

コンクリートの縦弾性波速度の測定方法に関する実験的検討

EXPERIMENTAL EXAMINATION ON THE MEASURING METHOD OF SURFACE P-WAVE SPEED

(株)東洋計測リサーチ 山下 健太郎
アプライトリサーチ(株) 境 友昭
iTECS 技術協会 極壇 邦夫

コンクリート構造物表面を伝搬する弾性波速度の測定方法について、より精密な供試体実験を通して実験的検討を行い、測定方法の適用限界について論じる。さらに、マイクロホンを非接触型センサーとして使用することによって、測定上の問題点を回避する方法を試みたので、あわせて報告する。

キーワード：衝撃弾性波、表面縦弾性波、弾性波速度、マイクロホン

1. はじめに

コンクリート構造物の表面で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定しようとする試みがある¹⁾。また、得られたデータは、当該構造物の品質管理や供用後の維持管理における有効な情報の一つとなることが期待されている。特に衝撃弾性波法は測定の簡便さと、骨材や鉄筋の影響を受けにくいという利点を持ち、将来的に、より広い範囲で適用される可能性が高い。

一方で、波形の読み取りの難しさや、測定法が複数あり、それぞれの測定値が異なるといった問題が考えられる。本研究は測定法・計測システムの違いが弾性波速度の測定に及ぼす影響を検証し、より簡便で精度の高い弾性波速度の測定手法の確立を目指そうとするものである。

2. 表面での弾性波速度の測定

コンクリート表面での弾性波速度の測定には、2つのセンサーを用いる。波動の入力は測定ラインの延長上の任意の箇所を鋼球若しくはハンマによって打撃することを基本としている。弾性波速度は、測定された波形(図1右)からそれぞれのセンサーに初期波動(P波)が到達する時間差を読み取り、次いで、測定点間の距離Lを到達時間差で除して求める。現在、①センサーをコンクリート表面に対し鉛直に設置し、センサー間の距離を200mm~1000mm程度に移動しながら測定する手法²⁾と、②センサーを一定の距離を持つ2つの導波体に取付け、測定面に対して水平な向きに設置して測定を行う手法³⁾がある。また、①の手法では1ch側センサーの代わりに加速度計内蔵のハンマを用いる方法もある。

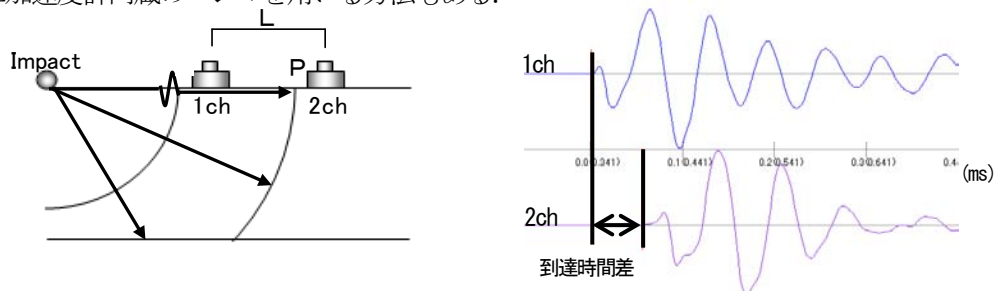


図1 表面での弾性波速度測定方法

3. 実験の概要

著者らはこれまで、理想的な弾性体とみなし得るMCナイロン板(幅60mm、高さ600mm、長さ1200mm)を用いて、①インパクトの先端形状や質量の違い②センサーとして使用する加速度計の質量の違い、③加速度計の感度軸の向きの違い、などが弾性波速度の測定結果に及ぼす影響を検討し⁴⁾、導波体を用いる測定では、

入力及び導波体の周波数特性によっては、正しい値が得られない可能性があること、センサを測定面に鉛直に接触させる方法ではセンサの質量が慣性抵抗として作用することから、測定結果に影響を及ぼす可能性があることを指摘している。

本実験では、前述の MC ナイロン板を用いて、①非接触型センサ（マイクロホン）の使用によって、前述の問題点を回避する方法を試みた。また、②センサ間の距離を固定して測定する方法と、センサ間の距離を変えながら多数点で測定する方法について、統計的な検討を行った。

