

衝撃波を用いたコンクリート構造物の非接触非破壊検査法の開発と その自動化に関する研究*

森 和也*¹, Andrea SPAGNOLI*², 近藤 悟郎*³
村上 敬宜*⁴, 鳥越 一平*¹

Development Non-Contact, Non-Destructive Evaluation for Concrete Structures by Using Shock Wave and Study of Its Automation

Kazuya MORI*⁵, Andrea SPAGNOLI, Gorou KONDO,
Yukitaka MURAKAMI and Ippei TORIGOE

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

We developed a basic technology of non-contact, non-destructive inspection method of a concrete structure. It is a current inspection approach that an operator beats surface of a wall with a hammer and hears the sound with his ears, and judges the presence of the defect. The purposes of this study are the improvement of reliability and the curtailment of expenses by the automation of evaluation. The proposed method of this study is that the impact by hammer is replaced with shock wave and the safety check by operator's ears is replaced with the laser measurement. We did a simulation using a finite element method and succeeded detection of a defect of 25 mm diameter and in 200 mm depth. The method of this study is a technology to enable that we inspect concrete structures by non-contact, non-destructive test automatically.

Key Words: Non-Destructive Inspection, Finite Element Method, Stress Wave, Shock Wave

1. 緒 言

コンクリート構造物の耐用年数は約 200 年以上であると考えられていた。そこで、鉄道トンネルの安全性は 2 年に 1 度の全般検査で確保できるとされてきた。しかしながら、近年のコンクリート片の落下事故からこの考え方を改めなければならなくなっている⁽¹⁾。

1999 年 6 月 27 日、福岡トンネル内で約 300 kg のコンクリート片が「ひかり 351 号」を直撃する事故が発生した。そのため、JR 西日本は事故後、山陽新幹線の全 142 箇所ものトンネルの検査を行い、『今後 10 年間、落下の恐れはない』と安全宣言を出した。しかし、それから 2 箇月もたたない 10 月 9 日、北九州トンネルにおいて再び約 226 kg のコンクリート片の落下事故が発生した⁽²⁾。

コンクリートトンネルにおける健全性の検査は、専

用ハンマでコンクリート壁面を打撃し、反響音を作業者が聞いて安全性を評価するという打音検査によって行われるのが一般的である。しかし、先の例にも示したように、この方法ではコンクリート中の欠陥を、高速に、しかも確実に同定することは不可能である。

本研究では、ハンマによる打撃をガスガンによる衝撃波に、作業者の耳による判断をレーザによる計測に置換え、コンクリート構造物の点検作業の確実性を高めるとともにその高速化を目的としている。

2. 理 論

2・1 提案する検査の方法 コンクリート構造物の壁面に衝撃を負荷すると、壁面は振動し、内部に弾性波を生じる。図 1 に、壁面に現れる二つの振動のパターンを示す。図 1(a) に示すものは弾性波の伝ばによる振動である。表面に衝撃を負荷すると、弾性波がコンクリート内部を伝ばし、欠陥があると一部が反射し、再度壁面を振動させる。欠陥の壁面からの深さは、衝撃波により伝ばした応力波が、欠陥で反射し再び壁面を振動させるまでの時間間隔に比例する。また、図 1(b) に示す振動のモードは、欠陥と検査面の間のコンクリートにおけるたわみ振動である。

本研究で提案する検査法は、図 2 に示すように、ガ

* 原稿受付 2003 年 5 月 26 日。

*¹ 正員、熊本大学工学部 (☎ 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)。

*² パルマ大学土木研究科。

*³ 九州大学大学院工学府 (☎ 812-0053 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*⁴ 正員、フェロー、九州大学大学院工学府。

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

スガンにより衝撃を検査面に負荷し、検査面の振動をレーザドップラー振動計で計測し、その計測値より欠陥を検知しようというものである。そこで著者らは、有限要素法を用い、さまざまな欠陥形状に対する壁面振動をシミュレートし、データベースを作成した。このデータベースと実際の計測値を照らし合わせることで欠陥を同定しようとする考えである。

2.2 弾性波振動

物体表面の一点に衝撃が加えられると、物体内部を縦波(P波: primary wave)と横波(S波: secondary wave)が伝ばし、表面近くをレイリー波(R波: Rayleigh wave)が伝ばする。P波とS波は球面波で、物体内部を伝ばし、内部欠陥や異なる密度、異なるヤング率の材料同士の境界面、およびその材料自身の境界で反射される。P波の速度を C_p とすると、 C_p はヤング率: E , ポアソン比: ν , 密度: ρ を用いて次式で表せる⁽³⁾。

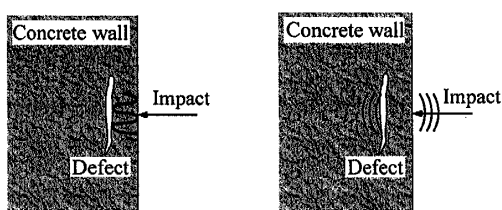
$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \dots\dots\dots (1)$$

