

局所的な振動特性に着目した コンクリート構造物の空隙検出

貝戸清之¹・阿部雅人²・藤野陽三³・熊坂和宏⁴

¹正会員 博士(工学) コロンビア大学客員研究員 土木工学専攻 (500 West 120th Street New York, NY 10027)
(研究当時 東京大学大学院博士課程)

²正会員 Ph.D 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

³フェロー会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

⁴学生会員 東京大学大学院生 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

コンクリート構造物の損傷検出に対する目視・打音検査は、有効な検査手段であるが、検査結果の信頼性・客観性と作業の安全性に問題がある。そこで、非接触スキャニング振動計測が可能なレーザードップラ速度計を用いて構造物の振動特性に着目した損傷検査手法の構築を試みた。コンクリート供試体を用いた実験では一例として空隙検出に着目し、鋼球による打撃入力を与えながら供試体の振動計測を行い、その振動モード形から空隙部分を視覚的に検出できることを示した。さらに、作業の効率性と安全性の向上を目的として、音圧加振を用いた入出力ともに完全な非接触検査手法も提案した。その結果、打撃加振時と同様に空隙部の局所的な振動モード形から空隙部を視覚的に判断することが可能であることが明らかとなった。

Key Words: laser doppler vibrometer, non destructive testing, concrete structure, void, energy ratio, mode shapes

1. はじめに

構造物の損傷による事故が相次ぎ、維持管理の重要性が再認識されるようになった¹⁾。一般に、維持管理は、1次検査(定期検査、緊急検査)と2次検査(詳細検査)からなる。1次検査は広い範囲を対象として構造物の損傷の有無や位置を検出するもので、2次検査は1次検査よりも狭い範囲を対象として損傷の位置、程度や原因を調べるものである²⁾。

道路などの社会基盤施設は、一旦供用が開始されると、その使用を停止させて定期的に検査することや一部を抜き取って検査することが難しいものが多い。そのため、2次検査においては具体的な検査手法として様々な非破壊検査手法が提案され、適用が進められている^{3), 4)}。

ところが、1次検査では未だに目視・打音検査などの経験的・主観的な手法が主流である。これは、それらの手法が短時間に広い範囲を検査できるという利点を持つからである。つまり、作業効率が1次検査では重

要な要素となっているといえる。しかし、維持管理を必要とする構造物の数は増え続けており、経験的・主観的手法に依存した現状の方法では将来破綻を来す恐れもある。また、目視・打音による検査結果は信頼性に問題があるだけでなく⁵⁾、データベースの構築が困難であることも指摘されている。さらに、社会基盤施設を対象とすると高所作業を強いられることも多く、作業の安全性の面からも問題がある。

そこで、構造物の損傷を客観的に評価することができる定量的指標の1つとして構造物の固有振動数や振動モード形といった振動特性に着目する方法がある。これは、振動特性が構造物の質量・剛性等の材料特性から決まるために、損傷による材料特性の変化が直接振動特性の変化として現れることを利用するものである。これらの定量的指標を用いることで1次検査における検査結果の信頼性の向上を図ることができる。

しかしながら、従来の振動計測では計測器として接触型の加速度計を用いるために、目視・打音検査と同様に社会基盤施設等の大型構造物においては高所危険

作業を伴うことになる。とくに、振動特性のなかでも振動モード形は、空間的な振動情報が得られるために、広範囲を対象とできるだけでなく局所的な損傷に対しても有効であるとされているが、計測点が多くなる分、作業効率が極端に低下する。また、接触条件により結果がばらつくといった問題もある。

そこで、本研究では計測器としてレーザードップラ速度計に着目し、非接触かつ多点の振動計測を実現することにより計測器の設置の手間や接触条件によるばらつきという従来の問題を解決することを試みる。そして、レーザー振動計測結果から同定した固有振動数と振動モード形を用いて損傷箇所を検出することで、従来の目視・打音検査に代わり得る定量的検査手法を提案する。

レーザードップラ速度計は、これまで機械振動の分野において盛んに適用されており、スキャンニング振動計測による振動モード形の同定手法^{6),7)}も提案されている。しかし、それらは計測対象がレーザー反射率の高い鋼材を対象とし、加振が容易かつ加振力の計測が可能なケースを対象としていた。これに対し、著者らは入力が未知の常時微動下でコンクリートを対象とした振動モード形の同定を行っているが^{8),9),10)}、具体的な損傷を取り上げて検出するには至っていない。

実験では、理論解析の容易さから具体的な損傷としてコンクリート構造物の空隙を取り上げる。これは、実構造物に対して、実際に打音検査が適用されているコンクリート充填度合いの把握やトンネルのコンクリート覆工部と地山の間における背面空洞の検出への適用を見据えたものである。

はじめに、空隙を有する2種類のコンクリートブロックを供試体として用いた振動計測実験を行う。それぞれの供試体に対して鋼球による打撃加振によって表面振動を励起し、その時の振動計測結果から固有振動数を同定する。そして、パワースペクトル密度のエネルギー比を算出し、空隙部固有の振動数を把握することで、空隙部を定量的に判断することが可能となることを示す。さらに、そのときの固有振動数における振動モード形、すなわち空隙部固有の局所的な振動モード形から空隙部を視覚的に検出することを試みる。また、実験結果の妥当性については、理論解析を行い、同定結果と解析結果の振動特性を比較することで検証する。

つぎに、レーザードップラ速度計による非接触計測の利点を活かすために、打撃加振に代わる入力としてスピーカを用いた音圧加振を適用して入出力ともに非接触な空隙検出手法を提案する。先と同実験を通して、得られた同定結果は打撃加振時の結果と遜色なく同様に空隙部を検出できることを示す。

表-1 レーザードップラ速度計諸元

レーザータ입	He-Ne レーザー
波長	633nm
レーザー出力ノクラス	2.3mW/IIIa
計測可能距離	~100m
分解能	0.5μm/s
計測可能周波数帯域	0Hz~35kHz
レーザー照射角	-15~15度

2. 非接触スキャンニング振動計測システムの概要および振動特性の同定手法

(1) レーザードップラ速度計

用いたレーザードップラ速度計の仕様を表-1に示す。レーザードップラ速度計は、レーザー光を移動物体に照射し、その照射光と反射光の周波数差から速度を検出する光学式干渉計である¹¹⁾。本機の最大の特徴は、レーザー光の照射角度を自動制御することにより、非接触スキャンニング振動計測ができることである。これより、大型構造物の振動計測における作業効率の大幅な向上を期待することができる。また、計測可能な周波数帯域が人間の可聴領域(20~20000[Hz])より広く分解能が高いことも特徴であり、ハンマリング等による高振動数の振動をも高精度に計測することが可能である。

