

論文 充填検知センサを利用したコンクリート内部欠陥検知に関する基礎実験

金子 稔*1・坂井 孝*2・安田 正雪*3・高橋 宏治*4

要旨：断面が大きいコンクリート構造物の内部欠陥検知は非常に困難であるが、コンクリート打設時に充填管理用としてコンクリート中に埋込まれた充填検知センサを利用して、コンクリート構造物内部の硬化コンクリートの内部欠陥検知への適用について、基礎的実験を行った。その結果、表面からの加振によりセンサ間における弾性波の伝播時間計測が精度良くできることから、センサ間のコンクリートの内部欠陥検知が可能であることを明らかにした。

キーワード：非破壊検査, 伝播時間, 弾性波, 内部欠陥, 充填検知センサ

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質保証および維持管理の重要性が高まってきており、これらに関わるコンクリート構造物の調査・診断方法、特に非破壊検査による技術の確立が求められている。断面の大きい構造物の調査・診断では、構造体内部深くの欠陥検知も必要とされるが、診断方法として一般的に用いられる超音波法¹⁾、電磁波法、AE法、赤外線法等では、コンクリート表面から遠い内部欠陥を検知することは困難な場合が多い。このため、コンクリート打設時に内部に複数の加速度センサ等を埋込むなどの方法も考えられるものの、加速度センサの価格や耐久性を考慮すると内部欠陥検知のみの用途では現実的ではない。そこで、筆者らは既に開発したコンクリート充填検知システム²⁾の充填検知センサ、すなわちコンクリート打設時に充填管理用としてコンクリート中に埋込まれた安価な使い捨ての振動デバイス（以下、センサと略）が外部からの加振による弾性波を測定できることを利用すると、コンクリート構造物内部の欠陥検知などが容易に可能になると考えられた。

本報は、コンクリート充填検知システムで充

填状況を確認しながら空洞を有する小型モデル試験体を製作し、コンクリート硬化後にコンクリート中に埋込まれたセンサによる試験体内部の欠陥検知への適用について、基礎的実験を行った結果をとりまとめたものである。

2. コンクリート充填検知と欠陥検知の概要

使用したセンサは写真-1に示す形状で円板状の圧電セラミックスを約15mm角の樹脂ホルダーに取り付けたものである。また、コンクリート充填検知のブロック図を図-1に、欠陥検知のブロック図を図-2にそれぞれ示す。

コンクリートの充填検知は、センサを予め型枠面や鉄筋等へ取り付け、コンクリート打込み

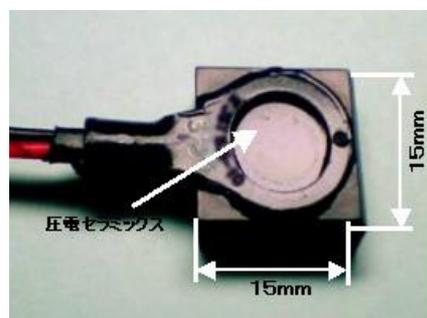


写真-1 振動デバイス

*1 曙ブレーキ工業（株）新商品開発室 主査（正会員）

*2 曙ブレーキ工業（株）新商品開発室 主査

*3 東洋建設（株）美浦研究所材料研究室主任研究員（正会員）

*4 東洋建設（株）大阪本店 土木部（正会員）

時に振動デバイスを可聴域の周波数（3～15kHz）で振動させ、その周波数特性を検出することによってセンサが周囲の物質（コンクリート、水、空気など）を識別し、リアルタイムにコンクリートの充填および未充填を判別するものである。

内部欠陥検知で用いるセンサは前述した充填検知の際にコンクリート中に埋め込んだものを利用する。測定方法の詳細は後述するが、コンクリート硬化後にコンクリートを伝播する弾性波を受けると、センサの圧電セラミックスは電荷を発生するため、その発生した電荷をチャージアンプにより増幅して、外乱ノイズを除去するフィルタを通すことにより弾性波の電気信号を得ることができるものである。この弾性波測定のための装置は、コンクリート内部を伝播する弾性波の速度に対応できるように広帯域高速型の専用アンプ（周波数帯域 200kHz, 最大増幅度 60dB）を製作して使用した。