伝ばした弾性波が、自由表面において反射した場合、圧縮波は引張波として、引張波は圧縮波として反射する⁽⁴⁾。この場合、P波が表面(自由表面)から伝ばしていき、深さ d の欠陥(自由表面)で反射し、同じモードの波が再び表面を振動させる時間 t_d は次式で表される。

$$t_d = 2d/C_p \dots\dots\dots (2)$$

したがって、この場合に起こる弾性波振動の固有周期 f_d は次式で表される。

$$f_d = 1/t_d = C_p/2d \dots\dots\dots (3)$$



(a) Elastic wave vibration (b) Flexural vibration

Fig. 1 Patterns of vibration on the surface of a concrete

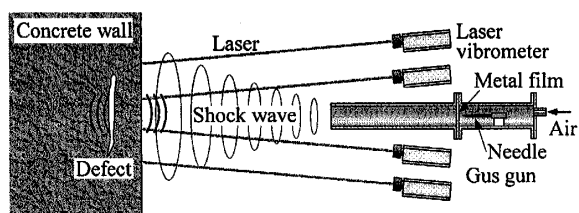


Fig. 2 Proposed method of inspection for concrete structures by using shock wave and laser vibrometer

また、弾性波が拘束された境界において反射した場合、圧縮波は圧縮波として、引張波は引張波として反射することによって、反射時間および周期は次式のようになる⁽⁴⁾。

$$t_d = 4d/C_p \dots\dots\dots (4)$$

$$f_d = 1/t_d = C_p/4d \dots\dots\dots (5)$$

2.3 たわみ振動

図3に示すように円盤状欠陥と表面との間のコンクリートを単純支持された円盤で近似する。この円板に衝撃が加えられた場合、この円板はたわみ振動を行う。その振動の n 次固有振動数 f_n は次式で与えられる⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

$$f_n = \frac{K_n d}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3(1-\nu^2)\rho}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K_n は振動のモードによって決まる定数で、基本振動の場合 $K_n=4.99$ の値を持つ。

コンクリート材料を想定し、ヤング率 $E=20\,600$ MPa, ポアソン比 $\nu=0.15$, 密度 $\rho=2\,350$ kg/m³とした⁽⁷⁾場合のたわみ振動の振動数の例を表1に示す。人の耳の可聴音域は約16~20 kHz以下である⁽⁸⁾。そのため、現在行われている打音検査の作業者が発見可能な欠陥の大きさは表1の網かけの部分のみとなる。

Table 1 Fundamental frequency [kHz] for simply supported boundary conditions ($K_n=4.99$)

d(mm)	2a(mm)			
	25	50	100	200
25	109.8	27.5	6.9	1.7
50	219.7	54.9	13.7	3.4
100	439.4	109.8	27.5	6.9
200	878.8	219.7	54.9	13.7

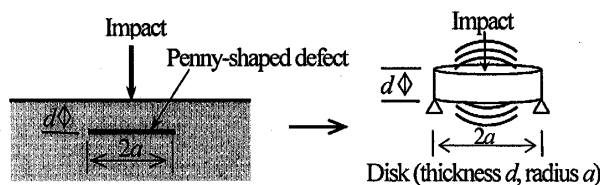


Fig. 3 Flexural vibration of the concrete disk

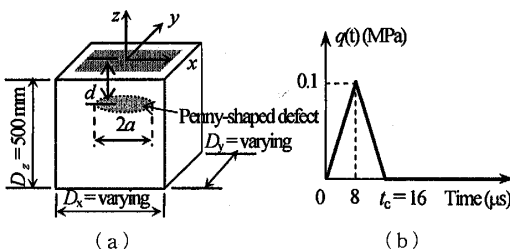


Fig. 4 Shape of a model and impact pressure for FEM analysis

3. 弾性波伝ばのシミュレーション

3・1 解析モデル モデル形状を図4(a)に示す。z軸方向の長さ $D_z=500$ mm の、コンクリート塊を想定し、ヤング率 $E=20\ 600$ MPa、密度 $\rho=2\ 350$ kg/m³、ポアソン比 $\nu=0.15$ として、多様な欠陥形状に対する壁面振動の解析を行った。

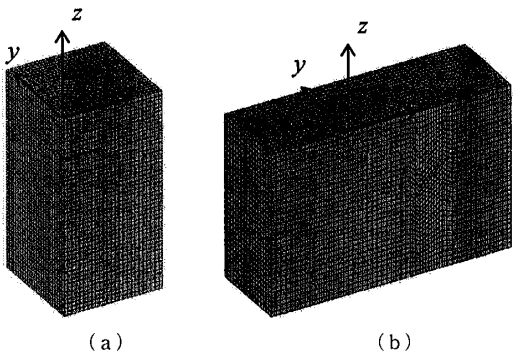


Fig. 5 Examples of finite element model

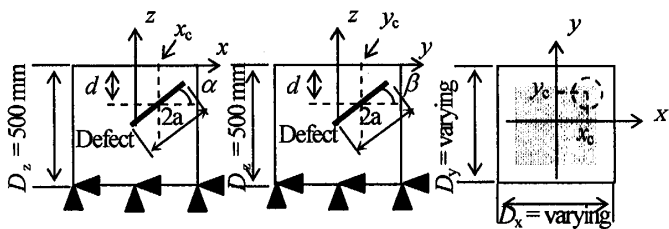


Fig. 6 Parameters of the geometry of a defect

解析に用いた衝撃波の圧力波形を図4(b)に示す。最大加圧力 $q_m=0.1$ MPa、衝撃負荷時間 $t_c=16$ μ s とした。この波形はガスガンによって発生する衝撃波による圧力変動から決定したもので [図14(b)], 含まれる周波数成分は 100 kHz 程度までである。

