 mm in depth could be inspected successfully, where the frequency was continuously changed from 1 kHz to 10 kHz while 10 seconds. In addition, we examined the effect of laser scanning velocity to vibration measurement. The scanning velocity should be under 1 m/s when the measuring frequency is 5 kHz to recognize a dominant natural frequency.

Key Words: Nondestructive Inspection, Sound, Laser-aided Diagnostics, Concrete, Non-contact

1. 結 言

コンクリート構造物の耐用年数は約200年以上と考えられてきたが、近年、トンネルや高架などのコンクリート片の落下事故が続き、社会的な関心を集めている⁽¹⁾。広大な検査領域を持つコンクリート構造物に対しては、作業効率の優位性のために、従来から打音検査が利用されてきた。しかしながら、打音検査の信頼性は、作業者の技量によるところが多く、欠陥の見落としが起り得る。実際に、検査が行われた箇所においてもコンクリート片の落下事故が起きている。そこで、現在様々な自動化の試みが行われている。特に、鉄道トンネルに対するこれらの取り組みは活発であり、これらは森島ら⁽²⁾によって報告されている。

著者らは、そのひとつの方法として、衝撃波とレーザー計測を用いた方法を開発した⁽³⁾⁽⁴⁾。衝撃波管で衝撃

波を発生させ、コンクリート壁面を加振して、その振動をレーザー・ドップラー振動計で計測するというものである。この方法は広い面積を同時に計測できるので、作業効率の点で優れている。しかしながら、衝撃波の発生には大掛かりな装置が必要であり、衝撃波の騒音もかなり大きい。

そこで、著者らはコンクリート壁面の加振装置として、スピーカーにより発生させた音波を用いる方法を提案する。この方法では、衝撃波管を用いた方法に比べ、(1)装置が簡便である、(2)スピーカーによる音波は空気の密度変動が小さいので、レーザー計測に影響を及ぼさない、(3)連続的な検査が容易である、(4)安全である、等の特徴を有する。

本研究では、人工欠陥を導入したコンクリート試験片に対して計測を行ない、本検査法の有効性を確認した。また、広大な検査領域を持つコンクリート構造物を効率的に検査するためには、連続的な計測が必要であることから、レーザーの走査速度が重要となってくる。そこで、円盤状の試験片を回転させ、表面振動を計測することにより、振動計測に及ぼすレーザー走査速度の影響を調べた。

* 原稿受付 2006年3月2日。

*¹ 正員、熊本大学大学院自然科学研究科(☎860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。

*² 熊本大学大学院自然科学研究科。

*³ ボッシュ(株)(☎150-8360 東京都渋谷区渋谷3-6-7)。

*⁴ 有明工業高等専門学校機械工学科(☎836-8585 大牟田市東萩尾町150)。

E-mail: kmori@mech.kumamoto-u.ac.jp

2. 音振加振による非破壊検査法

2.1 原理 図1に示すように、コンクリート壁面に欠陥がある場合、音波の振動数 f と、コンクリート壁面と欠陥との間の部分のたわみ振動の固有振動数 f_0 とが近いと、共振現象によって、この部分は大きなたわみ振動を生じる。

そこで、図2に示すように、ある一定時間間隔の間に、音波の加振周波数を f_L から f_H まで変化させ、C点において音波の周波数 f が f_0 に一致したとする。壁面振動のスペクトルは、図3に示すように、C点のみ大きなピークを生じる。そのピークの位置から f_0 を求めることができる。

