

# 衝撃弾性波法による実構造物での弾性波速度の測定方法について

岩野 聡史\*1・森濱 和正\*2

## 1. はじめに

衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の非破壊試験項目に、圧縮強度の推定、部材厚さの推定、内部欠陥探査、ひび割れ深さの推定などがあり、これらの試験では、コンクリートの弾性波速度を利用して測定値を得る。しかし、弾性波速度はコンクリートの弾性係数や密度などによって変化する性質があることから、これらの非破壊試験で精度の良い結果を得るには、試験対象の構造物毎に弾性波速度を正確に測定することが前提条件となる。実構造物における弾性波速度の測定では、特に鉄筋による影響と、コンクリート表面での速度低下による影響が考えられる。そこで、過去の供試体や実構造物での実験結果から、これらの影響を除去する弾性波速度の測定方法を検討したので、その結果を報告する。

## 2. 弾性波速度の測定方法について

参考文献1)の規格に示される衝撃弾性波法による弾性波速度の測定方法を図-1、表-1に示す。伝搬時間差法と多重反射法が規格化され、伝搬時間差法には同一面配置と対面配置の2法がある。伝搬時間差法(対面配置)と多重反射法では、コンクリートの厚さが既知であることが適用条件となり、さらに、多重反射法では、弾性波が入力面と反対面で多重反射することにより生成される周波数を測定することから、コンクリートは版形状であることなどが適用条件となる。これらの適用条件などから、伝搬時間差法(対面配置)と多重反射法は、弾性波速度そのもので測定点を評価するのではなく、複数点で測定された弾性波速度(伝搬時間差、往復時間)を比較して、測定点の直下に欠陥が存在するのかが確認する方法として主に適用されていると考えられる。これらに対して、伝搬時間差法(同一面配置)は厚さが分からないコンクリートでも測定値として弾性波速度が得られることから、コンクリートの厚さ測定や圧縮強度推定など、弾性波速度そのものが評価値として必要な試験で適用されている。参考文献2)では、コンクリートの厚さ測定のための弾性波速度の測定方法として、伝搬時間差法(同一面配置)のみが規格化されている。以上の状況から、本書では、伝搬時間差法(同一面配置)での検討結果について示す。

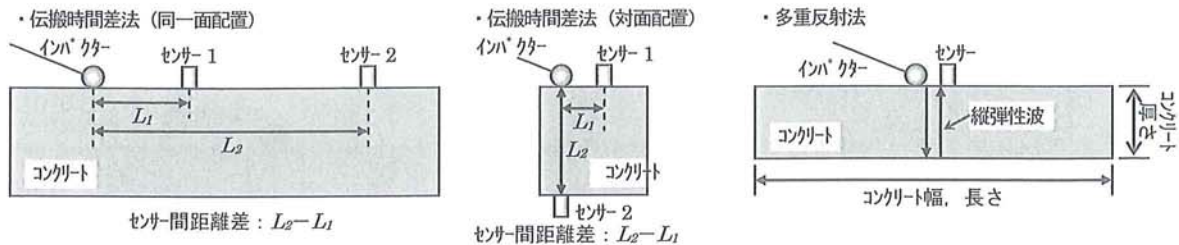


図-1 弾性波速度の測定方法

表-1 各弾性波速度の測定方法の比較

| 測定方法   | 伝搬時間差法(同一面配置) | 伝搬時間差法(対面配置) | 多重反射法                             |
|--------|---------------|--------------|-----------------------------------|
| 主な用途   | 厚さ測定, 圧縮強度推定  | 内部欠陥探査       | 内部欠陥探査                            |
| 主な適用条件 | ・センサー間の距離が既知  | ・センサー間の距離が既知 | ・コンクリートの厚さが既知<br>・厚さに対して幅、長さが6倍以上 |

\*1 リック(株)技術研究所技術開発グループ 所長代理 (正会員)

\*2 (独)土木研究所 材料資源研究グループ 主任研究員 (正会員)

### 3. 鉄筋による影響の確認実験

#### 3. 1 実験概要

鉄筋中を伝搬する弾性波の速度は、コンクリート中を伝搬する弾性波の速度よりも速い。これから、鉄筋コンクリートでは測定方法によっては、鉄筋の影響により正確なコンクリートの弾性波速度を測定できない可能性が考えられる。そこで、鉄筋を含むコンクリート供試体で様々な条件で弾性波の伝搬時間差を測定し、鉄筋コンクリートでの弾性波の伝搬経路や弾性波速度の測定における鉄筋の影響について検討した。