有限要素分割の例 [(a): 総節点数=33 839, 総要素数=30 527, (b): 総節点数=33 922, 総要素数=30 518] を図5に示す。欠陥は円盤状欠陥とし、図6に示すように、欠陥の形状・位置を決定するパラメータを、欠陥の中心の x, y 座標 (x_c, y_c), 欠陥の直径 $2a$, 欠陥の深さ d , 欠陥が x 軸となす角度 α , 欠陥が y 軸となす角度 β の6個とし、それらを変化させ、解析を行った。表2に変化させたパラメータの値を示す。また、図7に示すように、モデルの x 軸, y 軸方向の長さは、欠陥の位置によって、解析結果にモデルの側面の影響が出ないように変化させた。総解析時間 t_{total}

Table 2 Values of parameters

x_c (mm)	-250	0	250	
y_c (mm)	-250	0	250	
$2a$ (mm)	25	50	100	200
d (mm)	25	50	100	200
α (deg)	-45	0	45	
β (deg)	-45	0	45	

The number of all models = 1080 + 1 (no defect) = 1081

	$\alpha=0, \beta=0$	$\alpha \neq 0, \beta=0$	$\alpha=0, \beta \neq 0$	$\alpha \neq 0, \beta \neq 0$
$x_c=y_c=0$				
$x_c \neq 0, y_c=0$				
$x_c=0, y_c \neq 0$				
$x_c \neq 0, y_c \neq 0$				

(*) x, y symmetry axis, (**) x symmetry axis, (***) y symmetry axis

Fig. 7 Shape of models for each position of defect

$\cong 1024 \mu\text{s}$, 時間増分 $\Delta t \cong 2 \mu\text{s}$ とし, 境界条件は底面を固定端支持とした。パラメータ $(x, y, 2a, d, \alpha, \beta)$ を変化させ 1081 とおりの欠陥形状に対して解析を行った(ただし, 表面開口欠陥は解析対象から除外している)。

Δt ごとに, 表面に垂直方向の変位と速度を 50 mm 間隔で出力し, 欠陥形状と壁面振動を対応させたデータベースを作成した。

3.2 解析結果 欠陥の位置と形状に関するパラメータを変化させ, それぞれの欠陥に対する壁面振動のパターンを明らかにした。結果の例として, 次の三つの場合を示す。

Case 1: 欠陥なし

Case 2: $x=0 \text{ mm}, y=0 \text{ mm}, 2a=100 \text{ mm}, d=25 \text{ mm}, \alpha=0, \beta=0$

Case 3: $x=0 \text{ mm}, y=0 \text{ mm}, 2a=200 \text{ mm}, d=100 \text{ mm}, \alpha=0, \beta=0$

図 8 に, 欠陥の中心上の表面 (x_c, y_c) における(欠陥がない場合は試験片中央)表面に垂直方向の変位の時間的变化を示す。また, この結果を高速フーリエ変換(FFT)⁽⁴⁾により周波数成分に分解した結果を図 9 に示す。横軸は周波数, 縦軸にはパワースペクトル密度⁽⁴⁾をプロットした。ただし, スペクトル振幅から欠

陥の大きさを決定することは困難なために 0-1 に正規化した。

側面や背面での弾性波の反射が結果に含まれるが, 欠陥が存在する場合は, 欠陥からの反射波による振動あるいは欠陥のたわみ振動の強度が支配的であるので, 側面や背面の振動は無視できる。また, 欠陥がない場合は, 負荷が平行波であるので側面からの影響はほとんどない。

欠陥がない場合(Case 1)は, 図 8(a)に示されるように, 式(4)より計算される, $t_D=4D/C_p=4 \times 0.5/3042 \times 10^6 \cong 657 \mu\text{s}$ において, 反射波が表面を振動させていることが確認できる。また, 図 9(a)において, 式(5)に示されるように, コンクリートの検査面と背面との間での弾性波の反射による振動の固有周波数 $f_d=1/t_D=C_p/4D=3042(4 \times 0.5) \times 10^{-3} \cong 1.5 \text{ kHz}$ においてピークが現れていることが確認できる。

浅い欠陥がある場合(Case 1)について考える。図 8(b)に示した検査面中央における, 表面に垂直方向の変位の時間的变化に示されるように, 壁面の振動は, たわみ振動による振動が支配的であるということが確認できる。この結果を, FFT により周波数成分に分解すると, 図 9(b)に示されるように, たわみ振動の周波数 f_f と, 検査面と背面との間における弾性波の