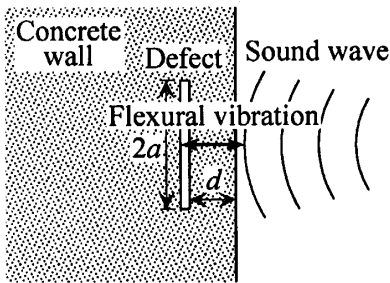


Fig. 1 Flexural vibration

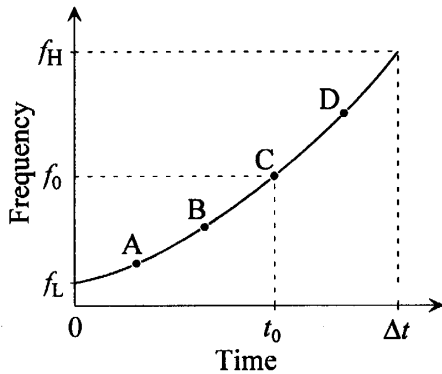


Fig. 2 Sweep of frequency

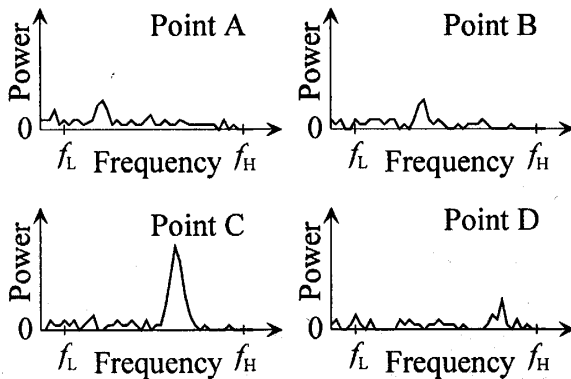


Fig. 3 Power spectrum

欠陥の寸法および深さの情報は、検査面の多数の点を同時に計測することで推定することが可能である。欠陥の大きさは、たわみ振動の広がりから推定することができ、また欠陥の深さは、欠陥の大きさと f_0 と関係および振動の大きさから推定することが可能である⁹⁾。

2.2 試験装置および実験方法 図4に、非破壊検査システムを示す。コンピュータにより正弦波信号を発生させ、増幅器を用いてスピーカーを駆動する。スピーカーによって音波が発生し、コンクリート表面を加振する。壁面の振動は、レーザー・ドップラー振動計を用いて計測し、A/D変換ボードを介してコンピュータに取り込まれる。

試験片は、一辺が約500 mmの立方体で、厚さ10 mmの円盤状のポリスチレンの人工欠陥を導入した(図5参照)。欠陥の寸法を表1に示す。コンクリートの配合は、セメント300 kg/m³、水168 kg/m³、細骨材824 kg/m³、粗骨材992 kg/m³とした。試験時の試験片の密度、ヤング率、ポアソン比はそれぞれ、 $\rho = 2380 \text{ kg/m}^3$ 、 $E = 25 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.19$ であった。

衝撃弾性波法を用いて測定した、たわみ振動の固有振動数 f_0 を表1に示す。 ρ 、 E および ν の値を試験片の値と等しくおくと、欠陥寸法 $2a$ 、深さ d とたわみ振動の固有振動数 f_0 との関係は、図6のようになる⁹⁾。

Table 1 Defect size and natural frequency

Diameter $2a$ (mm)	Depth d (mm)	Natural frequency f_0 (Hz)
200	25	2650
200	50	3140
200	100	3420

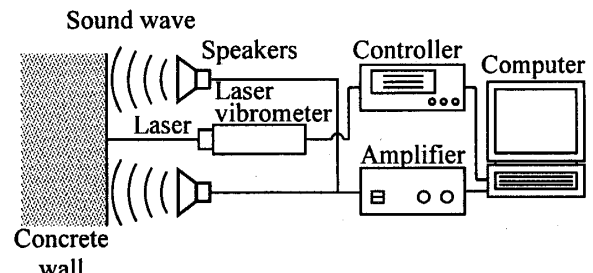


Fig. 4 System of nondestructive inspection

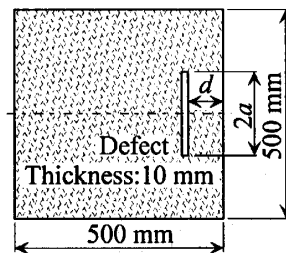


Fig. 5 Cubic concrete specimen

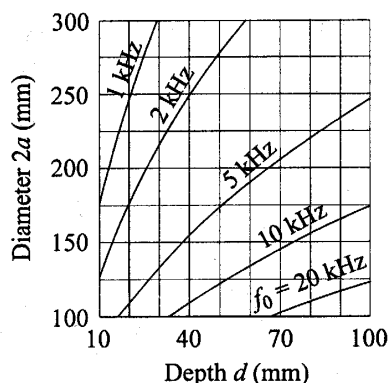


Fig. 6 Natural Frequency of flexural vibration

図6より、探傷する欠陥を $2a=200$ mm, $d=100$ mm 程度とすれば、加振周波数 f の下限と上限を $f_L=1$ kHz, $f_H=10$ kHz とおけばよいことがわかる。そこで、 $f_L=1$ kHz, $f_H=10$ kHz とした。周波数を変化させる時間間隔 Δt は、2.5s, 5.0s, 10s の3種類とし、壁面振動の測定は、欠陥中心上の壁面の点のみを測定した。