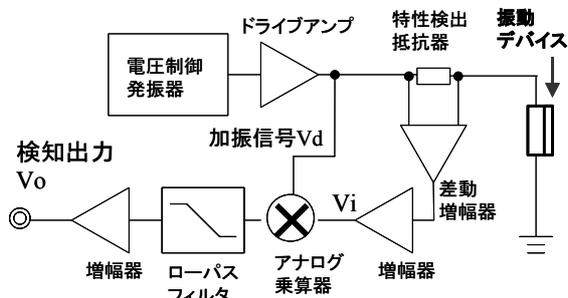


図-1 充填検知のブロック図

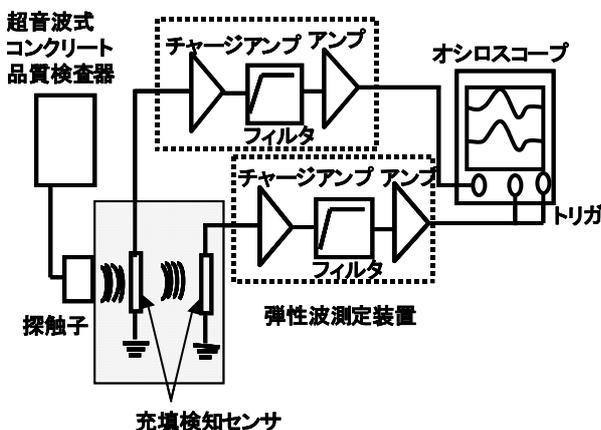


図-2 欠陥検知のブロック図

3. 実験の概要

内部欠陥を有する試験体の表面より加振して、コンクリート内部に弾性波を発生させ、センサ間における弾性波の伝播時間の違いによるコンクリート内部の欠陥検知の確認を行ったものである。また、コンクリートの品質確認に広く用いられている超音波式コンクリート品質検査器を用いて同試験体の伝播時間を測定して比較を行った。

3.1 内部欠陥を有する試験体の製作

写真-2および図-3に示すように、空洞を模擬した内部欠陥を有する幅 30cm, 長さ 90cm, 高さ 40cm の試験体を製作した。型枠内に鉄筋を垂直方向に均等に配し、各鉄筋の上部および下部のそれぞれ中央位置にセンサ各 1 々の計 8 個 (No.1～No.8) を取り付けた。また、模擬欠陥として厚さ 3cm, 幅 20cm, 長さ 20cm の発泡スチロールを上部のセンサ No.1 と No.2 の間に取り付けた。コンクリートは水セメント比が 50%, 単位水量が $170\text{kg}/\text{m}^3$, スランプ 15.0cm, 空気量 3.7% のものを 2 層に分けて打ち込み、各層を棒形高周波振動機を用いて締め固めた。その際充填検知システムにより、センサ部にコンクリートが充填できたことを確認した。試験体は試験室内で保存し、材齢 7 日に脱型した。材齢 28 日で埋設した発泡スチロールを取り除き、欠陥検知の測定を行った。

3.2 試験体と供試体表面からの伝播時間測定

試験体は材齢 7 日および 28 日において、超音波式コンクリート品質検査器 (50kHz の連続パースト波) を用いて、図-4 に示すように試験体表面から伝播時間を測定した。材齢 7 日では試験体の長さ方向 (長さ 90cm) の上部 (1 から 4 および 9, 10 の A-B 間) および下部 (5 から 8 の A-B 間) において、また材齢 28 日においても同様に長さ方向の他、幅方向 (11 から 18 の A-B 間) および鉄筋位置に相当する側面表面で 18cm 間 (同一側面上の 2 点間) の伝播時間

を測定し、それぞれ伝播速度を算出した。一方、試験室内で封かん養生した円柱供試体(径 10cm, 長さ約 20cm) の 3 本は、材齢 7 日および材齢 28 日において伝播時間を測定し、伝播速度を算出した後、圧縮強度試験に供した。