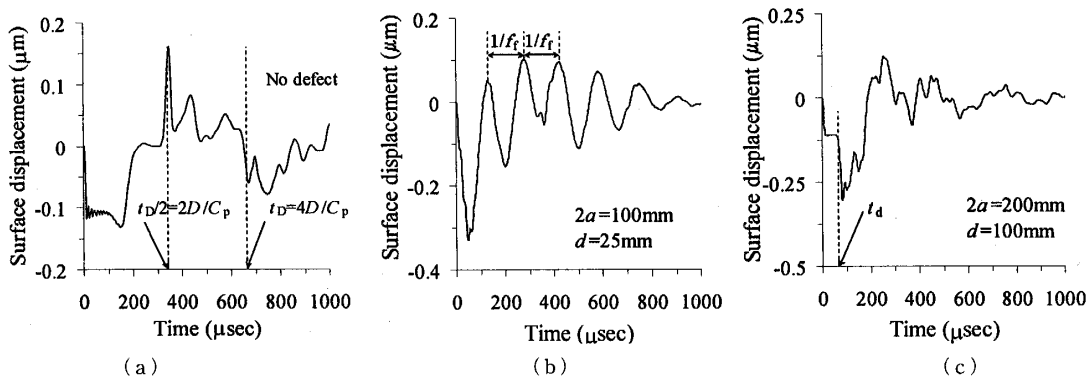


Fig. 8 Time history of surface displacement at central point on the surface

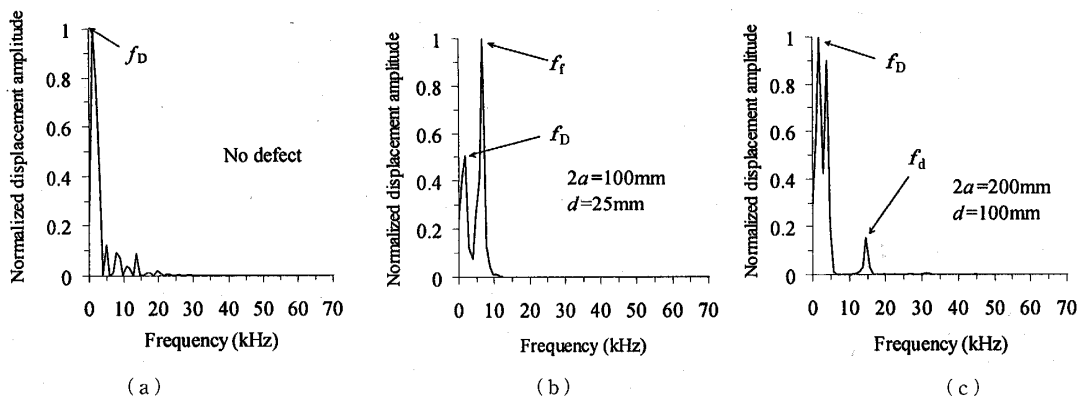


Fig. 9 Normalized displacement amplitude at central point on the surface vs. frequency

反射による振動の周波数 f_D にピークが現れていることが確認できる。

深い欠陥がある場合 (Case 2) について考える。図 8(c) に示した欠陥の中心軸上の表面における、表面に垂直方向の変位の時間的変化に示されるように、表面と欠陥との間における弾性波の反射によって、式 (2) に示される時間 $t_d = 2d/C_p = 2 \times 0.1 / 3.042 \cong 65.7 \mu\text{s}$ において、表面から伝ばした圧縮波が、欠陥で反射して引張波となり、再び表面を振動させていることがわかる。この結果を FFT により周波数成分に分解した結果を図 9(c) に示す。この場合は、弾性波が表面と欠陥との間で反射して起きる振動の周波数 f_d 、表面と背面との間で反射して起きる振動の周波数 f_D にピークが現れていることが確認できる。

たわみ振動による周波数、または弾性波の反射による振動の周波数を計測することができれば欠陥の有無を決定することができる。著者らはまず、弾性波振動を計測することで欠陥の同定を行うことを試みた。弾性波振動を精度良く計測することができれば、式 (2)、または、式 (3) より、欠陥の深さを推定することが可能であるためである。

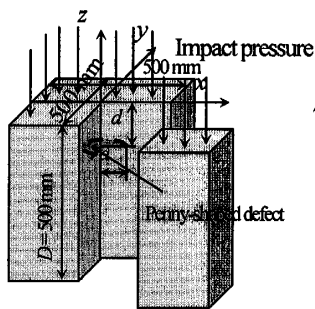


Fig. 10 Shape of specimen

Table 3 Geometry of defects

Diameter $2a$ (mm)	Depth d (mm)
100	25
200	25
200	50
200	100

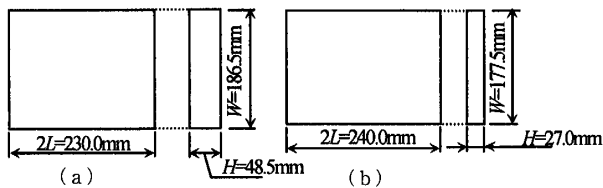


Fig. 11 Shape of specimen for three point bending

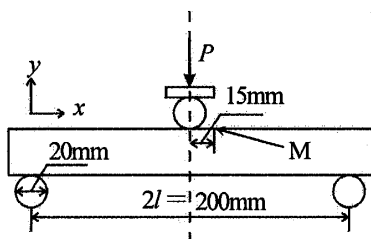


Fig. 12 Three point bending

4. 実験との比較

4.1 試験片 解析結果と実験結果⁽⁹⁾ との比較を行う。図 10 に試験片寸法を示す。試験片は、解析に使用したモデルと同様に、一辺が 500 mm のコンクリート塊であり、内部に厚さ 10 mm のポリスチロール製の円盤を、表面に平行に埋め込んで人工欠陥としている。欠陥の寸法を表 3 に示す。