2.3 実験結果 図7から図9に実験結果を示す。時間間隔におけるコンクリート壁面の速度スペクトルの時間変化を示したものである。 Δt を40分割し、各点の5msの信号を用いてスペクトルを求め、時間順に並べた。

図7の浅い欠陥（深さ $d=25$ mm）の結果は、明確なピークが現れ、その振動数は表1に示す固有振動数に一致した。この場合、加振が容易であったので、 $\Delta t=2.5$ sの短い加振時間（計測時間）で固有振動数を捕らえることができた。

図8, 9の深い欠陥では、速度振幅の大きさが小さいので、相対的に固有振動数ではない信号のスペクトルが大きくなった。このような場合は、加振時間を長くする必要があった。ここでは、 $\Delta t=10$ (s)の結果を示している。いずれの場合もピークにおける周波数は、固有振動数に一致した。

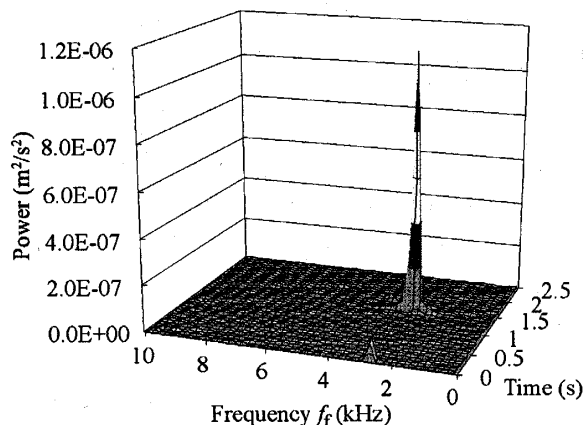
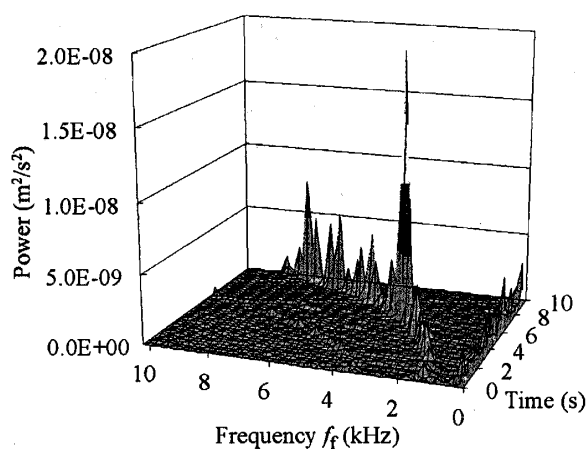
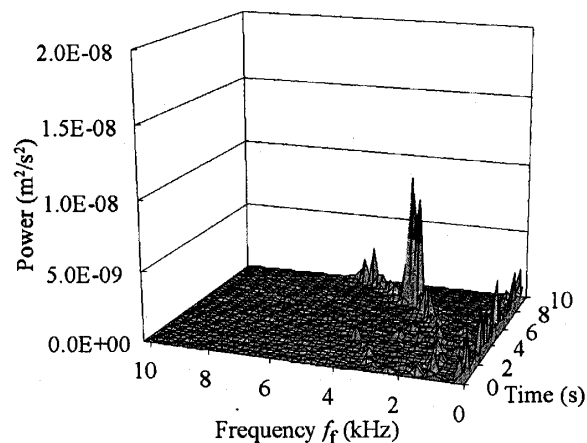
図7から図9の結果から、直径 $2a=200$ mm 程度の欠陥では、深さ $d=100$ mm まで、音波を用いた加振によって欠陥を検出することが可能であることが確認できた。