写真-2 打設前の試験体状況

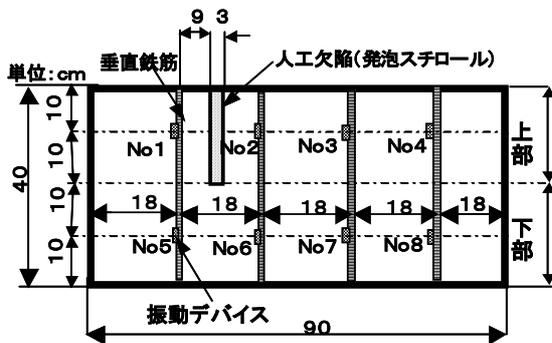


図-3 試験体概要

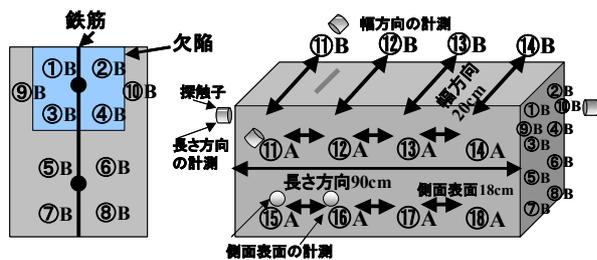


図-4 表面からの伝播時間測定

3.3 コンクリート内部の伝播時間測定

コンクリート内部の伝播時間の測定状況を写真-3に示す。超音波式コンクリート品質検査器の送信側探触子のみを用いて試験体の側面を印加電圧 1.2kV、駆動周波数 50kHz のバースト波形で加振することにより、コンクリート内部を伝播する弾性波を鉄筋に取り付けたセンサで受信する。このとき隣接するセンサ 2 個の出力

信号をオシロスコープで観察し、この位相差を測定することで伝播時間を求める。オシロスコープは波形の観察が容易なように一般的なデジタルストレージ型を使用し、サンプリングした波形は 16 回の平均化処理を行った。

なお、測定上の注意点としてセンサから弾性波測定装置までの接続はノイズの影響を受けにくくするためローノイズタイプのシールドケーブルを使用した。また、試験体内部に超音波を効率よく送り込むため探触子と試験体の間にはグリスを塗布して音響インピーダンスの整合を行った。測定に際しては探触子を試験体に接触する際、センサと同軸上に設置するがオシロスコープの波形が大きくなるように位置の微調整を行った。



写真-3 測定状況

4. 実験結果と考察

4.1 試験体と供試体の伝播速度

表-1に試験体の表面から測定した伝播時間から求めた伝播速度の結果を示す。

長さ方向の欠陥部のある上部の伝播速度は、健全部と比較して約 70~100m/s 若干遅い傾向は認められるものの、欠陥部があるとの判断は難しいものと思われる。

封かん養生した供試体の伝播速度と強度の関係を図-5に示す。供試体の伝播速度は表-1に示した試験体の伝播速度と比較して若干大き

くなった。

表-1 表面からの伝播速度の結果

部位・方向	測定位置	伝播速度 (m/s)	
		材齢7日	材齢28日
上部欠陥部・長さ	1から4の平均	3878	4132
上部健全部・長さ	9, 10の平均	3971	4206
上部健全部・幅	11から14の平均	—	4312
上部健全部・側面表面	11-12, 12-13, 13-14間の平均	—	4419
下部健全部・長さ	5から8の平均	4018	4249
下部健全部・幅	15から18の平均	—	4287
下部表面部・側面表面	15-16, 16-17, 17-18間の平均	—	4491

本実験では試験体からコア強度を求めていないことから明確ではないが、今後供試体レベルおよび構造体内部の伝播速度と強度の関係についてのデータを蓄積することにより、構造体内部の伝播速度から内部コンクリートの強度推定³⁾へ利用できると考えられる。