#### 3. 2 測定状況

実験状況を図-2に示す。厚さ300mmの供試体中に $\phi 51\text{mm}$ の異形鉄筋が深さ51.6mmに配置してある。表面に2個のセンサーch1, ch2を200mm間隔で設置し、直径10mmの鋼球で打撃して、ch1, ch2に最初に到達する振動の伝搬時間差を測定した。打撃点に近い方のセンサーがch1である。測定①では打撃点はch1とch2の一直線上でch1から300mmの点とした。打撃点, ch1, ch2からなる測定線を鉄筋と平行にし、鉄筋からの平面距離を0mm~250mmまで移動させた。実験②では測定線と鉄筋との角度を90度まで回転させた。実験③では、測定線を鉄筋上に設置し、打撃点をch1から100mm~500mmと移動させた。

#### 3. 3 測定結果および考察

各条件での伝搬時間差の測定結果を図-3~図-5に示す。ch1とch2は200mm間隔であり、伝搬時間差 $50\mu\text{s}$ での弾性波速度は $4000\text{m/s}$ 、伝搬時間差 $40\mu\text{s}$ での弾性波速度は $5000\text{m/s}$ となる。つまり、伝搬時間差が $40\mu\text{s}$ 程度となる場合には、鉄筋を伝搬する弾性波による時間差が測定された結果である。測定結果より、鉄筋を伝搬する弾性波による時間差が測定される条件は、1)鉄筋と測定線の距離が近い、2)鉄筋と測定線との角度が小さい、3)打撃点とセンサーの距離が遠い、これら3つの条件が重なった場合であることが分かる。

鉄筋を含むコンクリートで想定される、スネルの法則に基づく、弾性波の伝搬モードを図-6に示す<sup>3)</sup>。コンクリート表面の打撃により発生する弾性波は内部を球面状に伝搬し、表面を伝搬する成分である表面弾性波 $W_p$ と、コンクリート内部に伝搬して鉄筋を経由して再びコンクリート表面に到達する弾性波 $W_s$ が存在する。 $W_p$ のセンサーへの伝搬時間 $T_p$ は式(1)となる。

$$T_p = L_{ch} / V_{PC} \quad (1)$$

ここで、 $L_{ch}$ は打撃点からセンサーまでの距離、 $V_{PC}$ はコンクリートの弾性波速度である。一方、 $W_s$ はスネルの法則に基づき、コンクリートから鉄筋へ入射し、鉄筋を経由して、再びコンクリートへ戻る経路となる