(2) 非接触スキャンニング振動計測システムの開発

レーザードップラ速度計を用いた非接触スキャンニング振動計測システムは、センサー前方に設置した2つの反射鏡をそれぞれ水平方向と鉛直方向に回転させることで、多点計測を実現するものである^{12),13)}。システムの装置と配線は図-1に示す。入力信号はセンサーで計測された速度応答であり、これを振動計においてアナログ電気信号に変換した後、ADボードを介してデジタル電気信号としてパーソナルコンピュータに収録することとした。一方、出力信号は反射鏡の回転角を制御するために、パーソナルコンピュータからDAボード、スキャンニング用振動計を介してセンサーヘッドに送信される。この作業を指定した計測点数だけ繰り返し行うことでスキャンニング振動計測を行う。

レーザードップラ速度計を用いてコンクリートを対象とした振動計測を実施すると、レーザー戻り光量不足に起因する光学ノイズが発生することがある⁹⁾。このような振動計測結果をもとに振動特性の同定を行うと同定精度を低下させることになる。そこで、レーザー戻り光量が不足する不良計測点に対しては次の対策

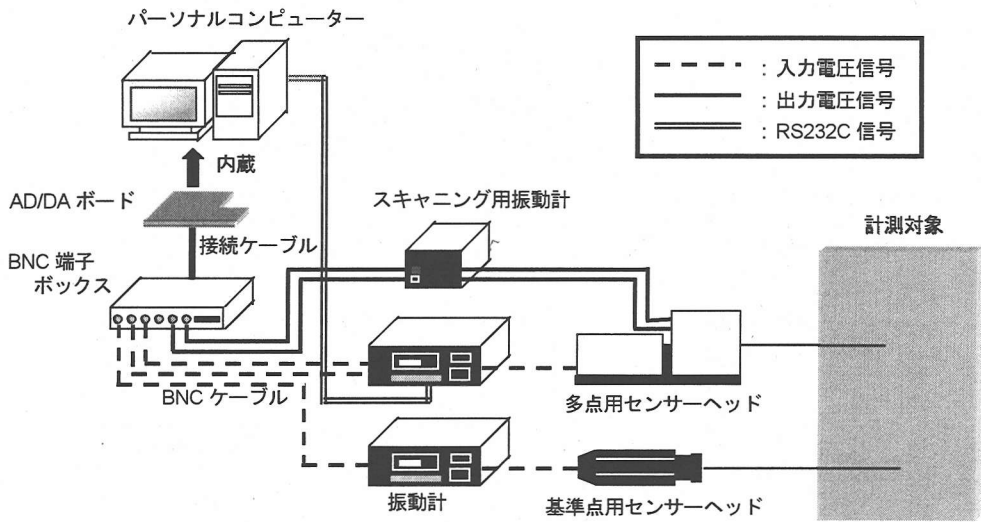


図-1 レーザードップラ速度計を用いた非接触スキャンニング振動計測システム

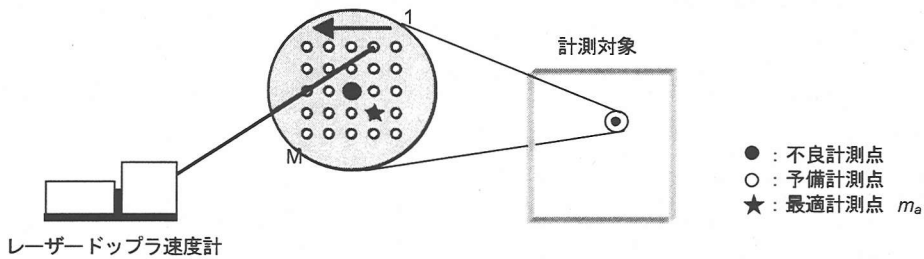


図-2 レーザー戻り光量最大点の自動探索

を講ずることとした。具体的には、光学ノイズが発生する不良計測点周りの微小範囲内の数点（これを予備計測点と呼ぶ）について、それぞれレーザー戻り光量の時系列を計測する^{9),14)}。その概念を図-2に示す。レーザー戻り光量は振動計内部で電圧値に変換し、その電圧値を図-1のように入力2chからADコンバータを通してパーソナルコンピュータに時系列として保存する。予備計測点ごとに計測されるレーザー戻り光量の時系列からその平均値を算定する。例えば、 i 番目の予備計測点におけるレーザー戻り光量の時系列 $x(k)$ の平均値 \bar{x}_i は次式で与えられる。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i(k) \quad (i=1,2, \dots, M) \quad (1)$$

式中、 N は総データ数、 M は総予備計測点数を表す。つぎに、全計測点の中から最大平均値 \bar{x}_a を与える点を最適計測点 m_a として選定し、新たな計測点と設定する。

$$\bar{x}_a = \max(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_M) \quad (1 \leq a \leq M) \quad (2)$$

これより、実構造物に対しても反射テープ等の表面処理をすることなしに、レーザードップラ速度計による非接触計測が可能となる。

(3) 振動特性の同定手法

レーザードップラ速度計を用いた振動計測結果に基づく振動特性の同定手法について述べる。

実構造物の振動計測を想定すると、加振機が不要な常時微動計測が経済性の面から望ましい。しかし、常時微動入力是非定常な成分を含むために、計測点ごとに加振力がばらつくことになる。したがって、多点を同時に計測することができないレーザードップラ速度計1基のみでは振動モード形を精度よく同定することは困難である。そこで、レーザードップラ速度計をさらに1基追加して基準点を設ける。この基準点を用いて各計測点での応答を規準化することで振動モード形

