

超音波法によるコンクリート構造物の内部欠陥調査方法 に関する研究 (その1)

Study on Detail Inspection of Internal Defect in Concrete Structures Using Ultrasonic Pulse

村瀬 豊*・魚本 健人**

Yutaka MURASE and Taketo UOMOTO

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の劣化問題やコンクリートの剥落事故等が顕在化し、コンクリート構造物の維持管理の必要性が高くなってきていることは周知のことである。土木学会「コンクリート標準示方書(維持管理編)」では、構造物の『要求性能』を安全性能、使用性能、第三者影響度に関する性能、美観・景観、耐久性能としており、その要求水準が供用範囲内に維持するようにすることを原理としている。コンクリート構造物の維持管理は初期点検、劣化予測、点検、評価および判定、対策、記録を合理的に組み合わせて行われなければならない。構造物の設計、施工、供用期間の全てを含めた維持管理をしなければならない。現在のコンクリート構造物の日常点検では打音検査や目視検査等による簡易的な手法が行われているが、これらの手法によって得られる情報はコンクリート表面から表層部までの情報となってくる。しかしながらPC構造物のシース管内部グラウト未充填やトンネルの覆工コンクリートの背面空洞に代表される内部欠陥の調査方法としては、打音検査や目視検査等は不十分である。コンクリート構造物の変状で代表的であるひび割れは、乾燥収縮のような竣工直後からのひび割れや鉄筋腐食に伴う経年劣化であるひび割れのように時間の影響が大きい。前述した内部欠陥の主要原因は施工不良が多く、その情報は竣工直後に点検できる可能性がある。そのため竣工直後において内部欠陥を検知できた場合、補修・補強等の対策を講じることができれば、構造物の陥没や崩壊のような大事故を避けられる可能性がある。そのためコンクリート中に存在する内部欠陥を、コンクリートを破壊せず調査・診断できる非破壊検査手法に注目が集まっている。そこで本研究では非破壊検査手法である超音波法を用いて、コンクリート内部欠陥形状の再現を目的として測定を行い、超音波伝播解析を行い内部欠陥深さの測定精度の検証を行った。

2. 実験概要

2.1 超音波測定装置

測定は発振・受振探触子と超音波測定機とパソコンを組み合わせて行った。探触子の振動子はニオブ酸鉛系の直径40mmで共振周波数100kHzのものを使用した。本測定器は骨材からの散乱波を極力除去するために、発振探触子からのパルス信号を平均化処理し検出対象物からの反射波データを明確に求めることができるという特徴を有している。

2.2 実験方法

測定は内部空洞を模擬した無筋コンクリートを作成し測定を行った。供試体の形状・寸法を図1に測定供試体の概観を示す。表1に供試体の配合を示す。模擬した空洞はコンクリート打設時に所定位置に発泡スチロールを設置し材齢7日の脱型時に発泡スチロールを除去し作成した。今回測定した空洞は測定面に対して平行である平面モデルである。コンクリートの内部空洞を診断する場合コンクリートの超音波伝播速度が必要であるが、本研究では同一表面に探触子を設置する表面法により超音波伝播時間を測定し超音波伝播速度を得ることとした。またコンクリートの内部欠陥の測定は、供試体表面にXY座標を定め、探触子間距離を60mmとし、10mm間隔に探触子を移動させ測定を行った。なおここでの探触子間距離とは発振・受振探触子

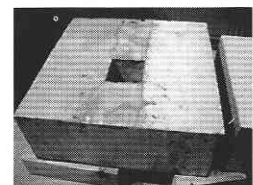
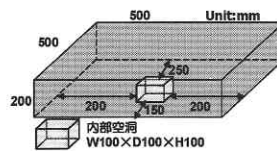