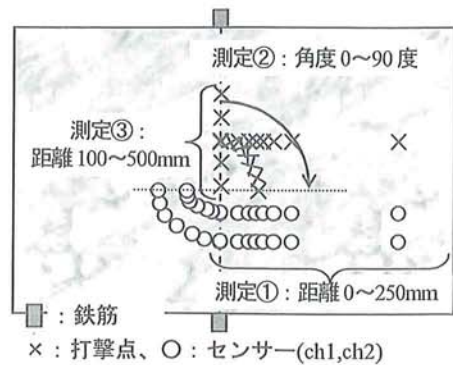


図-2 鉄筋による影響の確認実験状況

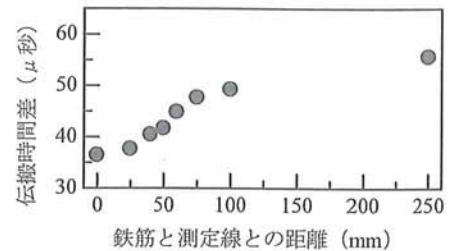


図-3 鉄筋と測定線との距離による比較

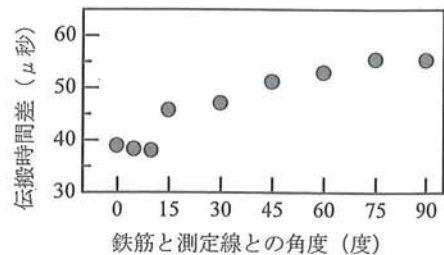


図-4 鉄筋と測定線との角度による比較

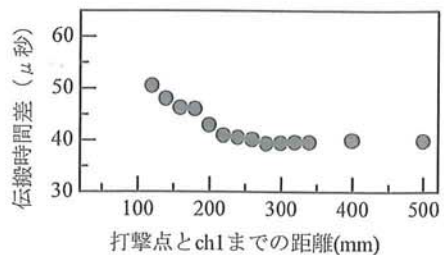


図-5 打撃点とch1までの距離による比較

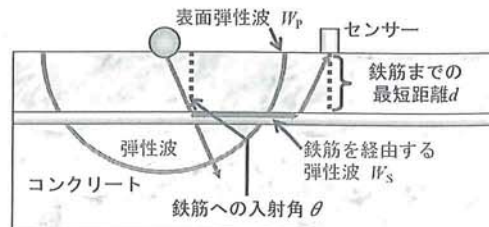


図-6 弾性波の伝搬状況の模式図

ので、センサーへの伝搬時間  $T_s$  は式(2)となる。

$$T_s = 2d / (V_{PC} \cdot \cos \theta) + (L_{ch} - 2d \cdot \tan \theta) / V_{PS} \quad \text{ただし, } (\theta = \sin^{-1}(V_{PC} / V_{PS})) \quad (2)$$

ここで、 $d$  は打撃点・受信点から鉄筋までの最短距離、 $V_{PC}$  はコンクリートの弾性波速度、 $V_{PS}$  は鉄筋中の弾性波速度、 $L_{ch}$  は打撃点からセンサーまでの距離である。式(1)、式(2)より、鉄筋を経由する弾性波  $W_s$  がコンクリート表面を伝搬する弾性波  $W_p$  より先にセンサーへ到達する条件は式(3)を満たすときとなす。

$$L_{ch} > 2d \sqrt{V_{PS}^2 - V_{PC}^2} / (V_{PS} - V_{PC}) \quad (3)$$

式(3)では、鉄筋を経由する弾性波による時間差が測定される条件は、打撃点とセンサーまでの距離  $L_{ch}$  が遠方であり、鉄筋までの最短距離  $d$  が短いことである。これらは、図-3～図-5での鉄筋を伝搬する弾性波による時間差が測定される条件と一致する結果である。これから、図-2のような鉄筋コンクリート構造物では、弾性波はスネルの法則に基づき伝搬していると考えられ、スネルの法則を理解すれば、鉄筋による影響を除去できると考えられる。

#### 4. コンクリート表面と内部の速度差による影響の確認

##### 4. 1 実験概要および測定方法

コンクリート中を伝搬する弾性波の速度は、コンクリートの弾性係数や密度によって変化することとなる。これから、コンクリート内部よりも品質の劣るコンクリートの表面では弾性波速度が低下することが考えられ、超音波法では、内部と表面の速度差に留意した測定方法が提案されている<sup>4)</sup>。そこで、衝撃弾性波法での弾性波速度の測定における、コンクリート表面と内部の速度差による影響を確認するため、表-2に示す配合、材齢が異なるコンクリートにより測定をした。

弾性波速度の測定状況の例を図-7に示す。センサー付きのインパクトによりコンクリート表面を打撃して入力波形を記録し、受信点に到達した弾性波の伝搬時間差を測定した。入力点と受信点の距離差は200mmから100mm間隔で1000mmまでの計9点である。

##### 4. 2 測定結果

各測定対象物での各入力点と受信点の距離における測定上の弾性波速度の測定結果を図-8に示す。ここで、測定上の弾性波速度とは、入力点と受信点の距離を測定された伝搬時間差で除して計算した速度である。図-8より、材齢8年が経過した呼び強度18の厚壁では、入力点と受信点の距離により測定上の弾性波速度が変化し、入力点と受信点の距離が400mm以下では弾性波速度は3200m/s程度と遅く、入力点と受信点の距離が500mm以上になると弾性波速度は3500m/s程度と速くなっている。

この状況での弾性波の伝搬状況は3章と同様にスネルの法則に基づき、図-9の模式図で示される。入力点と受信点の距離が近距離の場合では、受信点に最初に到達する振動は表面を伝搬した弾性波となる。これに対して、入力点と受信点の距離が長くなると、伝搬速度の速い内部を経由した弾性波が、表面を伝搬した弾性波を追い抜いて、受信点に最初に到達する振動となる。

また、表面を伝搬する弾性波の速度  $V_{PS}$  は、この弾性波の伝搬時間差  $T_p$  が測定される  $L$  の範囲 (図-8の厚壁では  $L =$

表-2 測定対象物

| 名称   | 配合 | 材齢        |     |
|------|----|-----------|-----|
| 供試体  | 厚壁 | 18-8-20N  | 約8年 |
|      | 薄壁 | 45-12-20N |     |
| 実構造物 | A  | 24-8-25BB | 12日 |