4.2 ヤング率の測定 実験に用いられたコンクリートの試験片と同じ材料の試験片を用いて、ヤング率の測定を行った。試験片を 2 種類使用した。形状 (長さ $2l$, 幅 w , 厚さ H) を図 11 に示す。

図 12 に示すように、支点間距離を $2l=200 \text{ mm}$ とする三点曲げを施し、荷重 P をかけた点から 15 mm 離れた点 M の y 方向の変位を測定した。基準荷重を 10 kgf とし、徐々に荷重を増加させていき、変位が 5 μm 変化するごとに荷重の大きさを測定した。ヤング率の算出は、試験片のたわみが線形に変化するようになるまで、負荷、除荷を繰返しかけてから行った。荷重 P 、点 M における変位 δ 、ヤング率 E との関係は、断面二次モーメント I を用いて次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$E = \frac{P}{I\delta} \times 15.82 \times 10^5 \text{ [MPa]} \dots\dots\dots (7)$$

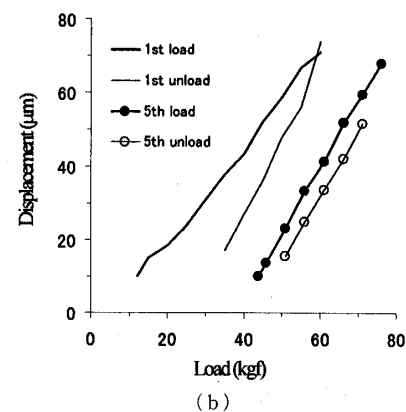
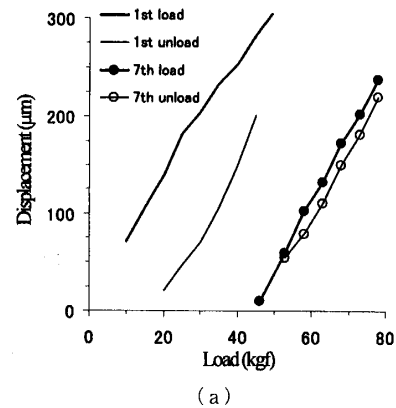


Fig. 13 Vertical displacement vs. load at point M

式(7)に、最小二乗法をあてはめ、次式が求まる。

$$E = \frac{15.82 \times 10^5}{I} \frac{\sum P^2}{\sum P\delta} \text{ [MPa]} \dots\dots\dots(8)$$

試験結果を図13に示す。数回の負荷・除荷によって、試験片(a),(b)ともに、たわみが直線的に変化していることが確認できる。この結果と、式(8)によりヤング率を求めた。その結果を表4に示す。

4.3 ガスガンによって発生する圧力変動

ガスガンによって衝撃波を発生させる原理は、図2に示すように、高圧空気を金属薄膜で保持し、薄膜をニードルで破壊することによって衝撃波を得るものである。

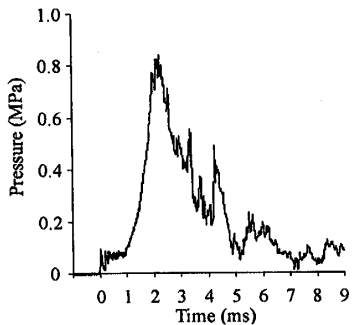
ガスガンによって試験片表面に発生する圧力変動は圧力センサを用いて測定することができる。ガスガンの先端から前方500mmの位置に鉄板を配置し、その鉄板に圧力センサを埋め込んで圧力測定を行った。

図14に、実験により計測された衝撃圧の波形を示す。図14(a)は圧力変動が生じている間のすべての時間の圧力変動を表示したものであり、図14(b)は圧力波が試験片に到達した直後の衝撃波による圧力変動を示したものである。

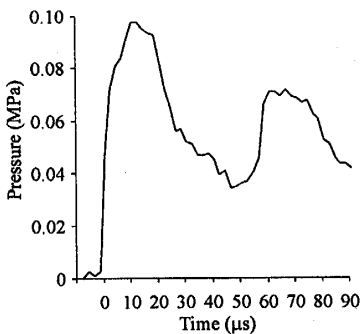
シミュレーションにおける負荷圧力 [図6(b)] は、

Table 4 Calculated young's modulus

Specimen	Young's modulus
(a)	9685 MPa
(b)	7863 MPa



(a) Pressure at all time



(b) Pressure due to shock wave

Fig. 14 Pressure on specimen surface

図14(b)の結果に基づいて決定したものである。図14(b)以降の圧力変動は、圧力の絶対値は高いものの、その周波数成分は低く、壁面の加振にはほとんど寄与しない。

4.4 解析結果と実験結果との比較

解析モデルは、図4(a)と同様の寸法で、密度 $\rho=2380 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0.15$ とし、深さ $d=25\text{mm}$ の欠陥がある場合は、ヤング率 $E=7863 \text{ MPa}$ 、深さ $d=50 \text{ mm}$ の欠陥がある場合は、ヤング率 $E=9685 \text{ MPa}$ として解析を行った。深さ 100 mm の欠陥がある場合は、Model A(ヤング率 $E=11000 \text{ MPa}$)、Model B(ヤング率 $E=33800 \text{ MPa}$, $C_p \cong 3771 \text{ m/s}^{(9)}$)の二とおりで解析を行った。これらの解析値と実験との比較結果を示す。図