測定装置は iTECS-6（アプライト・リサーチ社製）を用いた。使用した供試体と測定状況を写真 1 に示す。

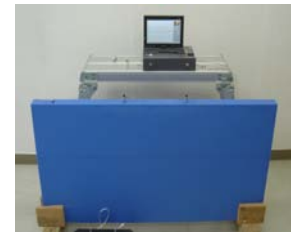


写真 1 測定状況

4. 実験方法及び結果

4.1 非接触型センサ（マイクロホン）を用いた測定原理

先端が球状のインパクトの打撃によって、被測定面には図 2 に示すような圧縮波が生成されて伝搬する。設置したマイクロホンの直下を波動が通過する際、被測定面近傍（図中□）の空気の粒子は、被測定面の振動によって密度変化を生じ、音圧の変化としてマイクロホンに捉えられる。

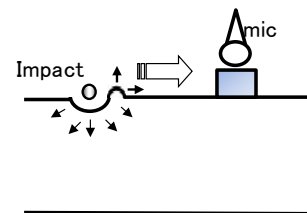


図 2 マイクロホンによる測定

ここで、被測定面近傍では空気の粒子速度と、被測定面の振動速度は同じであるので、

$$P = \rho c v \quad (1)$$

の関係が成立し、（ P : 音圧、 ρc : 空気層の音響インピーダンス、 v : 粒子速度、被測定面の振動速度）被測定面近傍の音圧の変化から通過する弾性波の速度を測定することが可能であると考えられる。

4.1.1 測定方法

測定は 2 つのマイクロホンの間隔を 300mm に固定して設置し、波動の入力には、先端が球状（ $\phi 4\text{mm}$, 14.1g）のハンマを用いた。弾性波速度は、得られた波形の立ち上りの時間差を読み取り、センサ間距離とから算出した。マイクロホンには SHURE 社製エレクトレットコンデンサマイクロホン（SM93）を用いた。マイクロホンの受圧面



写真 2 マイクロホンによる測定状況

の設置高さは被測定面から 3mm である。測定状況と使用したマイクロホンを写真 2 に示す。

また、加速度センサを用いた測定値との比較のために、圧電型加速度計 3 種類（質量 4g 感度 100mv/G、質量 14g 感度 10mv/G、質量 35g 感度 10mv/G）を用いて、それぞれ同一条件で測定を行った。

4.1.2 測定結果

マイクロホンを用いた弾性波速度の測定結果は 2162m/s であった。図 3 に測定結果を示す。測定値は 5 回測定を行った平均値である。

ここで、MC ナイロンの表面での弾性波速度の真値は不明であるが、棒状の MC ナイロンの供試体で得られた弾性波速度から、MC ナイロンの材料特性を考慮して推定した値である 2262m/s に近い結果が得られたものの、質量 4g の高感度の加速度計を用いて測定した弾性波速度よりも約 3%遅く観測された。

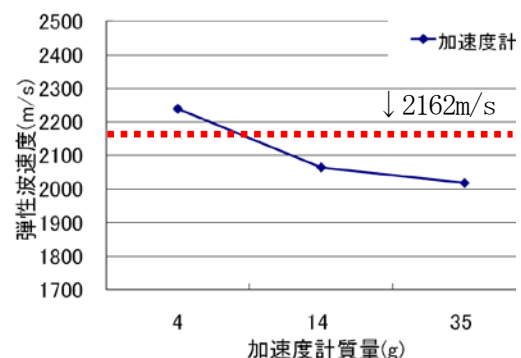


図 3 弾性波速度測定結果

4.2 センサ間距離の設定に関する統計的検討

表面での弾性波速度の測定では、センサが打撃点に近いほど、波形の立上りが明瞭で判別しやすい。一方、サンプリング時間間隔に由来する測定システムの離散化誤差は、センサ間隔が狭いほどその影響が大きくなる⁵⁾。そこで、最も効率よく、精度の高い測定値を得られるセンサ設置間隔について検討を行った。