図1 供試体モデル概要

表1 供試体コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	45	160	291	832	1040

*芝浦工業大学

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

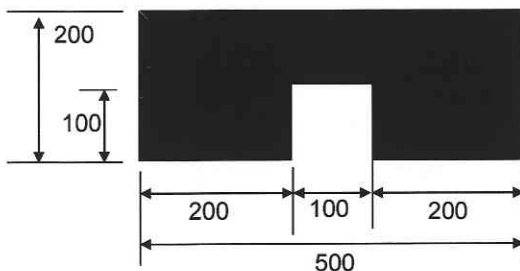


図2 解析モデルの形状および寸法

の中心間距離のこととする。探触子の操作は供試体表面を紙やすり等で平滑に処理したあと、グリセリン系の接触媒質を用いて探触子を供試体表面に密着させ測定を行った。また超音波伝播解析を用いて実験結果の検証のためを行った。図2に超音波伝播解析で用いた解析モデルを示す。解析に用いたモデルは本測定の供試体と同一の形状・寸法の供試体をモデル化し、発・受振子の寸法は本測定と同じ寸法の 40 mm とした。なおモデルの超音波伝播速度は 4592 m/sec としており骨材の影響は考慮しておらず、解析ソフトの都合上二次元モデルで検討を行ったことを前述しておく。

3. 実験結果および考察

3.1 表面法による超音波伝播速度の測定

図3に実験による探触子間距離と初動波到達時間の関係、図4に探触子間距離と超音波伝播速度の関係を示す。探触子間距離と初動波到達時間はほぼ直線関係を示しているが、探触子間距離と超音波伝播速度の関係は直線関係を示していないことがわかる。探触子を同一表面に設置する表面法による超音波伝播速度の測定では、探触子間距離が 60 mm の場合では約 9500 m/sec となり、探触子間距離が 300 mm 以上では約 4900 m/sec 程度に収束する結果となった。これに対して平田ら¹⁾は、超音波は探触子の中心部が超音波の発振・受振点ではないと指摘しており、中心探触子間距離よりも若干短い地点に発振・受振点があるとして探触子間距離の補正距離の計算方法を提案している。また日本建材産業協会規格『探触子間距離の補正及び探触子間距離の評価法』²⁾では、探触子間距離と初動波到達時間の回帰直線式の値より、探触子間の補正距離を求める補正法を提案している。しかしながら今回の測定では平田らが用いた最小二乗近似法を用いて補正距離を求める計算手法¹⁾を使用した。その結果を図4中に示す。探触子間距離を探触子の中心部で計算した場合、探触子間距離の変化に伴い超音波伝播速度は大きく変化した。最小二乗近似法を用いた補正距離の算定を行った結果、超音波伝播速度は探触子間距離が変化してもほぼ 4300 m/sec 一定になった。このことより表面法で超音波伝播速度を測定する場合、探触子間距離を変化させ超音波伝播速度を測定し最小二乗近似法

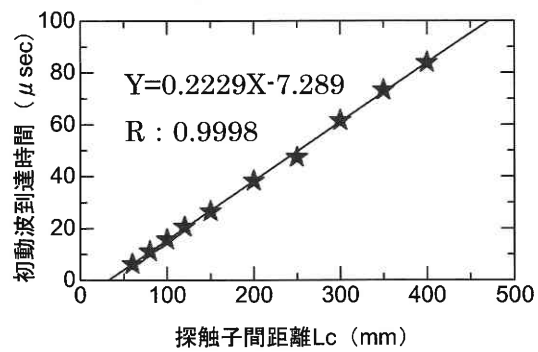


図3 探触子間距離と初動波到達時間の関係

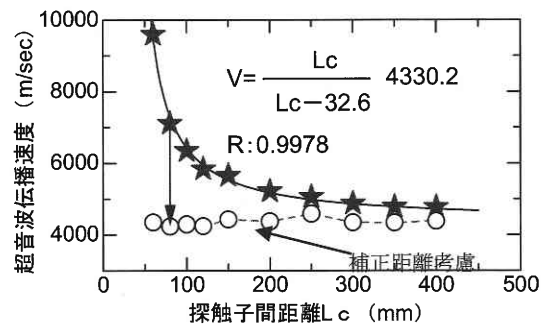


図4 探触子間距離と超音波伝播速度の関係

を用いて真の超音波伝播速度を求めれば良いことになる。

図5に解析から求まる探触子間距離と初動波到達時間の関係、図6に解析から求まる探触子間距離と超音波伝播速度の関係を示す。解析結果も先ほどの実験結果と同様の傾向となり、探触子間距離と初動波到達時間は直線関係を示すが、探触子間距離と超音波伝播速度は直線関係を示さない結果となった。しかしながら探触子間距離の補正を行うことにより、探触子間距離が変化しても超音波伝播速度がほぼ一定になったことにより、表面法でも比較的精度良く超音波伝播速度を測定できることを示している。