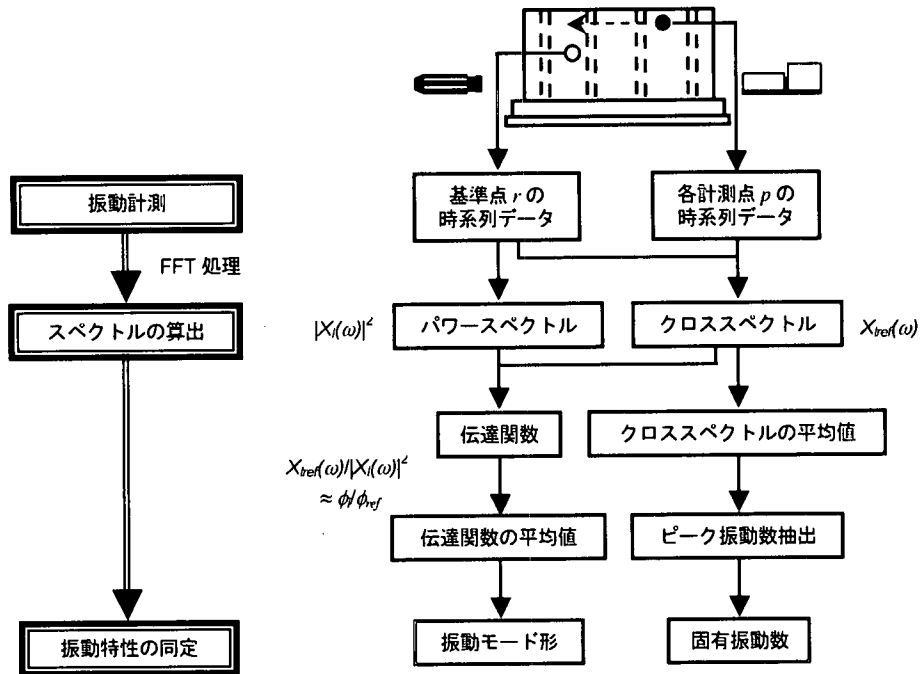


図-3 振動特性の同定手順

を同定する。具体的には、減衰比が小さく、隣り合う固有共振数が近接していない構造系では、

$$\frac{H_\ell(\omega)}{H_{ref}(\omega)} = \frac{U_\ell(\omega)}{U_{ref}(\omega)} \approx \frac{\phi_{i\ell}}{\phi_{i,ref}} \quad (3)$$

が成り立つことを利用している⁸⁾。式中、 $H(\omega)$ および $U(\omega)$ は伝達関数と速度 $u(t)$ のフーリエ変換で、添え字の ℓ と ref は任意の計測点と基準点を表す。また、 $\phi_{i\ell}$ は ℓ 点における i 次の振動モード形である。これより、任意点における応答スペクトルと基準点における応答スペクトルの比が振動モード形を与えることになる。

その際、伝達関数の算出には、振動計測結果に含まれるノイズの影響を低減するために、クロススペクトルを用いることとした。基準点 ref に対する任意点 ℓ でのクロススペクトル $X_{\ell ref}(\omega)$ を算出すると、

$$X_{\ell ref}(\omega) = U_\ell(\omega)\hat{U}_{ref}(\omega) \quad (4)$$

となる。式中、 \hat{U} は U の複素共役を表す。クロススペクトルは、 $U_{ref}(\omega)$ 、 $U_\ell(\omega)$ の両応答スペクトルがピークをとる共振数成分において卓越する。すなわち、クロススペクトルの基準点を同定する次数の振動モード形の節でない点に選べば、計測点間で相関の高い固有共振数成分が卓越し、相関のないノイズ成分は低減することになる。したがって、固有共振数に関しては、

クロススペクトルのピーク値を与える共振数を読み取ることで同定を行う。

振動モード形に関しては、まず式(3)に $\hat{U}_{ref}(\omega)$ を乗じて次式を得る。

$$\frac{U_\ell(\omega)\hat{U}_{ref}(\omega)}{U_{ref}(\omega)\hat{U}_{ref}(\omega)} = \frac{X_{\ell ref}(\omega)}{|X_{ref}(\omega)|^2} = \frac{\phi_{i\ell}}{\phi_{i,ref}} \quad (5)$$

これより、最終的に伝達関数は任意点と基準点のクロススペクトルを基準点のパワースペクトル密度で除算することで得られる。

つぎに、同定した固有共振数に対応する伝達関数の振幅と位相をもとに振動モード形の同定を行う。なお、位相に関しては、 $-\pi/2 \sim \pi/2$ は同位相、 $\pi \sim -\pi/2$ 、 $\pi/2 \sim \pi$ は逆位相であると考えた。最後に、モード振幅の絶対値の最大値が1となるように正規化を行う。

また、レーザー戻り光束不足に起因する光学ノイズについても次のような処理を施すこととした。各計測点の振動計測を繰り返し、それぞれからクロススペクトル、パワースペクトル密度を算出する。これらを次式のように重ね合わせることで平均値を求め、光学ノイズ成分を相殺した。

$$\bar{X}_{\ell ref}(\omega_j) = \frac{1}{N_A} \sum_{k=1}^{N_A} X_{k\ell ref}(\omega_j) \quad (6)$$

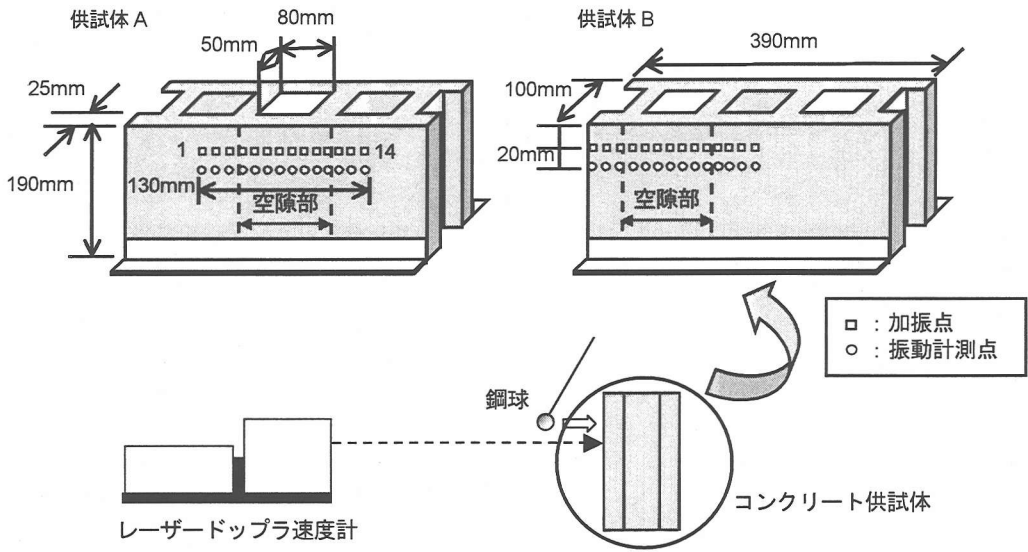


図-4 コンクリート供試体と鋼球打撃加振および振動計測の概要

$$|\bar{X}_{ref}(\omega_j)|^2 = \frac{1}{N_A} \sum_{k=1}^{N_A} |X_{kref}(\omega_j)|^2 \quad (7)$$