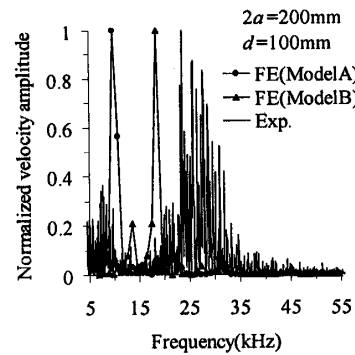
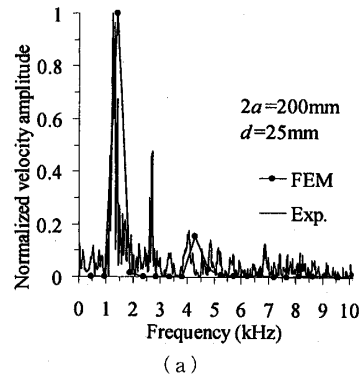
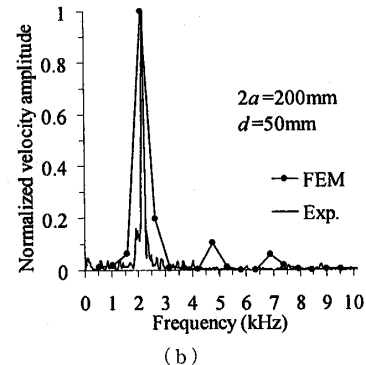


Fig. 15 Comparison with an experiment and FEM analysis in the high frequency range



(a)



(b)

Fig. 16 Comparison with an experiment and FEM analysis in the low frequency range

15に示すのは、弾性波振動の固有振動数における比較結果である。

実験に用いた圧力波は、図14に示したように、検査面に衝撃圧を荷したあとに大きな圧力波が検査面に到達する。計測に用いるレーザが、この粗密波である圧力波の中を通過するために、レーザの速度が変化し、計測される振動数が変化する。そのために、誤った固有振動数が計測されたのである。よって、著者らは弾性波振動ではなく、たわみ振動を計測の対象とすることにした。

図16に示すのは、たわみ振動の周波数帯におけるスペクトルの比較結果である。弾性波振動の固有振動数を比較した場合と比べて、卓越周波数が一致していることが確認される。これは、たわみ振動の周波数が弾性波振動のそれに比べて低いために、疎密波による

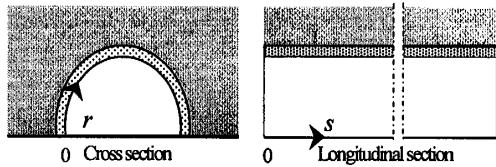


Fig. 17 General Shinkansen tunnel (schematic)

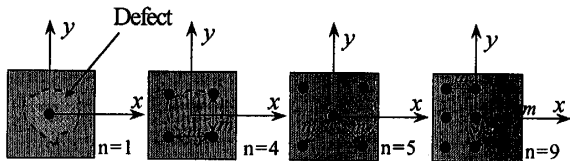


Fig. 18 Possible configurations of laser reading locations for velocity measurement

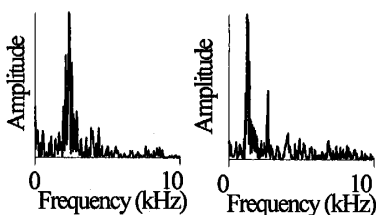


Fig. 19 Typical experimental spectrum patterns for flawed concrete (with shallow defect)

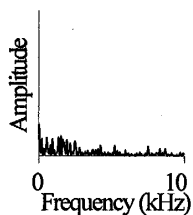


Fig. 20 Typical experimental spectrum pattern for solid concrete (without shallow defect)

干渉を受けにくいためである。さらに、たわみ振動は継続時間が長く、数十ms継続する。そこで、衝撃波が到達直後から10ms経った後からの振動を計測することによって、圧力波の干渉の影響を防いだ。

5. 数値解析による 欠陥同定シミュレーション

5.1 欠陥同定の手順 提案する実際のコンクリート構造物の検査方法は、次のような手順で行う。

(1) 図17に示すように、トンネル断面方向と進行方向に r, s 座標を定義して、トンネル内のコンクリート表面に番地付けを行う。

(2) レーザ計測により表面に垂直方向の速度を計測し、記録する。図18に計測点の例を示す。検出したい欠陥のサイズによって、計測点の数 n 、計測点の間隔 m は、可変である。