図7に先ほどの探触子間距離の補正距離を考慮したコンクリート厚・内部欠陥深さの算定方法³⁾を示す。

3.2 表面法によるコンクリート厚の測定方法

図8にコンクリート厚 200 mm の箇所の受振波形と内部欠陥深さ 100 mm の箇所の受振波形を示す。200 mm の箇所での受振波形の最大振幅値の超音波伝播時間は 106.7 μsec となり、100 mm の箇所での最大振幅値の超音波伝播時間は 60.8 μsec となった。図7に示す表面法によるコンクリート厚の測定方法では、超音波伝播速度と補正距離は 3.1 項で求めた値を代入すればよいが、超音波伝播時間が問題となってくる。初動波到達時間を求める場合は、受振波形がノイズ域を超えた時点が初動波到達時間とすればよいが、超音波の受振波形から最初に受振子に到達する直接波と底面ないし空洞部から反射する反射波を分別することは不可能である。その理由として骨材や練混ぜ時に混

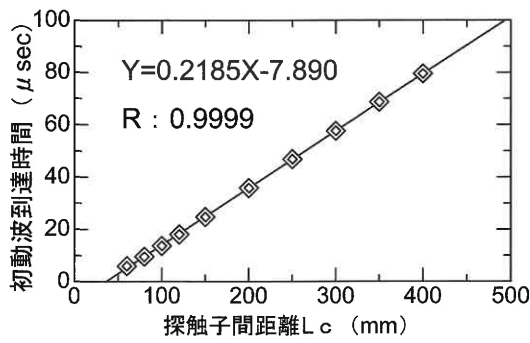


図5 探触子間距離と初動波到達時間の関係

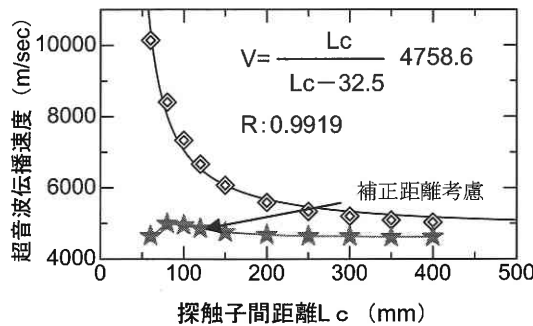


図6 探触子間距離と超音波伝播速度の関係

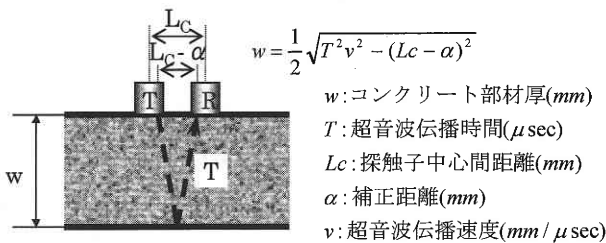


図7 コンクリート厚・内部欠陥深さの算定方法³⁾

入されてしまった気泡からの反射波が、底面ないし空洞面からの反射波の立ち上がり時間を不明瞭にしているためである。よって今回の測定では、コンクリートと底面ないし空洞部である空気層との音響インピーダンスの差の特徴より、受振子波形の最大振幅値に注目した。この音響インピーダンスは『媒質の密度×音速』で計算することができ、その音響インピーダンスの差が大きい媒質ほど反射率が高くなる。コンクリートと空気層の音響インピーダンスの差より、コンクリート層から空気層の表面に到達した超音波はほぼ100%反射されることになる。さらに反射波の到達時間は受振子波形のピーク時間より前にあると考え計算を行った。今回最大振幅時間からある時間を差し引くことにより反射波は到達時間を求めることとし、そのある時間を今回は補正時間として計算を行った。その計算結果を図9に示す。補正時間が大きくなるほど内部欠陥深さが小さくなる結果になった。また補正時間が14.5 μsecのとき200 mmの箇所のコンクリート厚が199.2 mm、100 mmの箇所の内