式中の $\bar{X}_{ref}(\omega)$ 、 $|X_{kref}(\omega)|^2$ はクロススペクトル、パワースペクトル密度の平均値、 N_A は繰り返し計測回数である。なお、 N_A に関しては、統計的手法による値の決め方を参考文献8)において提案しているので併せて参照されたい。これらを式(5)に代入することで、光学ノイズの影響を除去した伝達関数が得られる。この振動特性の同定手順を図-3に示す。

3. 鋼球打撃加振による空隙検出

打音検査における打音の音源がコンクリート表面の振動であることは伊藤の研究¹⁵⁾で明らかにされている。したがって、レーザードップラ速度計による振動計測から得られる結果は、打音検査と等価な結果を定量的に与えるものであるといえる。以下では振動特性の中でも固有振動数と振動モード形に着目し、それらの変化による空隙検出の可能性を実験的に検討する。

(1) 固有振動数に着目した空隙検出手法

供試体は既成の建材用コンクリートブロックを用いた。この供試体に対して、図-4のように両端の空隙部をモルタルで充填したもの(供試体A)と中央部のみ

表-2 コンクリートブロック諸元

ヤング率 : E	20.6 × 10 ⁶ [N/m ²]
密度 : ρ	2.0 × 10 ³ [kg/m ³]
ポアソン比 : μ	0.3

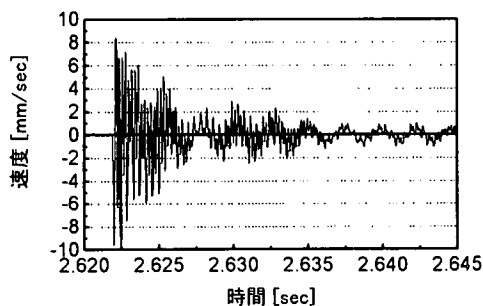
表-3 モルタル配合比

	水	セメント	細骨材
単位量 (kg/cm ³)	313	626	1253

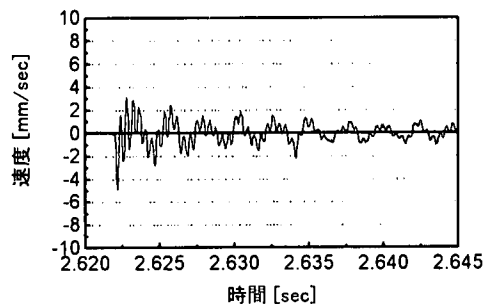
を充填したもの(供試体B)の2種類を作成した。このとき、空隙部以外の部分を健全部と呼ぶこととする。コンクリートブロックの諸元を表-2に、モルタルの配合比を表-3にそれぞれ示す。

本供試体の空隙部は断面形状が均一、また健全部と空隙部が不連続的に変化しているなど、実構造物における空隙とは異なっている。しかし、振動特性の空隙検出への可能性を検証するためには、実験結果と解析結果の比較が不可欠であるので、構造モデルの構築が容易な理想化された空隙部を対象とした。

これらの供試体を図-4に示すように、アングル材を用いて一辺固定支持した。この状態で、供試体に対して鋼球打撃(φ15[mm], 13.7[g])を与え、振動を計測する。打撃点と計測点はそれぞれ14点とした(図-4中表示)。例えば、打撃点4を打撃するときは計測点4で計測する、というように打撃点と計測点の添え字

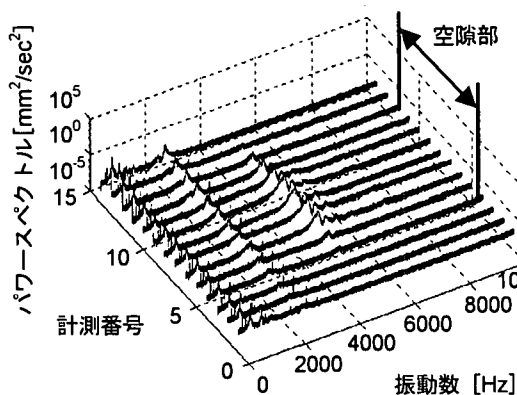


(a) 空隙部

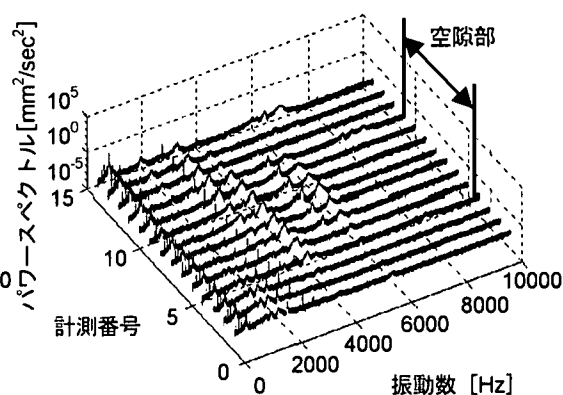


(b) 健全部

図-5 衝撃加振時の振動計測結果



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B

図-6 全計測点のパワースペクトル密度の平均値

は対応させている。

レーザードップラ速度計は供試体から約 2.5[m]離れた位置に設置した。振動計測条件は、サンプリング周波数を 20[kHz]、振動計測時間を 3.3[sec]とした。これは、数回の振動計測から得られたパワースペクトル密度特性のから、①供試体の主なピークが 10[kHz]までに存在すること、②モードが近接する固有振動数が存在しないことを確認したために、それほど高い周波数分解能を必要としないと判断したことによる。

図-5 は、供試体 A に対する振動計測結果の一例である。速度振幅が 10[mm/sec]と微小であるにもかかわらず、打撃加振による衝撃振動を精度良く捉えていることがわかる。また、空隙部と健全部を比較すると、空隙部では、振幅が大きくなるだけでなく、健全部にはない高振動数成分の局所的な振動が卓越していることも確認できる。