4.2.1 データの採取

加速度センサの間隔を 100mm, 150mm, 200mm, 250mm, 300mm, 400mm, 500mm, 600mm とし、MC ナイロン供試体表面に接着して設置し、それぞれ 18 回測定した。弾性波速度はセンサ間距離と伝搬時間差から 1 回の測定ごとに算出した。他方、各センサ間距離での測定データから 1 個ずつ伝搬時間差を抽出し、測定間隔と時間差の関係を直線回帰によって近似し、その勾配から弾性波速度を得ることも 18 回行った。

9つの測定方法のグループからの測定値について、1元配置分散分析を行った。

4.2.2 検討結果

弾性波速度の測定結果を図 4 に示す。横軸には設置したセンサ間の距離を示している。センサ間距離が 300mm までは測定値のばらつきが大きく、センサ間距離が広がるにつれて、ばらつきの幅が狭くなる傾向が見られた。また、図 4 右端丸印内には、回帰式によって得た弾性波速度の算出値を示しているが、最もばらつきの少ないグループであった。9通りの方法で求めた弾性波速度の値について、1元配置分散分析を行った結果を表 1 に示す。F 値>F 境界値となることから 9つのグループの平均値には明らかに有意差があるといえる。

表 1 1元配置分散分析結果

変動要因	平方和	自由度	普遍分散	分散比 (F値)	F 境界値
群間	113596	8	14200	5.402	1.999
群内	402178	153	2628.6		
全体	515774	161			

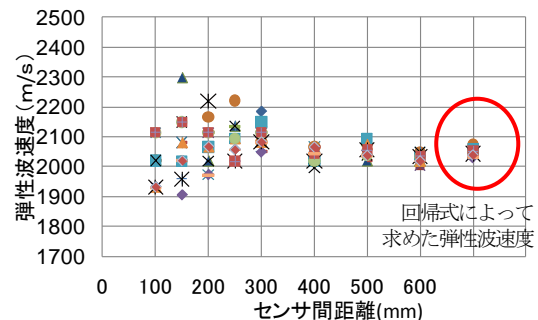


図 4 弾性波速度測定結果

5. まとめと考察

5.1 マイクロホンによる測定の課題

非接触型のセンサを用いた測定では、簡便に精度の高い測定値を得られることが期待される。本実験では、マイクロホンを使用して測定を行い、非接触型センサの弾性波速度の測定に対する一応の適用可能性が示された。

また、4g の質量をもつ高感度の加速度計を用いた測定値より遅く観測された原因について、

①マイクロホンの測定で得られた波形と 4g, 14g, 35g の加速度計で測定した波形を図 5 に並べて示すが、マイクロホンによる測定波形は速度波形(図 5 上)であり、加速度波形に比べて立ち上がりがなだらかになり、立ち上りの検知が難しくなること。

②マイクロホンは性質上、外乱の影響を排除することが難しく、波形全体にはノイズが見られ、正確な立ち上りの検知を難しくすること。

の 2 点が大きな要因と考えられる。

外乱の少ない室内での計測、等質な供試体を用いての測定、という条件下においても、波形の読み取りの難しさが認められた。

実用化にあたっては、外乱の影響の軽減方法や、判別が容易である表面波(レイリー波)の速度から縦弾性波速度を算出する方法などを模索する必要があると考える。

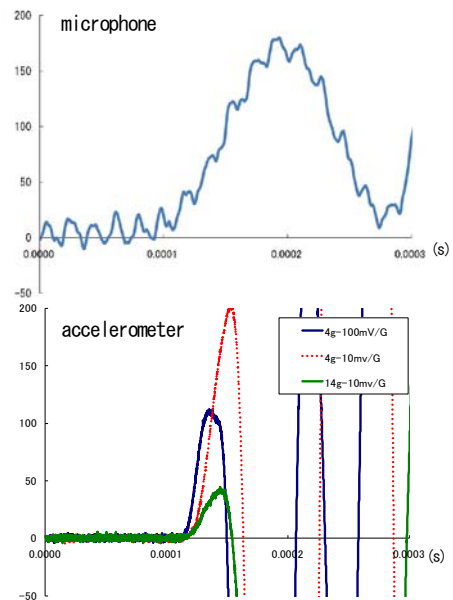


図 5 測定波形

5.2 弾性波速度の測定に適した測定条件

弾性波速度の測定結果(図4)ではセンサ間隔が300mm付近までは、測定値のばらつきが顕著であり、測定システムの離散化誤差の影響によるものである可能性が高いと推察される。

