論文 コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法

森 和也*¹·Andrea SPAGNOLI*²·村上 敬宜*³·鳥越 一平*⁴

要旨:コンクリート構造物の新しい非接触非破壊検査法を開発した。コンクリート構造物の 検査法の一つに,打音法がある。ハンマーで壁面を打撃し,反響音を作業者の耳で聞き分け て,欠陥の有無を判断する。本研究で提案する新しい方法は,ハンマーの代わりにガスガン を用いて壁面を打撃し,作業者の耳の代わりにレーザー・ドップラー振動計を用いて壁面振 動を計測する。本方法を用いて非破壊検査を試みたところ,直径 200mm,深さ 50mmの欠 陥の検出に成功した。本方法は,人間による作業を必要としないので,非破壊検査の自動化 を可能にする技術である。

キーワード:非破壊検査,コンクリート,圧力波,打音法,レーザー振動計

1. はじめに

コンクリートは,かつて,半永久的に劣化し ないであろうと考えられてきた。しかしながら, 施工から数十年経ったトンネルや高架から,劣 化によるコンクリート片の落下事故が続発して いる。この事故は,直ちに重大な人身事故につ ながる可能性があるので,早急な対応が迫られ ている。

コンクリート構造物のもっとも一般的な検査 方法は、打音法である ¹⁾。従来の打音法は、作 業者がコンクリート壁面をハンマーで打撃し、 それによって生じた反響音を作業者の耳で判断 するものである。従来の方法は、作業効率が低 く、作業者の技量に大きく依存しているので欠 陥の見落としが起きることがある。

本研究では,新しい非接触非破壊検査方法を 提案する。この方法は,圧力波を発生させるガ スガンと壁面振動を計測するレーザー・ドップ ラー振動計を用いる。本方法の特長は,人間に よる作業を必要としないことである。これによ って自動化が可能になる。人工欠陥を埋め込ん だコンクリート試験片を用いて実験を行った。 実験室の試験では、ガスガンの代わりに衝撃波 管を用いて実験を行い、直径 200 mm,深さ 50 mmに位置する欠陥の検出に成功した。

2. 新しい検査法の原理

2.1 振動のパターン

欠陥を有する壁面に衝撃を与えると図-1に 示すような二つの振動パターンを示す。一つの 振動のパターンは縦振動である。壁面内に欠陥 があると,縦波は欠陥で反射する。反射波は壁



- *1 熊本大学助教授 工学部知能生産システム工学科 工博 (正会員)
- *2 パルマ大学助教授 土木工学科 Ph.D
- *3 九州大学大学院教授 工学府機械科学部門 工博
- *4 熊本大学助教授 工学部知能生産システム工学科 工博

面で再び反射する。これらの反射は壁面と欠陥 との間で繰返される。よってこの縦振動による 共振周波数 feは、次の様に表される。

$$f_{\rm e} = C_{\rm p} / 2d \tag{1}$$

ここで,*d*は欠陥の深さで,*C*_pは縦波の速度である。

一般的にコンクリートの C_pは 3000 m/s から
4000 m/s 程度の速度を持つ。今,欠陥の深さを
d = 25 ~100 mm と仮定すると,縦波の周波数
は式(1)から,

$$f_{\rm e} = 15 \text{ kHz} \sim 80 \text{ kHz}$$
(2)
となる。

二つ目の振動パターンはたわみ振動である。 コンクリート壁面と欠陥との間のコンクリート 部分が太鼓のように振動する振動パターンであ る。このたわみによる周波数 f_f は, $\mathbf{2} - \mathbf{2}$ に示 すような端点が単純支持された円盤のたわみ振 動の周波数で近似することができる。よって周 波数 f_f は, 次のようになる²⁾。

$$f_{\rm f} = \frac{K_{\rm n}}{2\pi} \sqrt{\frac{Ed^2}{12(1-v^2)\rho a^4}}$$
(3)

ここで、 K_n は振動のモードによって異なる値を 持つ係数で、最も低い周波数はn=1、 $K_n=4.99$



図-2 単純支持されたの円盤のたわみ振動

である。E, v, ρ は, それぞれコンクリートの ヤング率, ポアソン比, 密度である。

今,欠陥の直径を2a=200 mm,深さをd=25
 mmから100 mmと仮定すれば、たわみ振動の
 周波数は式(3)から、

 $f_{\rm f} = 1.6 \text{ kHz} \sim 9.0 \text{ kHz}$ (4) ここで, $E = 19 \sim 36 \text{ GPa}$, $v = 0.15 \sim 0.20$, $\rho = 2380$ kg/m³ (*E*は, $C_{\rm p} = 3000 \text{ m/s} \sim 4000 \text{ m/s}$ として算 出した)。