3. 振動計測における走査速度の影響

実際の計測では、レーザー速度計を移動させながらトンネルなどのコンクリート壁面を計測するのであるが、本研究ではレーザー・ドップラー振動計を固定して、試験片を回転移動させることによって走査速度を得る方法を採用した。

3.1 試験装置および試験片

図10に試験装置

Fig. 7 Time-domain spectrum change ($d=25$ mm, $\Delta t=2.5$ s)Fig. 8 Time-domain spectrum change ($d=50$ mm, $\Delta t=10$ s)Fig. 9 Time-domain spectrum change ($d=100$ mm, $\Delta t=10$ s)

を示す。円盤状コンクリート試験片をスピーカーの可動部分に貼り付け、スピーカーをターンテーブルの上に固定した。スピーカーの端子はスリッピングを介して増幅器・発信機へと接続した。

図 11 に示すように、試験片としては、直径 76 mm、厚さ 10 mm の円盤状のモルタルを用いた。骨材はモルタル内部に存在し、表面にはほとんどが骨材が現れないからである。モルタルの配合は、セメント 277 kg/m³、水 183 kg/m³、細骨材 890 kg/m³ とした。コンクリートの振動計測面は化粧板で成形した。

レーザー・ドップラー振動計の測定点は、コンクリート試験片の回転中心から r 隔てた点とした。試験片を角速度 ω で回転させれば、 $u = r\omega$ の走査速度を得ることができる。

レーザー・ドップラー振動計を用いて計測されたコンクリート試験片の表面振動の信号は、A/D 変換ボードを用いてコンピュータに取り込んだ。

3・2 実験方法 以下の条件で、コンクリート試験片の振動速度を計測した。試験片の振動は、一定周波数の正弦波で駆動した。また、図 6 よりコンクリート試験片の加振周波数 f は、1 kHz、2 kHz、5 kHz および 10 kHz とした。また計測速度 u は、0.1 m/s、0.2 m/s、0.5 m/s、1.0 m/s および 2.0 m/s とした。

- (1) ターンテーブルを回転させず、試験片を加振させた状態で、試験片表面の垂直方向速度を測定する。
- (2) 試験片を加振せず、ターンテーブルを回転させた状態で、試験片表面の垂直方向速度を測定する。
- (3) 試験片を一定の出力で加振し、ターンテーブルを回転させ、試験片表面の垂直方向速度を測定する。

(1) の振動計出力は、走査による雑音が含まれないので、ほとんどすべて「信号」とみなすことができる。
 (2) で得られる振動は、すべて「雑音」である。(1) の場合の出力と (2) の場合の出力のパワーの比から SN 比を推定することができる。したがって、(3) が実際の測定条件に準ずる条件である。(3) で得られた信号を高速フーリエ変換 (FFT) してパワースペクトルを求め、加振周波数が明らかに認識可能かを判断した。この結果と (1) と (2) で算出した SN 比を比較し、測定限界の SN 比を判別する。

試験片の振動の速度振幅は、1.0 mm/s となるようにした。この値は、衝撃波や音波によってコンクリート壁面を加振したとき得られる振動速度の値と同程度である^{(3),(4)}。

3・3 実験結果 表 2 に、それぞれの周波数・走査速度における SN 比の結果を示す。図 12 はこの結果をグラフにしたものである。表 3 は、コンクリート試験片を加振し、ターンテーブルを回転させて得られたパワースペクトルから、加振周波数が認識可能かどうかを判定した結果である。