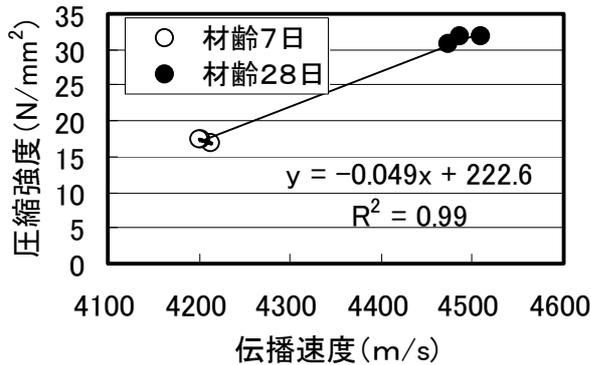


図-5 供試体の伝播速度と圧縮強度の関係

4.2 コンクリート内部の伝播時間

測定位置は図-6に示すように内部欠陥のある上部のV1、および健全部のV2~V6を材齢28日で測定した。図-2に示す測定装置を用いてコンクリート内を伝播する弾性波(50kHz)をセンサで捉えることができた。なお、V1は図-6のV3側(右側)からの加振では弾性波の減衰が大きく充分なS/N比(信号対雑音比)が確保できなかったため、V1側(左側)へ加振方向を変えて測定した。このときセンサへの弾性波の入力方向が反対になるがコンクリート中に置かれたセンサの弾性波に対する感度の異方性

は無いことが確認されている⁴⁾ため加振方向の影響は無く測定できる。

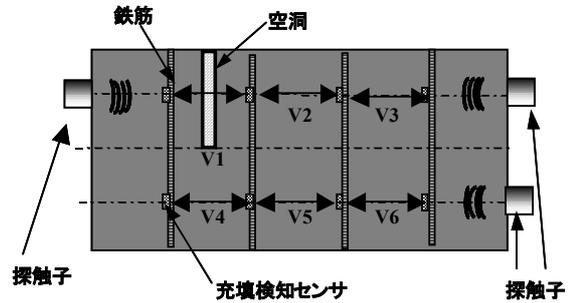


図-6 弾性波速度の計測位置

測定結果を図-7~図-10に示す。内部欠陥が存在する上部区間V1の弾性波波形を図-7に、健全部区間V2からV6(上部, 下部)を図-8~図-12にそれぞれ示す。伝播時間は二つのセンサの波形における最初のピーク値の到達時間差を測定することで求めた。それぞれの区間の伝播時間及び速度を図-13および図-14に示す。

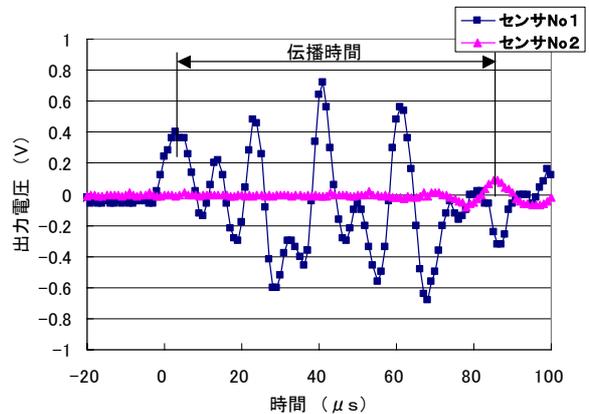


図-7 V1区間(欠陥部)の弾性波波形

健全部の伝播時間は43.0~45.2μsであり、センサ間の距離から算出した伝播速度は4186m/s~3982m/sであった。一方内部欠陥のある区間V1の伝播時間は82μs、伝播速度では2195m/sと大幅に遅い速度を示した。図-13から明らかかなように区間V1は伝播速度が他の健全な部分に比べて約53%と大幅に低下していることが

ら、区間 V1 には明らかに何らかの欠陥が存在すると判断できる。また、健全部の結果では区間 V2 から V6 まで伝播時間の差は小さいことから、欠陥部は存在しないと判断することができる。ただし、センサ間の距離が長くなった場合には弾性波の減衰や欠陥部周辺での回折現象などの影響で、欠陥部の判断が難しくなるものと考えられる。