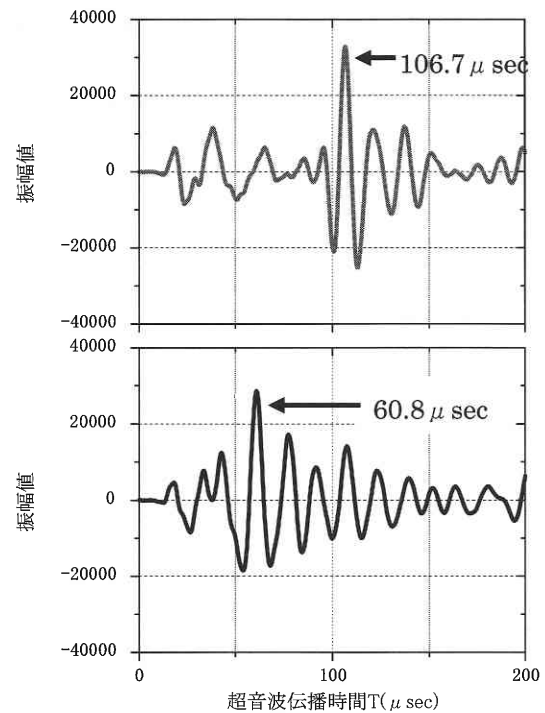


図8 測定深さの違いによる受振波形の違い (上図: 200 mm 下図: 100 mm)

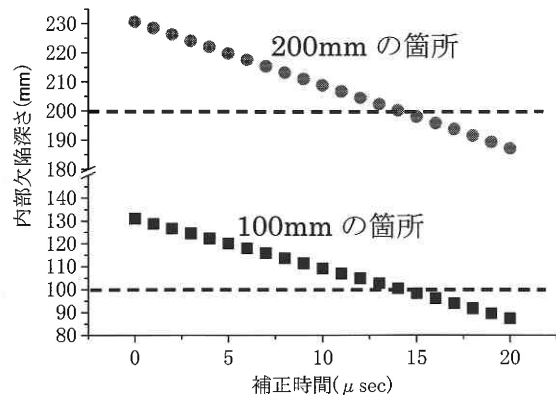


図9 補正時間の違いが内部欠陥深さ測定に与える影響 (実験結果)

部欠陥深さが99.4 mmとなり、実際との深さとの測定誤差が-1 mm以内となった。

図10にコンクリート厚200 mmの箇所での解析による受振波形と内部欠陥深さ100 mmの箇所での解析による受振波形を示す。解析によるコンクリート厚200 mmの箇所での最大振幅値の超音波伝播時間は90.0 μsec、内部欠陥深さ100 mmの箇所では47.1 μsecとなった。図11に先ほどと同様に最大振幅値の超音波伝播時間から補正時間を考慮した場合のコンクリート厚・内部欠陥深さの計算結果を示す。実験結果と同様に補正時間が大きくなると内部欠陥深さが小さくなる結果となった。実験値では補正時間14.5 μsecのときに一番測定誤差が小さくなったが、今回

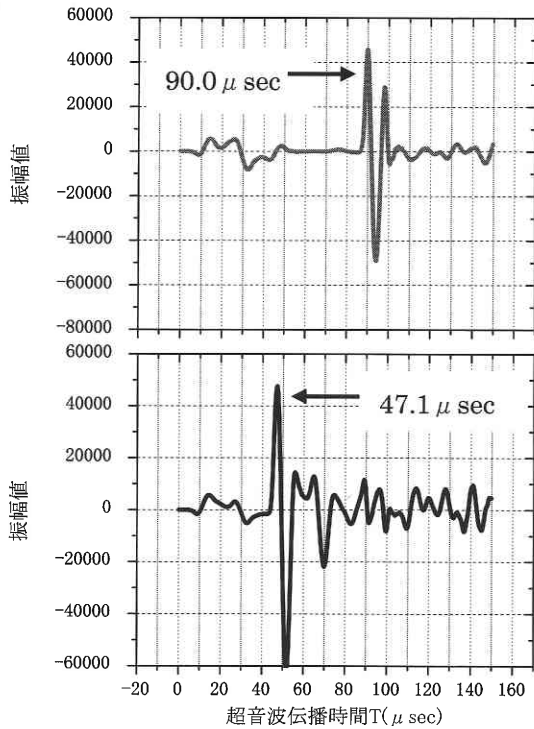


図 10 測定深さの違いによる受振波形の違い
(上図：200 mm 下図：100 mm)