(3) 欠陥を発見し、さらに詳しい検査が必要かどうかを判断するために、スペクトル解析を行う。図19に浅い欠陥(層間はく離等)がある場合のスペクトルのパターンを示す。また、図20に浅い欠陥がない場合のスペクトルの例を示す。スペクトルを計算し、図19に示されるような結果が得られた場合、その検査面の

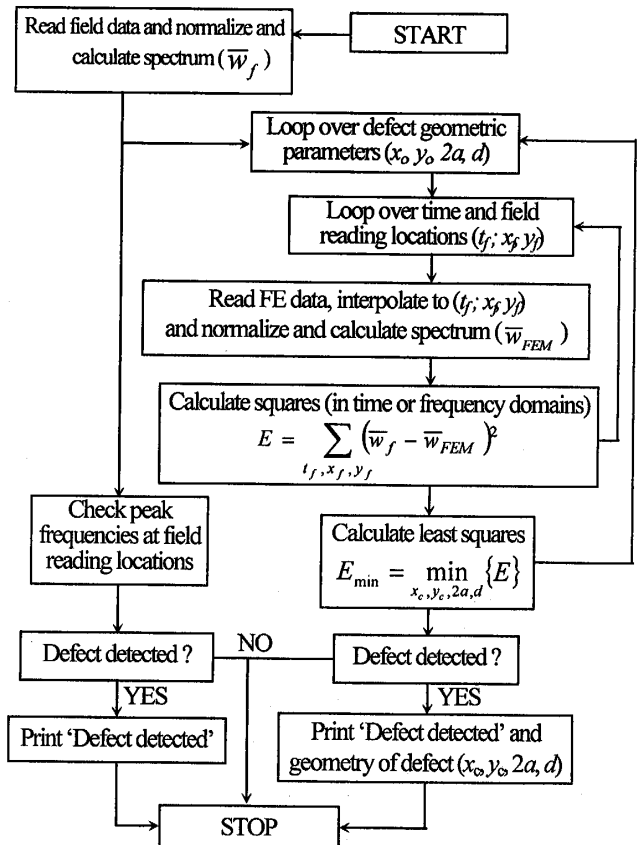


Fig. 21 Flow chart of defect detection program

計測値と番地を、後の詳細な検査のために記録する。

(4) 詳細な検査が必要とされた番地において、欠陥同定プログラムにより欠陥同定作業を行う。問題があると判断された場所で、検査に用いる欠陥同定プログラムのフローチャートを図 21 に示す。また、欠陥同定プログラムの概要を以下に示す。

(1) 入力パラメータ(計測値に対する値, FEM 解析値に対しては既知)

ヤング率 E , P 波速度 C_p , コンクリートの厚さ D_z , 最大衝撃圧 q_m , 衝撃負荷時間 t_c

(2) 標準化する値(計測値, FEM 解析値両方に対して実行する)

表面に垂直方向の変位 w , 計測時間 t , 周波数 f

$$\bar{w}(x, y, t) = \frac{w}{w_0}, \bar{t} = \frac{(t - t_c)}{t_0}, \bar{f} = \frac{f}{f_0}$$

$$w_0 = \frac{q_m t_c C_p}{E}, t_0 = \frac{1}{C_p}, f_0 = C_p$$

..... (9)

(3) 最小二乗計算する範囲(時間領域)

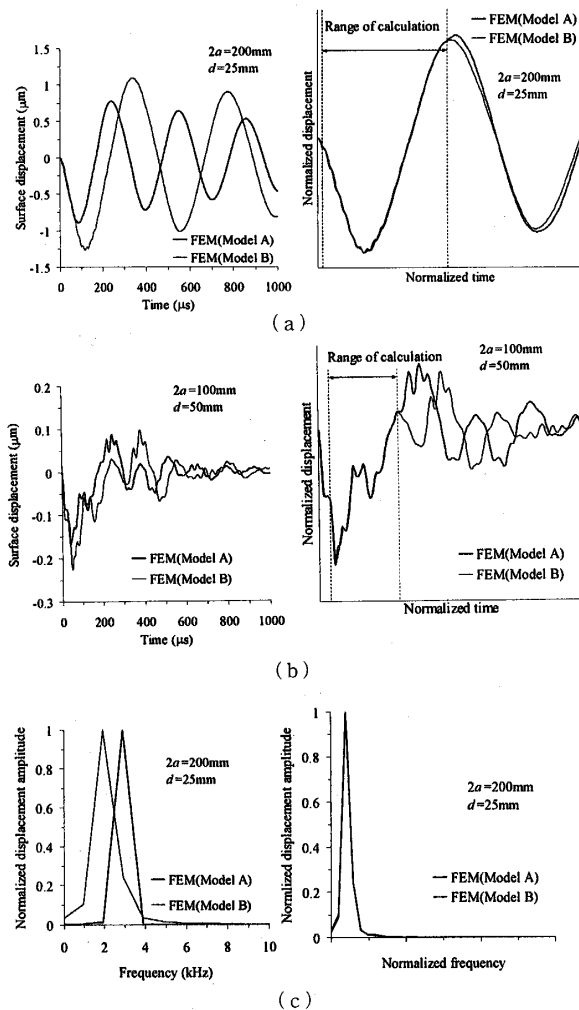


Fig. 22 Normalization of results for models having different mechanical properties