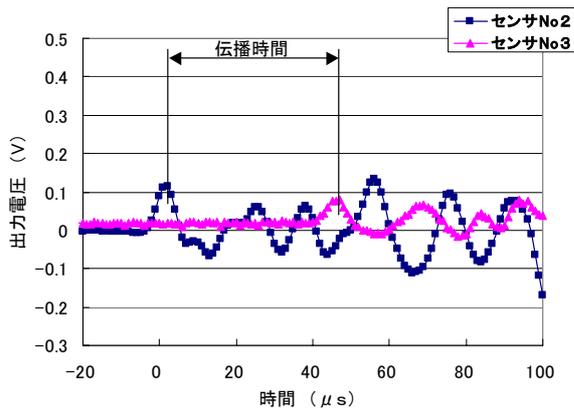


図-8 V2 区間(健全部)の弾性波波形

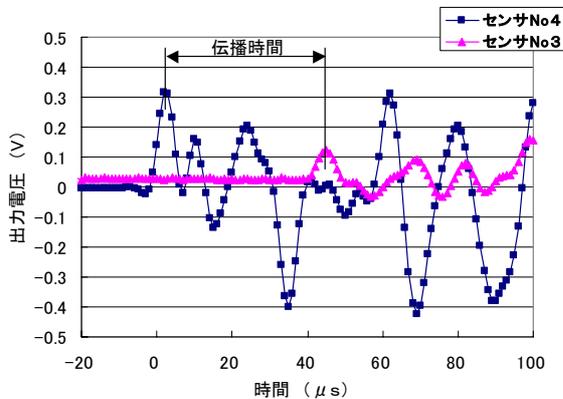


図-9 V3 区間(健全部)の弾性波波形

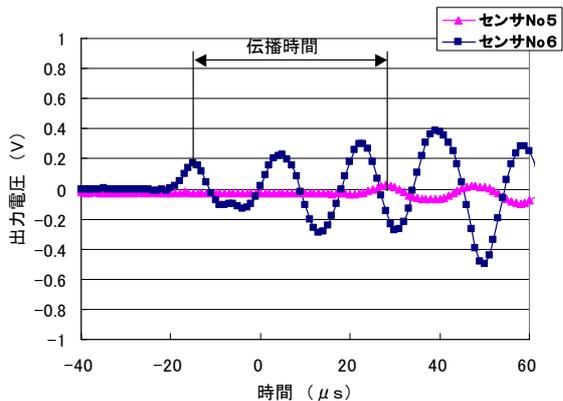


図-10 V4 区間(欠陥部)の弾性波波形

図-15 にセンサ間の距離の影響について示す。センサ No.8-7 間の 18cm, No.8-6 間の 36cm と No.8-5 間の 54cm の伝播時間は距離に比例して計測され、伝播速度は一定となりセンサ間 54cm までは測定可能であった。このことは表面部から 72cm までの距離は測定可能であることを示している。

なお、区間 V2~V6 (図-13, 14) の伝播速度は表-1 に示した健全部の長さ方向の伝播速度と比較して上部では 20~124m/s, 下部では 53~140m/s と若干遅かったが、この理由については今後の課題としたい。また、探触子への印加電圧をさらに増加させることによって弾性波のエネルギーを増加させればより長い距離を測定できるほか、探触子への印加電圧をトリガにすることで表面部近くでの非破壊検査にも利用できるものと考えられる。