これらの速度応答の振動特性を把握するために、パワースペクトル密度を算出した。振動計測結果に含まれる光学ノイズ成分を相殺するために、同一点での計測を 10 回繰り返し、それぞれのパワースペクトル密度の平均値を式(6)(7)により算出した。この平均処理は全計測点について行った。図-6 は、計測点ごとに算出したパワースペクトル密度の平均値を示したものである。供試体 A、B いずれにおいても空隙部と健全部では振動特性が異なり、空隙部に固有の振動数が存在することがわかる。また、供試体 B は供試体 A よりも数多くのピーク振動数が存在する。これは、供試体 B の方が供試体 A よりも空隙部が 1 箇所多く存在するので、より複雑な振動特性を示したためである考えられる。

さらに、空隙部における固有振動成分を定量的に判断するために、パワースペクトル密度のエネルギー比を指標として用いた^{16),17)}。空隙部は、健全部よりも質

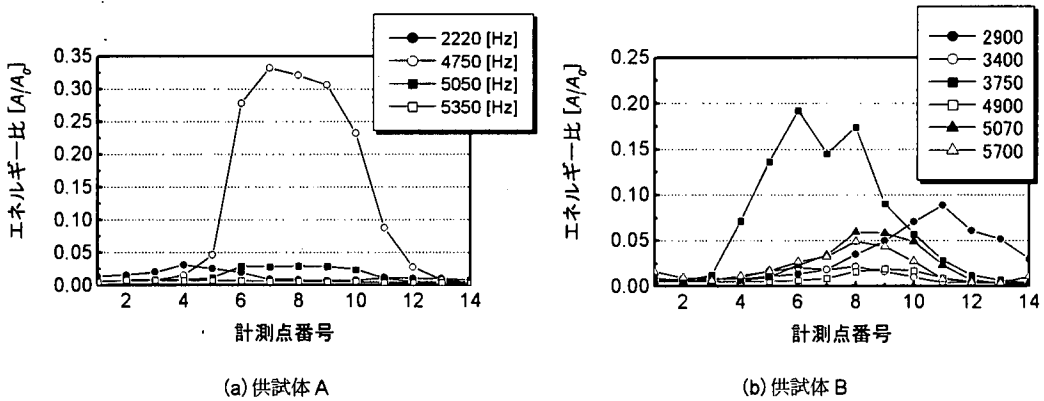


図-7 パワースペクトル密度のエネルギー比

量が小さく、ある振動数においては健全部よりも振幅が大きくなる。すなわち、各固有振動数に対応する振動エネルギー A_i と系全体の振動エネルギー A_0 をとった場合、空洞部でその値が大きくなる振動数が得られれば、それを空隙部固有の振動数であると判断することができる。また、エネルギー比は、計測点ごとに標準化された指標となるので、パワースペクトル密度のように加振状態の影響を受けることはない。

エネルギー比は A_i (i 次の固有振動数 ± 50 [Hz]の範囲のパワースペクトル密度の面積)と A_0 (全振動数領域の面積)の比と定義する。ただし、今回の解析では、 A_i を算出するに際して各次の固有振動数に ± 50 [Hz]の幅を与えたが、これは便宜的に決めたものである。 A_i と A_0 はそれぞれ次式で表す。

$$A_i = \int_{f_i-50\text{Hz}}^{f_i+50\text{Hz}} (PSD)df \quad (8)$$

$$A_0 = \int_{0\text{kHz}}^{10\text{kHz}} (PSD)df \quad (9)$$

式中、 PSD はパワースペクトル密度、 f_i は i 番目の固有振動数をそれぞれ表す。

図-7には、図-6で読み取ることができたそれぞれの供試体の固有振動数に対する各計測点のエネルギー比を示す。供試体Aでは計4つの固有振動数を確認することができ、そのうち4750[Hz]が空隙部で突出した値を示している。したがって、この振動数が空隙部固有の振動数であると判断することができる。一方、供試体Bでは計6つの固有振動数を確認することができ、そのうち3750[Hz]が空隙部固有の振動数であることがわかる。これより、パワースペクトル密度のエネルギー比を用いることで固有振動数から空隙部を検出することが可能となることが明らかとなった。

ただし、供試体Bの計測点1, 2についてはこれらも

空隙部と考えることができるので、これらの部分でエネルギー比が突出する固有振動数が存在しても良いはずである。しかし、図-7には計測点1, 2においてエネルギー比の突出した値を確認することはできない。さらに、両供試体の計測点9~14は健全部であるが、供試体Bで2900[Hz]が固有振動数であると確認できているにもかかわらず、供試体Aでは検出されていない。これらのことから、本手法では部材の拘束条件や空隙部の存在箇所、あるいは打撃箇所や強さによっては空隙部の検出が不可能となることもあるといえる。

さらに、実構造物への適用を考えると、①空隙部と健全部が本供試体ほど明確でない上に、②構造物の固有振動数以外のピーク振動数も多く存在するために固有振動数の同定が困難であることが予想される。したがって、エネルギー比が空隙を検出するための定量的な指標として有効であるものの、上述の理由により実構造物の適用においては問題がある。そこで、全てのピーク振動数に対して振動モード形を同定し、その形状の規則性から構造物の振動特性であるか否かを判断すると同時に、空隙部を視覚的に判断することができる手法を次節で提案する。

(2) 振動モード形に着目した空隙検出手法

前節では、2つの供試体に対して多点の振動計測を行い、そのパワースペクトル密度のエネルギー比をもとに空隙部固有の振動数が存在することを明らかにした。それらの固有振動数に対応する振動モード形は空隙部のみの振幅が卓越するようなモード形状を示すものと考えられる。そのような振動モード形を同定することができれば、視覚的に空隙位置を検出することが可能となる。

供試体A, Bに対して、振動モード形を同定すること

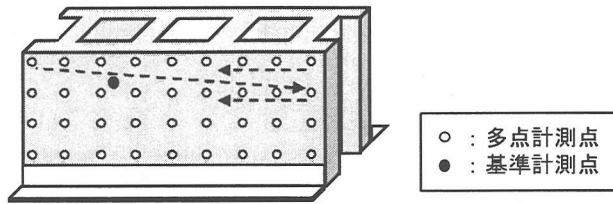
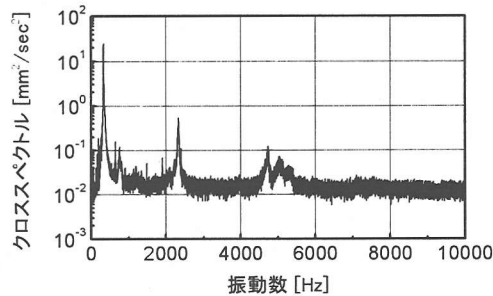
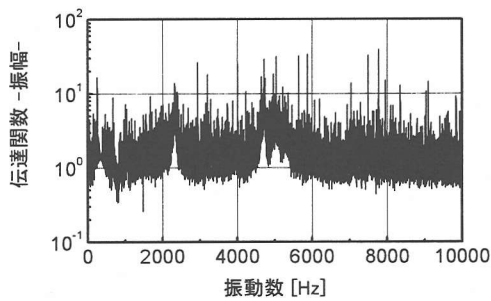