図-7 弾性波速度の測定状況

200mm~400mm) で、式(4)により算出した各弾性波速度  $V_{PS}$  の平均値から判断できる。次に、コンクリート内部の弾性波の速度  $V_{PI}$  は、内部を経由した弾性波の伝搬時間差  $T_p$  が測定される  $L$  の範囲 (図-8 の厚壁では  $L=500\text{mm}\sim 1000\text{mm}$ ) で、各  $L$  と  $T_p$  の式(5)に示す関係式を最小二乗法により求め、 $a$  の逆数から判断できる。さらに、内部を経由した弾性波の伝搬深さは、式(4)の速度  $V_{PS}$ 、式(5)の速度  $V_{PI}$ 、および、内部を経由した弾性波の伝搬時間差が測定される最小の  $L$  を  $L_0$  (図-8 の厚壁では  $L_0=500\text{mm}$ ) とし、式(6)により深さ  $D_E$  を算出して求められる。

$$V_{PS} = L/T_p \quad (4)$$

$$T_p = a \times L + b \quad (5)$$

$$D_E = L_0 \sqrt{V_{PI}^2 - V_{PS}^2} / 2(V_{PI} + V_{PS}) \quad (6)$$

ここで、 $a$ 、 $b$  は定数である。以上より、何らかの原因により表面の速度が低下したコンクリートであっても、入力点と受信点の距離を多点設定して、測定される弾性波の伝搬時間差を比較すれば、コンクリート内部の弾性波の速度を測定することが可能となる。

## 5. まとめ

衝撃弾性波法による弾性波速度の測定方法について、鉄筋やコンクリート表面の速度が低下した場合での影響を確認した。その結果、弾性波はスネルの法則に基づき伝搬し、①鉄筋コンクリートでは、1)鉄筋と測定線の距離が近い、2)鉄筋と測定線の角度が小さい、3)打撃点とセンサーの距離が遠い、これら3つの条件が重なった場合に鉄筋の影響を受けること。②何らかの原因により表面の速度が低下したコンクリートであっても、入力点と受信点の距離を多点設定して、測定される弾性波の伝搬時間差を比較すれば、コンクリート内部の弾性波の速度を測定できること。①、②が確認された。これらの結果と、実構造物では縦横の両方向に多くの配筋がされていることを勘案すれば、鉄筋に対して斜めに測定線を設定し、入力点と受信点の距離を多点設定して測定することにより、鉄筋や表面の速度低下の影響を除去して弾性波速度を測定できると考えられる。

## 参考文献

- 1) NDIS 2426-2 : コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第2部 : 衝撃弾性波法, 2009.12
- 2) ASTM-C1383-04: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, 2004.
- 3) 田治米鏡二 : 弾性波による地盤調査法, 槇書店, 1977
- 4) 独立行政法人土木研究所, 社団法人日本非破壊検査協会 : 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル, pp.121-131, 大成出版社, 2010.8

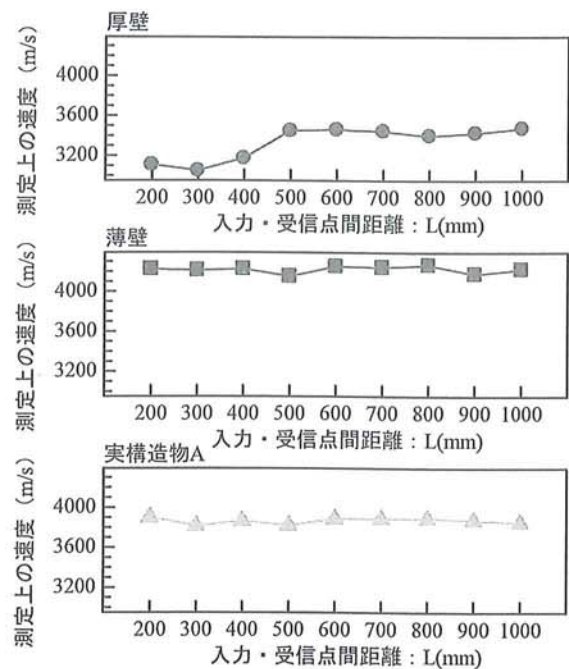


図-8 弾性波の伝搬状況の模式図

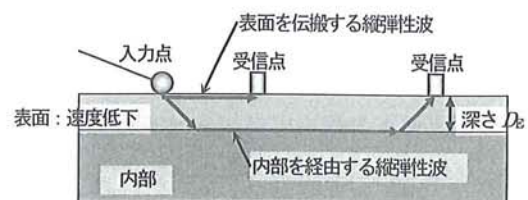


図-9 表面の速度が低下したコンクリートでの縦弾性波の伝搬状況模式図