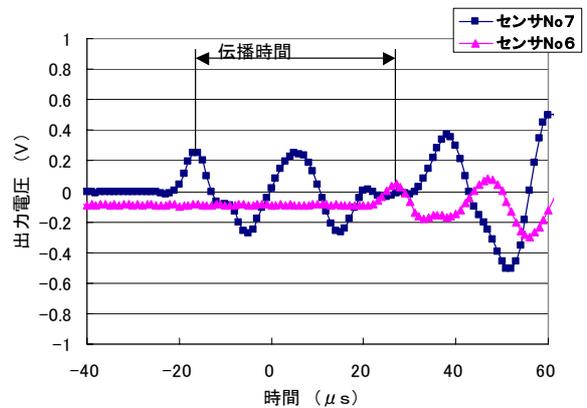


図-11 V5 区間(健全部)の弾性波波形

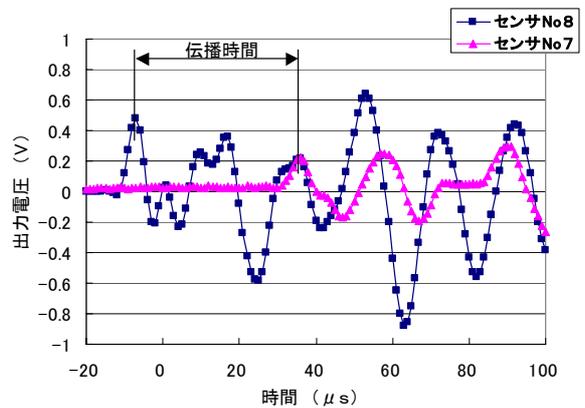


図-12 V6 区間(健全部)の弾性波波形

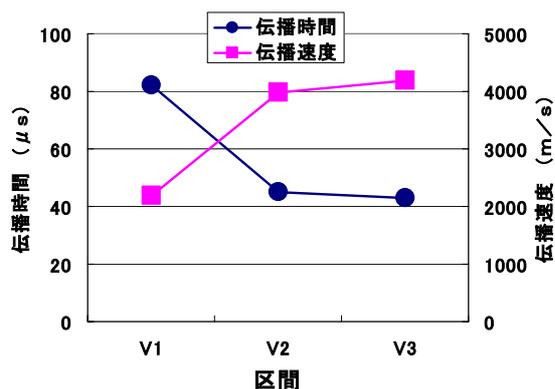


図-13 試験体上部の測定結果

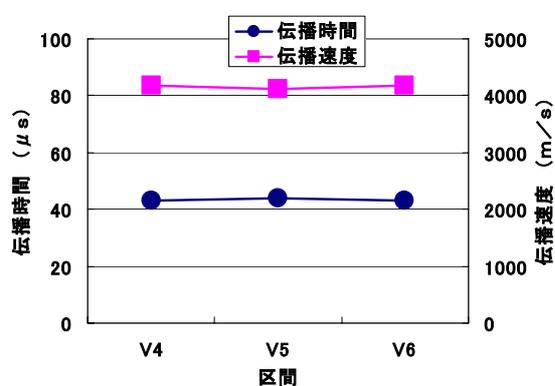


図-14 試験体下部の測定結果

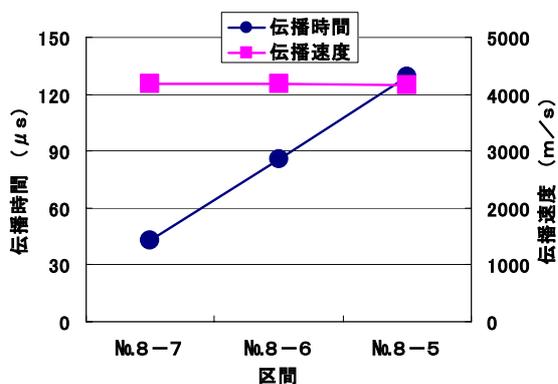


図-15 センサ間距離の影響

5. まとめ

コンクリート打設時に充填管理用として、内部に埋め込んだ充填検知センサを利用した、構造物内部の硬化コンクリートの内部欠陥検知への適用基礎実験をまとめると、以下のとおりである。

1) センサでコンクリート内を伝播する弾性波

(50kHz) を捉えることができた。

2) 表面部間で測定した伝播速度では内部欠陥の有無の判定は困難であったが、内部に埋め込んだセンサ間では欠陥部と健全の伝播速度の違いが明確であるため内部欠陥の有無の判定は容易であった。

3) 内部に埋め込んだセンサ間の伝播速度から構造体内部のコンクリート強度推定の可能性が示唆された。

今後、各種の欠陥をモデル化し、内部に埋め込んだ充填検知センサで検知可能であるかを検討してゆく。

参考文献

- 1) 大津政康：超音波でRCのひびわれ深さを評価する，セメント・コンクリート No.530, Apr, pp. 9~14, 1991
- 2) 金子稔，坂井孝，安田正雪他：振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No1, pp1527~1532, 2002
- 3) 森濱和正，山口順一郎，山口達夫他：超音波法を用いたコンクリート内部の音速分布測定による圧縮強度推定方法の提案，コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 4) 安田正雪，高橋宏治，金子稔他：振動を利用したコンクリートの打込み・締固め検知システムの開発（その2．コンクリートの密実性と振動加速度の計測に及ぼす影響），日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.613~614, 2004.8