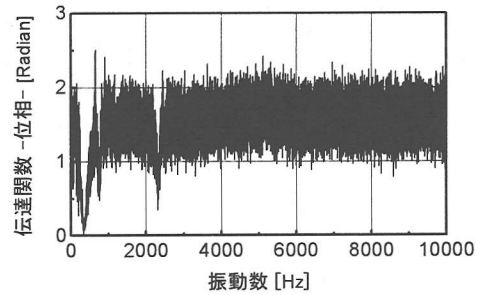
図-8 レーザードップラ速度計による計測点



(a) クロススペクトルの平均値



(b) 伝達関数—振幅の平均値



(c) 伝達関数—位相の平均値

図-9 振動計測結果の一例

を目的として、新たに基準点計測用のレーザードップラ速度計を追加した。そして、2.(3)節の同定手順に従って、振動モード形の同定を行った。

具体的な計測条件に関して、総計測点数は図-8 に示す 36 点(水平方向 9 点、鉛直方向 4 点)とした。計測点に関しては、多いほど振動モード形の同定精度は高くなるが、その分計測に多大な労力と時間を費やすことになってしまう。そこで、空隙部で少なくとも 2 点の計測点が得られるように決定した。また、基準計測点は●の位置に取った。サンプリング周波数および計測時間は前節と同設定とした。また、打撃加振は、実際

の検査への適用を念頭に入れ、場所・回数・強さをランダムに与えた。

供試体 A に対する振動計測結果から得られたクロススペクトルおよび伝達関数の平均値を図-9 に示す。平均値の算出には 20 回の繰り返し計測を要した。

前節のエネルギー比を用いて同定された空隙部の固有振動数に対応する振動モード形を供試体 A, B ともに図-10 に示す。同図は、最大モード振幅が 1 となるように正規化された振動モード形の絶対値を取ったものである。モード振幅は、青が 0、赤が 1 を示している。これらより、モード振幅が大きい部分と空隙部の

位置が概ね一致していることがわかる。したがって、振動モード形を把握することで視覚的に空隙位置を把握することができるといえる。一方で、図-10 から明らかなように、固定端近傍のように振動振幅が極めて小さい箇所での空隙に対する検出精度は落ちているが、これは振動モード形を利用した本手法の限界である。

なお、図-10 以外の振動モード形は、コンクリートブロックの全体の振動成分であった。一例として供試体 A の 340 [Hz] における振動モード形を図-11 に示すが、一边固定支持平板の 1 次たわみモードであることが確認できる。振動モード形を用いることの利点は、その形状から規則性を見出すことで実構造物のようにピーク振動数が数多く存在する場合でも構造物の振動特性かどうかの判断を明確に与える点にある。

さらに、同定された振動モード形の妥当性を検証するために、供試体 A についてレーリー・リッツ法¹⁸⁾による固有振動数と振動モード形の理論解析を行った。解析モデルは、図-12 に示すように空隙部のみ(図中斜線部)を取り出し、一边自由他辺単純支持平板としてモデル化した¹⁹⁾。用いたモード形状の近似関数は、50 次モードまでを考慮して、以下のように与えた。

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^{50} c_i w_i(x, y) \quad (10)$$

ただし、 w_i は、図-12 中の x 方向の振動モード形状を w_i^x 、 y 方向の振動モード形状を w_i^y とすると、

$$\begin{aligned} w_1(x, y) &= w_1^x(x) \times w_1^y(y) \\ w_2(x, y) &= w_1^x(x) \times w_2^y(y) \\ w_3(x, y) &= w_2^x(x) \times w_1^y(y) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる。供試体の支持条件から水平方向は式(12)の両端単純支持梁、鉛直方向は式(13)の片持ち支持梁のモード形状を与えた²⁰⁾。

$$w_i^x(x) = \sin \lambda_i \frac{x}{L} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} w_i^y(y) &= \sin \lambda_i \frac{x}{L} - \sinh \lambda_i \frac{x}{L} \\ &+ \frac{\cos \lambda_i + \cosh \lambda_i}{\sin \lambda_i - \sinh \lambda_i} \left(\cos \lambda_i \frac{x}{L} - \cosh \lambda_i \frac{x}{L} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

式中の λ_i は固有値、 L は梁の長さを表す。

解析結果を図-13 に示す。モード振幅は、先と同様に最大値が 1 となるように正規化し、その絶対値を表示している。図-10(a)と比較すると、振動モード形は概ね一致しているが、固有振動数に関しては大きな差がある。しかし、供試体は実際には、左右両端が振動していること、また下端は厳密には単純支持よりも緩くなっていることを考慮すると解析モデルよりも境界条件が緩くなり、固有振動数は低下すると考えられる。

実際に、このことは、図-10(a)において左右両端および固定端の近傍のモード振幅がともに 0.4 程度あることから裏付けられる。したがって、固有振動数についても実験結果は妥当であると判断できる。

以上より、振動モード形を利用することで拘束条件によって検出の難しい箇所が存在することがあるものの、空隙を視覚的に検出できることがわかった。実構造物への適用に関しては、著者らは実橋の RC 床版においてレーザードップラ速度計による走行荷重および常時微動の振動計測結果からその振動モード形を同定した実績があり^{9), 10)}、計測点を密に取ることで対応できる。

また、現時点では空隙部の有無やその 2 次元的な大きさを視覚的に判断することが可能であるが、その損傷度を定量的に評価することや空隙部が表面からどれくらい深いかに存在するのかわかることはできない。次段階としてはこれらの点についても検討していく必要がある。損傷度については振動モード形の変化から構造物の剛性低下量を算出する手法を著者らは提案しており⁸⁾、これが損傷度を測る一つの指標となり得ると考えている。