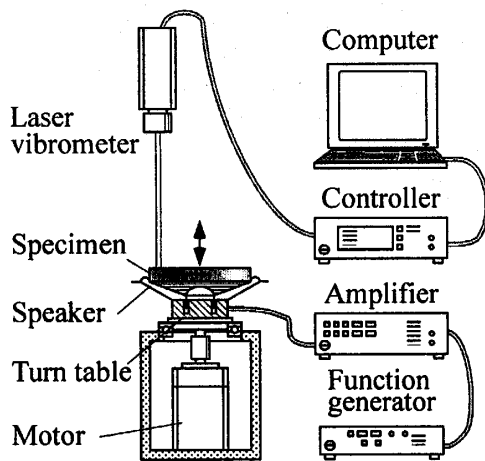


Fig. 10 Experimental apparatus

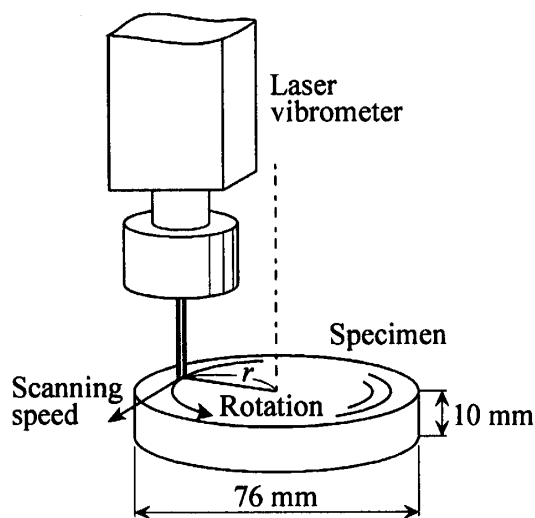


Fig. 11 Vibration measurement

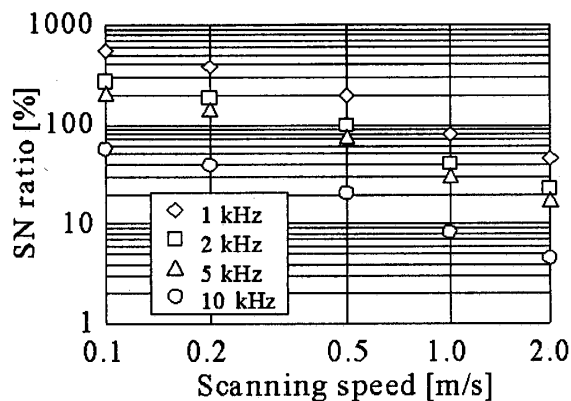


Fig. 12 SN ratio vs scanning speed

Table 2 SN ratio [%]

Frequency [kHz]	Scanning speed u [m/s]				
	0.1	0.2	0.5	1	2
1	546	376	202	81	45
2	270	186	100	40	22
5	208	143	77	31	17
10	55	38	20	8.2	4.6

Table 3 Judgement for Ditection Possibility

Frequency [kHz]	Scanning speed u [m/s]			
	0.1	0.2	0.5	1
1	○	○	○	○
2	○	○	○	△
5	○	○	○	△
10	○	△	×	×

○:goodness, △:possible, × impossible

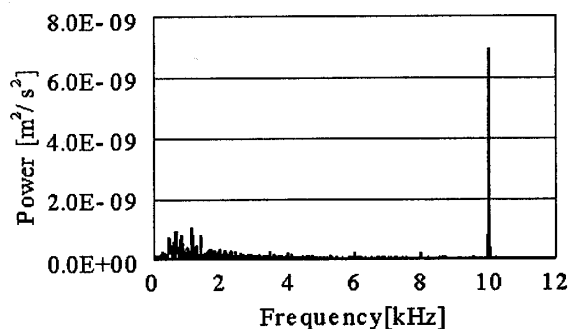


Fig. 13 Power Spectrum

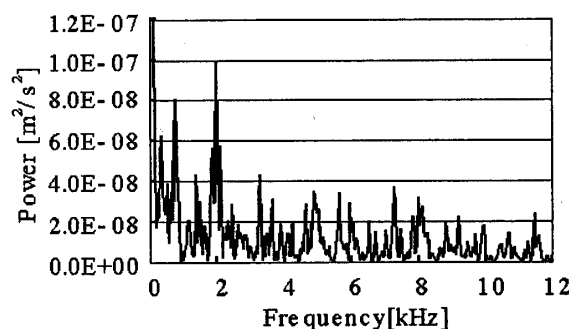
 $(u = 0.1\text{ m/s}, f = 10\text{ kHz}, S/N = 55\%)$ 