一般的に,たわみ振動の周波数は縦振動の周 波数より低く,たわみ振動の振幅は縦振動の振 幅より大きい。

著者らは、まず、縦振動の計測を試みた。縦 振動の周波数が測定されれば、直ちに式(1)から 欠陥の深さを推定できるからである。

2.2 新しい非接触非破壊検査法

本論文で提案する新しい非接触非破壊検査 法の概略図を図-3に示す。ガスガンによって 圧力波を発生させる。圧力波はコンクリート壁 面を振動させ、欠陥がコンクリート壁面内に存 在すると、壁面は縦振動およびたわみ振動を起 こす(欠陥がない場合も弾性変形による振動は 起きるが、その振幅の大きさは、縦振動やたわ み振動に比べ小さい)。その振動を数台のレーザ ー・ドップラー振動計で計測する。この計測さ れたデータをもとに欠陥の形状および深さの情 報を推定するのである。この方法は、熟達した 作業者の技術を必要とせず、自動化を可能にす るものである。



図-3 新しい非接触非破壊検査法



表一1 欠陥寸法

diameter	depth
2 <i>a</i>	d
[mm]	[mm]
200	25
200	50
200	100
100	25

3. 実験方法

3.1 衝撃波管

実験室内での試験では、図-4に示すような 衝撃波管を用いて圧力波を発生させた。高圧部 にコンプレッサーで圧縮空気を貯め、金属薄膜 をニードルで破壊して、圧力波を発生させる。 ニードルはソレノイドで駆動し、コントローラ ーで制御する。衝撃波管の内径は100 mmで、 圧縮空気の圧力は0.4 MPa~0.7 MPa とした。

3.2 試験片

試験片は一辺の長さがほぼ 500 mm の立方形 で,内部に厚さ 10 mm の円板状の発泡スチロー ルを埋め込んだ。表-1 に,欠陥寸法を示す。

コンクリートの配合は,セメント 300 kg/m³, 水 178 kg/m³, 細骨材 824 kg/m³, 粗骨材 992 kg/m³ とした. 密度*ρ*=2380 kg/m³, ヤング率*v*=22 GPa, ポアソン比 0.19 であった。

深さの推定で必要となるので、試験片の音速 の測定も行った。コンクリート表面の 200 mm 離れた2点の振動を2台のレーザー・ドップラ 一振動計で測定しながら、測定する2点の延長 上にインパクトを与え、2 点間に波の到着する 時間差から音速を測定した。その結果、この試 験片の縦波の速度は C_p = 3200 m/s であった。

3.3 壁面振動の計測

壁面振動は、レーザー・ドップラー振動計を

3台用いて計測した。今回の実験では,計測点 はすべて欠陥の中心軸上の点である。

4. 実験結果と考察

4.1 試験片表面での圧力

非破壊試験を行う前に,圧力波によって生じ る試験片表面上の圧力の変化を測定した。試験 片の面上に,圧力センサーを埋め込んだ鋼板を 固定し,圧力を測定した。

図-5は、圧力の測定結果である。1ch は衝 撃波管の中心軸上で試験片面上の点の圧力で、 2ch, 3ch, 4ch は、それぞれ中心軸から 50 mm, 100 mm, 150 mm 離れた点における試験片上の 圧力を示している。

4.2 縦振動

図-5の圧力が立ち上がって1 ms 未満の部 分は衝撃波による圧力で,この部分は高い周波 数成分を含んでいる。そこで,衝撃波の到着後 1 ms 未満部分の壁面振動を高速フーリエ変換 して得られた周波数スペクトルの一例を図-6 に示す。欠陥寸法は2*a* = 200 mm,深さ*d* = 100 mm である。



図-6において,スペクトルのピークは 26.4kHzに現れている。式(2)と式(4)の結果から 10 kHz 以上の振動は縦振動によってしか生じ ないので,この振動は縦振動によるものである と考えられる。

この周波数から深さを推定してみると ($C_p = 3200 \text{ m/s}$),

$$d = C_{\rm p} / 2f_{\rm e} = 61 \rm{mm} \tag{5}$$

となる。この結果, 誤差は約40%であることがわかる。

この誤差の原因は、レーザーと圧力波との干 渉効果によるものである。計測用のレーザーは、 圧力波の中を通過しながら壁面振動を計測する。 しかしながら、圧力波は粗密波であるので原理 的にレーザーの速度が変化し、計測される周波 数が変動するのである。