4. 音圧加振を用いた非接触加振による空隙検出

レーザードップラ速度計を用いることで、非接触振動計測による空隙検出が可能であることを示した。しかし、検査対象によっては、鋼球打撃、もしくはハンマリングにより入力を与える作業が高所作業を伴うことになり、振動計測における非接触の利点を半減してしまう。

そこで、前節の鋼球による衝撃加振入力力の代替として、スピーカーを用いた音圧加振^{17), 21)}の適用性を検討する。音圧加振を用いると、加振を非接触で行うことが可能でありレーザー計測の利点を損なうことはない。一方で、打撃加振と比較すると、供試体に作用する加振力は低下することが予想される。この点に関しては、繰り返し計測回数を増やすことで対処できるが、当然ながら計測時間は長くなる。

用いたスピーカーの特性を表-4 に示す。このとき、音源には音楽用 CD を用いることとした。その理由は、空隙部の固有振動成分を探索するために広範囲の周波数領域に渡って一様な加振力を必要とするためである。振動計測の概要を図-14 に示す。スピーカーを 2 台使用したのは音圧が供試体に不均一に入力されるのを防ぐためであり、レーザー設置側と同じ側に設置したのはコンクリートの表面振動を励起するためである。

3.(2)節と同様に 2 台のレーザードップラ速度計を用

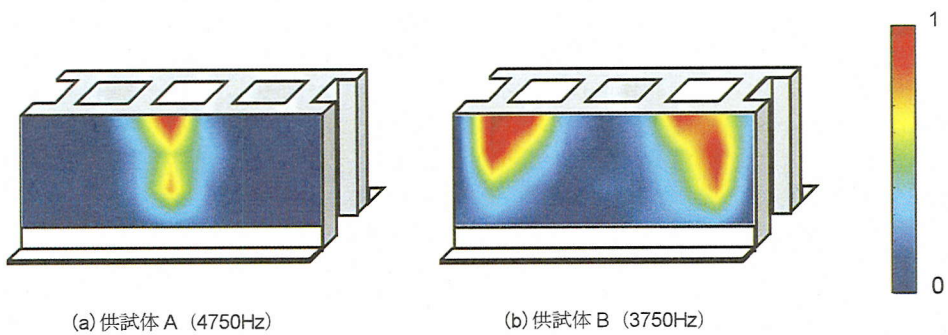


図-10 同定された振動モード形

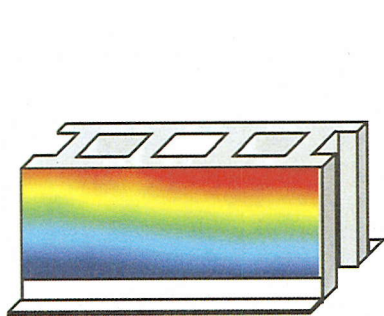


図-11 振動モード形
(供試体 A 全体 1 次モード : 340Hz)

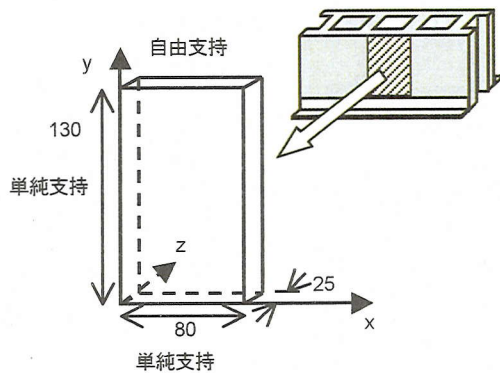


図-12 平板解析モデル

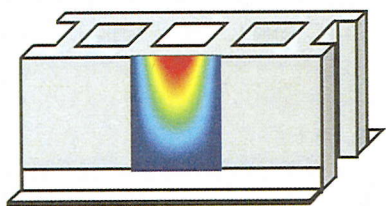


図-13 解析結果 (6081Hz)

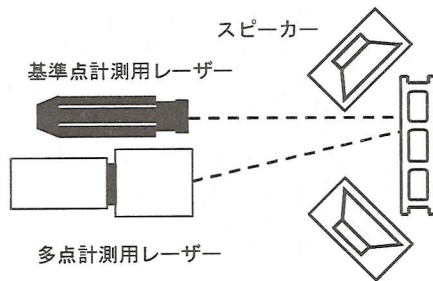


図-14 音圧加振実験概要



図-15 同定された振動モード形 (4700Hz)

表-4 スピーカー特性

口径	20[cm]
最低共振周波数	80[Hz]
再生周波数帯域	80~12000[Hz]
出力音圧レベル	97[dB/W]
入力	100[W] (Max)

いて振動モード形の同定を行った。計測点数は 28 点 (水平方向 7 点, 鉛直方向 4 点) とし, サンプル周波数と計測時間は先と同設定とした。ただし, 速度振幅が鋼球打撃加振時よりも小さくなり, ノイズの影響が相対的に大きくなったために, 平均処理には 200 回の繰返し計測が必要であった。図-15 は, 4700[Hz]における振動モード形である。これより, モード振幅の卓越した部分と空隙部が一致していることがわかる。また, 音圧を用いた場合でも, 打撃加振と同程度の計測精度が得られている。ただし, 健全部の振動モード形が打撃加振時よりも大きくなっているが, これは音圧が供試体に一樣に作用せず, 音源の設置条件により左右両端に集中したためであると考えられる。

実構造物への適用を考えると, 特別な音源を用いずに走行車両の騒音や常時微動を用いることが考えられる。今回用いた供試体は低エネルギーで比較的振動しやすいものであったが, これらが実構造物をどの程度振動させ得るのが重要である。著者らが RC 床版に対して実施した振動計測⁹⁾では振動振幅の大きな走行荷重を入力として用いると低次の振動モードのみが卓越する傾向にあり, むしろ振幅の小さな常時微動の方が高次まで同定するためには有効であった。しかし, ホワイトノイズを用いた場合であっても平均処理に 200 回の繰返し計測を要したことから, さらに繰返し回数が増える。そのために計測時間が膨大になることは避け難く, より高度な信号処理技術を導入することで計測時間の短縮を図り, 実用面での効率化を考慮しなければならない。

5. まとめ

本研究では, 損傷の定量的指標として振動特性に着目したコンクリート構造物の空隙検出手法を提案した。振動計測においては, 検査作業の効率化を図るために, レーザードップラ速度計を用いた非接触な振動計測手法を構築することで実用性に対しても配慮した。得られた主な知見を以下に示す。