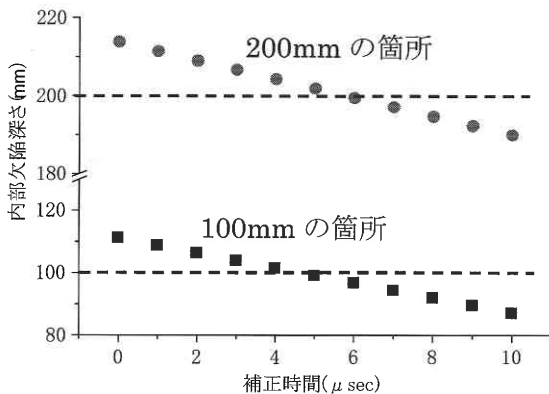


図 11 補正時間の違いが内部欠陥深さ測定に与える影響
(解析結果)

の解析結果では補正時間 $5 \mu\text{sec}$ のときに 200 mm のコンクリート厚が 201.9 mm, 100 mm の箇所の内部欠陥深さが 99.2 mm となり測定誤差が $\pm 2 \text{ mm}$ となった。この実験結果と解析結果の補正時間の違いは、図 4, 図 6 に示す超音波伝播速度の違いや骨材等による乱反射によるものだと考えられる。しかしながら実験結果, 解析結果から直接反射波の立ち上がり時間を求めることは不可能だと考えられたが, 受振波形の最大振幅値に着目し, その時間を補正することによりコンクリート厚・内部欠陥深さを計算することができた。

4. ま と め

- (1) 同一表面に探触子を設置する表面法における超音波伝播速度の測定では, 探触子間距離が変化すると超音波伝播速度の測定結果は変化し, 探触子間距離が小さいほど超音波伝播速度は速くなる。しかし探触子間距離が大きくなると超音波伝播速度は一定値に収束する傾向を示し, その傾向は超音波伝播解析の結果より確認できた。
- (2) 表面法により超音波伝播速度を算出する場合, 探触子間距離を変化させ超音波伝播時間を測定し最小二乗近似法を用いて探触子間距離の補正を行うことにより, 探触子間距離が変化してもほぼ一定の超音波伝播速度に補正することが可能となった。またその検証として超音波伝播解析を行った結果, 超音波伝播速度の設定の違いはあるものの, 同様な傾向を示すことより, この最小二乗近似法を行うことで表面法により比較的精度良く超音波伝播速度を算定できることを確認できた。
- (3) コンクリート厚・内部欠陥深さを算定する場合, 受振波形から受振子に最初に到達する直接波とコンクリート底面ないし内部欠陥からの反射波を分別することは不可能であるため, 今回受振波形中の最大振幅値の時間に着目した。受振波形中の最大振幅値の時間は, コンクリート底面ないし内部空洞からの反射波であるが, その立ち上がり時間はノイズを含んでいるため, 初動波のように明確な立ち上がり時間を得ることができない。よって最大振幅値の時間を補正することによりコンクリート厚ないし内部欠陥深さを算定する手法を提案した。この手法の検討して超音波伝播解析を行った結果, $\pm 2 \text{ mm}$ 以内の測定精度となったことより, この測定手法の適用性が確認できた。

謝 辞

本研究は東京大学生産技術研究所魚本研究室で行ったものであり, 同研究室の皆様にご協力いただいたことに感謝の意を表します。また千葉工業大学卒論生加藤貴春氏には供試体作成から測定までご協力いただいたことに感謝の意を表します。

(2004年1月26日受理)

参 考 文 献

- 1) 平田隆祥, 魚本健人: 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定における探触子の影響, 第 54 回セメント技術大会講演要旨, pp.160-161, 2000
- 2) 日本建材産業協会規格: 探触子間距離の補正及び探触子間距離の評価法, 2003
- 3) 平田隆祥, 魚本健人: 超音波法によるコンクリート内部の空隙形状の探査精度, 土木学会第 56 回年次学術講演会, V-386, 2001