Fig. 14 Power Spectrum

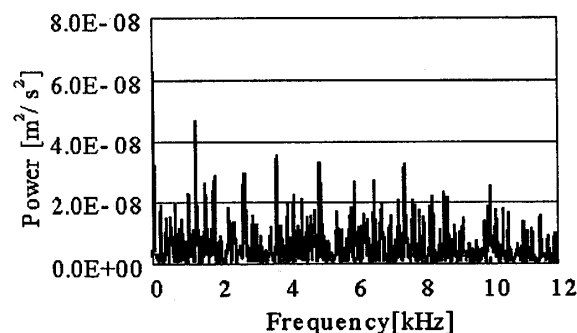
 $(u = 1.0\text{ m/s}, f = 2\text{ kHz}, S/N = 40\%)$ 

Fig. 15 Power Spectrum

 $(u = 2.0\text{ m/s}, f = 10\text{ kHz}, S/N = 4.6\%)$

判定に際し用いた、パワースペクトルの例を図 13 から図 15 に示す。図 13 は、明らかに認識可能である場合の例 ($u = 0.1\text{ m/s}, f = 10\text{ kHz}, S/N = 55\%$) である。

図 14 は、認識できる限界の例 ($u = 1.0\text{ m/s}, f = 2.0\text{ kHz}, S/N = 40\%$) である。加振した周波数 $f = 2.0\text{ kHz}$ において、卓越したピークが確認できる。

図 15 は、認識困難な場合の例 ($u = 2.0\text{ m/s}, f = 10\text{ kHz}, S/N = 5\%$) である。

図 12 より、SN 比は走査速度が大きくなるに従い小さくなっている。また、加振周波数が高くなるに従い小さくなっていることが確認できる。表 2 と表 3 を比較してみると、SN 比がおおよそ 50% 以上の信号に対しては、加振周波数が認識可能であることがわかる。

以上の結果から、SN 比が 50% 以上になるように衝撃波や音波のエネルギーを保つことによって、レーザーを走査しながら振動計測を行うことが可能である事が確認された。

3・4 実際の計測における適正な走査速度

ここでは、以上の結果に基づいてどのようにして走査速度を決定すればよいかを考察する。

(1) 加振装置の能力および検出する目標の欠陥形状 (寸法・深さなど) から、欠陥が存在する場合に生じるであろう表面振動の大きさを推定する。これをシグナルレベル (S) とする。

(2) 音響加振を行わないで、走査速度を変化させて振動速度を計測し、走査速度とノイズ (N) との関係を明らかにする。

(3) 以上で求められた S/N 比が 50% 以上となる走査速度が適正な走査速度となる。

なお、(1) は標準試験片を用いてシグナルレベルを測定すれば、信頼性の高い結果が得られる。

4. 結 言

音波を用いて検査面を加振し、コンクリート内部の欠陥を検出する方法を提案し、人工欠陥を導入したコンクリート試験片に対して計測を行なった結果以下のことが明らかとなった。さらに、円盤状の試験片を回転させ、表面振動を計測することにより、以下の結果を得た。

- 1) この方法を用いると、直径 200 mm 程度の欠陥では、深さ 100 mm までの欠陥を検出することができる。
- 2) 深い欠陥ほど、加振させるために必要なエネルギーが大きいため、加振時間 (計測時間) を長く必要とする。
- 3) 走査速度および加振周波数が振動計測に与える影響は以下の通りである。走査速度が大きくなるに従い SN 比は小さくなる。また、加振周波数が高くなるに従い SN 比は小さくなる。
- 4) 固有振動数が認識可能な走査速度は、SN 比が 50% 以上になるように決定することで得られる。

文 献

- (1) Kobayashi, K., *Concrete crisis in Japanese*, (1999), pp. 1-230, Iwanami Shoten.

- (2) Morishima, Y., Odaka, T., Concrete Structures and Non-destructive test in Japanese, *JR East Technical Review*, No.02 (2003), pp. 011-017.
 - (3) Mori, K. et al., A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete, *NDT&E International*, Vol. 35 (2002), pp. 399-406.
 - (4) Iwamoto, T. et al., Development of Excitation Device for Non-Destructive Inspection in Concrete Structures Using Gas Combustion, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 71, No.712 (2005), pp. 1729-1734.
 - (5) Blevins R. D., *Formulas of Natural Frequency and Mode Shape*, (1978), p. 240, Van Nostrand Reinhold Co.
-