1. 空隙部と健全部の固有振動数が異なることに着目し, 計測点ごとのパワースペクトル密度のエネルギー比を算出することで, 空隙を定量的に検出することが可能となった。しかし, 実構造物の適用においては, 構造物の固有振動数成分のみを抽出することは困難である。したがって, エネルギー比が空隙検出に有効な指標ではあるが, 固有振動数単独での使用は実用性に欠ける。
2. パワースペクトル密度から読み取られた固有振動数に対応する振動モード形を同定することで, 空隙の位置を視覚的に捉えることができる。また, 振動モード形という空間的情報を用いることで構造物の振動特性であるか否かの判断を下すことが可能であり, 振動モード形とエネルギー比を併用することでより検出精度が上がると期待できる。一方で, 拘束条件によっては空隙の検出精度が落ちる場合があることも明らかとなった。
3. 提案した空隙検出手法の実用性を向上させるために, 入力に対しても音圧を用いた非接触加振を試みた。その場合でも, 鋼球打撃加振時と同程度の振動モード形を同定することに成功した。ただし, 打撃加振と比較すると, 加振力が小さいために計測に多くの時間を要した。実構造物では, 入力源としてさらに加振力が小さい走行車両の騒音や常時微動の使用が不可欠となると考えられることから, 微小振幅から有意な情報を抽出することが可能な信号処理手法の開発が必要である。

以上に上げた課題を克服しつつ, 今後はコンクリートの剥離やひびわれ等のその他の損傷検出に取り組み, 最終的には実構造物の検査への応用を進めていきたい。

謝辞: 本研究は, 一部, 文部省科学研究費 (平成 12 年度~平成 13 年度科学研究費補助金) および(財)東電記念科学技術研究所の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。レーザー振動計測に際して, 東京大学影山和郎教授には, 貴重な御助言を賜った。

参考文献

- 1) 森本峯夫他: 「特集: 土木構造物の点検・診断技術」, 土木技術, 54 巻, 10 号, 1999.10.
- 2) 土木学会: 「コンクリート構造物の維持管理指針 (案)」, コンクリートライブラリー, 第 81 号, 1995.10.
- 3) 魚本健人: 「非破壊検査」ではかる, コンクリート構造物への応用, 土木学会誌, Vol.85, pp.81-84, 2000.1.
- 4) 大津政康: コンクリート工学におけるアコースティッ

- ク・エミッション (AE) 研究の歴史と現状, 土木学会論文集, No.496/V-24, pp.9-19, 1994.8.
- 5) 大岸佐吉, 小野博宣, 大岡俊彦: 赤外線映像, 衝撃振動応答, 打音の 3 方法による鉄筋コンクリート内部欠陥および仕上げモルタル, タイル剥離の探査性能に関する研究, コンクリート工学, Vol.27, No.8, pp.103-114, 1989.
 - 6) 金原勲, 影山和郎, 鈴木敏夫, 大沢勇, 伊出浩司: レーザー振動画像法と有限要素法によるはく離を有する積層板の振動モード解析, 材料, Vol.43, No.487, pp.476-481, 1994.4.
 - 7) Stanbridge, A.B. and Ewins, D.J.: Measurement of Translational and Angular Vibration using a Scanning Laser Doppler Vibrometer, *Shock and Vibration*, Vol.3, No.2, pp.141-152, 1996.
 - 8) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用, 土木学会論文集 (投稿中) .
 - 9) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三: 実構造物の非接触スキャニング振動計測システムの開発, 土木学会論文集 (投稿中) .
 - 10) Kaito, K., Abe, M. and Fujino, Y.: Identification of Vibration Mode Shapes for a Bridge Deck under Ambient Vibration, *Proceedings of 6th International Workshop on Material Properties and Design, Proceedings of The Present and Future in Health Monitoring*, pp.347-358, Bauhaus-University, Weimar, Germany, 2000.9.
 - 11) 日本機械学会: 光応用機械計測技術, 朝倉書店, pp.124-147, 1985.
 - 12) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザードップラ速度計を用いた振動モード形の計測と損傷検出への応用, 第 2 回構造物の診断に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.157-162, 1999.8.
 - 13) Kaito, K., Abe, M., Fujino, Y. and Yoda, H.: Detection of Structural Damage by Ambient Vibration Measurement using Laser Doppler Vibrometer, *Proceedings of The 5th International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000*, Tokyo, pp.135-143, 2000.4.
 - 14) 貝戸清之: 不確定性を考慮したレーザー振動計測に基づく構造物の性能評価, 東京大学博士論文, 2000.3.
 - 15) 伊東良浩: 打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究, 東京大学博士論文, 1997.
 - 16) 熊坂和宏, 阿部雅人, 藤野陽三, 貝戸清之: レーザードップラ速度計を用いた振動計測による損傷検出, 第 55 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, CS-68, 2000.9.
 - 17) Abe, M., Fujino, Y. and Kaito, K.: Damage Detection of Civil Concrete Structures by Laser Doppler Vibrometry, *Proceedings of The 19th International Modal Analysis Conference*, pp.704-709, Kissimmee, Florida, 2001.2.
 - 18) 大崎順彦: 建築振動理論, 彰国社, 1996.11.
 - 19) Leissa, A.W.: Vibration of Plates, *NASA Special Publication SP-160*, 1969.
 - 20) 山口宏樹: 構造振動・制御, 共立出版, 1996.5.
 - 21) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 熊坂和宏: レーザードップラ速度計を用いたコンクリート構造物の空隙検出, 第 4 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集, 機械学会, pp.491-496, 2000.11.

(2001.1.18 受付)

DETECTION OF INTERNAL VOIDS IN CONCRETE STRUCTURES USING LOCAL VIBRATIONAL INFORMATION

Kiyoyuki KAITO, Masato ABE, Yozo FUJINO and Kazuhiro KUMASAKA

In order to rationalize the hammering test and to eliminate the dangerous works for inspecting in concrete structures, an application of remote measurement by the laser doppler vibrometer (LDV) is investigated. The relationship between impact echo and surface vibration of structures measured by LDV is clarified. For a concrete specimen with a void, energy ratio of the power spectrum density is employed to extract local frequencies at void parts, and their location is identified from mode shapes at the frequencies. The identification method is based on the frequency domain analysis of measured surface vibrations. Furthermore, a non-contact input excitation method using sound pressure is also proposed. These results indicate that the LDV has potential applicability to defect identification of concrete structures.