国土交通省では、非破壊試験法による圧縮強度推定に際し、推定値の誤差を±15%¹⁾と定めており、弾性波速度の測定時に許容される誤差は±2%程度である。測定値のばらつきが大きい測定方法では、多数回測定を行うことが必要となり、その分コストも増加するため、最も誤差の少ないセンサ間隔あるいは、その組み合わせで測定を行うことが効率的であると考え、必要測定回数について検討を行った。

ここで、複数個の測定データの母集団の平均値に対する95%信頼区間は

$$\bar{Y} \pm t[0.975; n-1] \sqrt{\frac{s^2}{n}} \quad (2)$$

で表わされる。(\bar{Y} : 標本平均, n : 試行回数, s^2 : 標本分散, $t[0.975; \nu]$ は、自由度 ν の t 分布の95%)

各測定グループにおいて、データの信頼区間の95%が平均値±2%の範囲内に収まるための試行回数を計算した結果を図6に示す。回帰式によって弾性波速度を求める方法では、到達時間差の抽出回数(組合せ)を増減させて試行した。センサ間距離を固定して測定する方法では、センサ間隔40cm~60cmが最も効率的であり、回帰式によって弾性波速度を求める方法では、いずれも安定してデータが得られることが分かった。ただし、回帰式による方法では、抽出したセンサ間距離毎にデータを測定(打撃)することが必要であることから、打撃回数との関係でまとめたものを図7に示す。図7からも40cm~60cmの組合せが最も効率的に測定が行うことができ、3点程度の測定点数でも安定した結果が得られることが分かった。

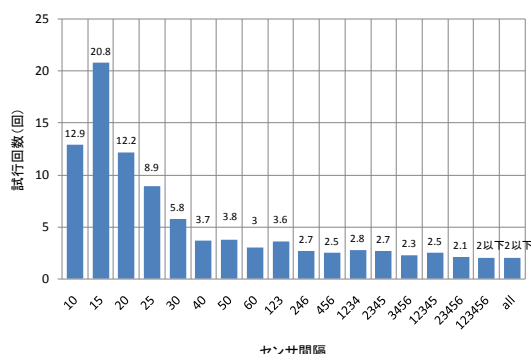


図6 誤差が±2%となる試行回数

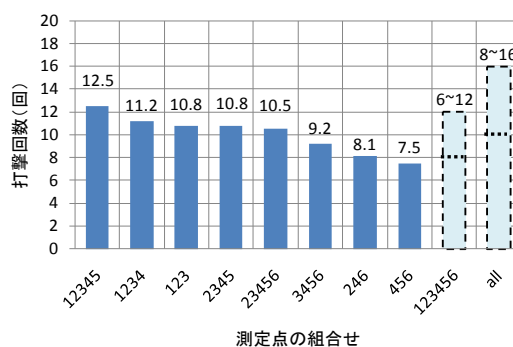


図7 測定点の組合せと必要打撃回数

※図6、図7の横軸の数値は、10~60はセンサ間の距離100mm~600mmを示し、例えば123は回帰式によって弾性波速度を求める方法で、100mm, 200mm, 300mmのデータを採用したことを意味する

[参考文献]

- 1) 国土交通省大臣官房技術調査課：微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領(案) 平成21年3月
- 2) 岩野聡史，森濱和正ら：衝撃弾性波法による新設コンクリート構造物での圧縮強度推定方法および現地測定結果について，弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集P159~P164 土木学会
- 3) 立見栄司：衝撃弾性波・表面2点法による圧縮強度推定方法の新設構造物への適用，同上講演概要集P165~P172
- 4) 山下健太郎，境友昭ら：衝撃弾性波による表面縦弾性波速度の測定に関する実験的検討，日本非破壊検査協会平成20年度秋季大会講演概要集P103-106
- 5) 境友昭，極檀邦夫ら：コンクリート構造物の表面弾性波速度の測定方法に関する検討，2) に同じ講演概要集P179~P182 土木学会