そこで著者らは,計測対象をたわみ振動に変 えて計測を行った。

4.3 たわみ振動

たわみ振動は、本方法に対してすぐれた特性 を持っている。たわみ振動の周波数は低いので、 圧力波の干渉によって生じるノイズをフィルタ ーで除去することは容易である。なぜならば、 干渉によって生じるノイズは高い周波数成分だ からである。また、減衰が低いこともすぐれた 特性である。減衰が低いと、圧力波が消失した 後も振動が継続し、正確な壁面振動を計測する ことができるのである。



図-7は、圧力波による壁面振動を示してい

図-6 表面振動速度の周波数スペクトル

る。いずれの場合も振動が開始して,約10 ms まではランダムな壁面振動を示し,その後減衰 正弦波となっている。この減衰正弦波がたわみ 振動である。

振動開始から約10 ms間のランダムな振動の 理由は次の二つである。一つ目は、図-5から わかるように、圧力波によって試験片表面に作 用する圧力はランダムに変動しているので、壁



面振動も圧力波が作用している間はランダムな 振動となる。二つ目は,圧力波が試験片に作用 している間,計測用レーザーは圧力波内を貫通 しているので,干渉効果で計測される周波数は ランダムに変動する。

そこで, 圧力波が消失した後, すなわち, 振動が開始して約 10 ms 経った以降のデータを用いて解析を行えば, 正確な欠陥推定が行える。



図-8は、図-7の振動データの初期の 10 ms を除いたデータを高速フーリエ変換して得 られた振幅スペクトルである。*a*=100 mm, *d*= 25, 50 mm では、明確なピークを確認すること ができる。

a = 100 mm, *d* = 100 mm の場合も 3200 Hz に おいてわずかながらピークを確認することがで きるが,実用的には 100 mm の深さは測定限界



を超えていると考えられる。

欠陥を有しない壁面の非破壊試験も行ったが, 明確なピークは現れなかった。

図-9は、図-8の結果を確認するために、 ハンマーで壁面を打撃し、その振動の振幅スペ クトルを示したものである。振動の計測は、衝 撃波管を用いた実験と同様にレーザー・ドップ ラー振動計を用いて計測した。

図-8と図-9において,振幅スペクトルの ピークが生じている周波数は,打撃に圧力波を 用いた場合とハンマーを用いた場合とは,ほぼ 一致していることがわかる。この結果から,圧 力波を用いた打撃は,ハンマーを用いた場合と 同様の効果を得られることがわかる。

5. 実際の欠陥の検出

以上の実験結果は、欠陥中心上の表面の振動 計測結果に基づく結果であったが、欠陥の深さ が 50mm以下の場合、欠陥の有無は計測点が欠 陥の縁よりわずかに内側であれば検出できた。

そこで、図-10に示すような欠陥が壁面内 に存在する場合、多点を同時に計測すれば、複 数の計測点で欠陥の存在が検出される。それら の点から、おおよその欠陥形状を推定すること ができる。このとき欠陥の検出可能な最低の寸 法は、ほぼ測定間隔*s*と等しくなる。

欠陥の形状が推定されると,検出された周波 数スペクトルから,大体の欠陥深さを推定する ことができる。

6. まとめ

新しい非接触非破壊検査法を提案した。この 方法は,圧力波でコンクリート壁面を打撃し,



レーザー・ドップラー振動計で壁面振動を計測 して、欠陥を同定するものである。

実際に、人工欠陥を導入したコンクリート試 験片を用いて欠陥検出を行ったところ、直径 200 mm, 深さ 50 mm の円形欠陥を検出するこ とが可能であった。

今回の実験では,圧力波の発生に衝撃波管を 用いているので,圧力波を発生させる度に金属 薄膜を交換しなければならなかった。これでは, 作業効率が低く,トンネルなどの広大な面積を 検査することは困難である。そこで現在,燃焼 を用いた圧力波の連続発生装置を開発中である。

本研究は,運輸施設整備事業団基礎研究制度 による支援のもとに行った研究である(課題番 号 99-11)。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- たとえば、榎本秀明・稲川敏春、トンネル 覆工を対象とした打音検査手法の開発、鉄 道総研報告、Vo.15, No.12, pp.39-44, 2001
- 2) たとえば, 近藤恭平, 振動論, 培風館, pp.221, 1999