欠陥同定プログラムにより計算する時間の範囲は、式(10)に示すように、衝撃波を負荷し終わった時間から、伝ばする弾性波が、底面により反射し再び表面に帰ってくる時間までとする。

$$t \in \left[t_c, \left(\frac{2D}{C_p} \right)_{\min(\text{field, FEM})} \right] \dots \dots \dots (10)$$

(4) 最小二乗計算する範囲(周波数領域)

欠陥同定プログラムにより計算する周波数の範囲は、式(11)に示すように、スペクトル分解能 Δf に依存する最小の周波数から、 $1.5/t_c$ で示される衝撃波負荷時間に依存する、抽出することのできる最大の周波数との間の範囲で行う。

$$f \in \left[\Delta f, \left(\frac{1.5}{t_c} \right)_{\min(\text{field, FEM})} \right] \dots \dots \dots (11)$$

5.2 数値解析によるシミュレーション 欠陥同定を数値解析によりシミュレーションした例を示す。

(a) : $x_c=0$ mm, $y_c=0$ mm, $2a=200$ mm, $d=25$ mm, $\alpha=0$, $\beta=0$ の欠陥がある場合と (b) : $x_c=0$ mm, $y_c=0$ mm, $2a=100$ mm, $d=50$ mm, $\alpha=0$, $\beta=0$ の欠陥がある場合の壁面振動を、有限要素法を用いて解析し (Model A : $E=33\,800$ MPa, $\rho=2\,380$ kg/mm³, $\nu=0.15$, $D_z=400$ mm, Model B : $E=20\,600$ MPa, $\rho=2\,350$ kg/mm³, $\nu=0.15$, $D_z=500$ mm), それを式(9)により標準化した様子を、図 22(a), (b) に示す。図 22(a), (b) に示されるように、式(10)に示される範囲内での標準化が正確に行われていることが確認できる。また、図 22(c) に示したものは、(a) の欠陥がある場合の、表面の変位の時間的変化を、式(9)により標準化した後、FFT により周波数成分に分解した結果である。図 22(c) に示されるように、スペクトルの標準化においても、よく一致する結果が得られていることがわかる。Model A で解析を行った値を計測値と想定して、いくつかの欠陥形状に対して欠陥同定のシミュレーションを行った。結果の例を表 5 に示す。欠陥同定の数値シミュレーションにより、表面の変位の時間的変化、または、周波

Table 5 Examples of results of defect detection procedure

Existing defect geometry (in FEM model)	The detection of a defect by defect detection program (in time/frequency domain)
$x_c=250$ mm, $y_c=250$ mm, $2a=25$ mm, $d=200$ mm, $\alpha=0$, $\beta=0$	success / success
$x_c=0$ mm, $y_c=0$ mm, $2a=200$ mm, $d=25$ mm, $\alpha=0$, $\beta=0$	success / success
$x_c=0$ mm, $y_c=0$ mm, $2a=200$ mm, $d=50$ mm, $\alpha=0$, $\beta=0$	success / success

数領域のデータを用いて、本手法による欠陥の検知が可能であることが示された。

6. 結 言

(1) 衝撃波とレーザ計測を用いる方法による、コンクリート構造物の非接触非破壊検査法の基礎技術を開発した。

(2) 有限要素法解析により、多様な欠陥形状に対する壁面振動のシミュレーションを行い、データベースを作成した。このデータベースと計測値を照らし合わせることで欠陥を同定することができる。

(3) 欠陥同定の数値シミュレーションにおいて、直径 25 mm、深さ 200 mm の検査の同定に成功した。しかし、実験との比較による弾性波振動の計測による欠陥の詳細な検知は困難である。

(4) たわみ振動の低い周波数領域(0~10 kHz)のデータによって、欠陥同定の数値シミュレーションを

行ったところ、直径 200 mm、深さ 50 mm の欠陥の同定に成功した。

(5) 低い固有振動数で振動するたわみ振動において、解析結果と実験結果がよく一致しており、提案する本手法の有効性が確かめられた。

文 献

- (1) 小林一輔, コンクリートが危ない, (1999), 1, 岩波新書.
- (2) 毎日新聞, 社説, 毎日の視点, (1999-10.10).
- (3) Timoshenko, S. P. and Goodier, N., *Theory of Elasticity*, (1970), 485-508, McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- (4) 谷口修, 振動工学ハンドブック, (1976), 99-734, 養賢堂.
- (5) 小堀与一, 実用振動計算法, (1978), 1, 工学図書.
- (6) Graff, K. F., *Wave Motion in Elastic Solids*, (1991), 229-258, Dover Publications, Inc., New York.
- (7) 飯泉新吾, 建築学便覧II構造, (1977), 1, 丸善.
- (8) 小出昭一郎, 物理学, (1984), 1, 裳華房.
- (9) 運輸施設整備事業団, 運輸施設事業団研究成果報告書「非破壊検査の実証試験」, (99-11), 1.
- (10) 村上敬宜, 材料力学, (1994), 81-122, 森北出版.