

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

Experimental examination on the measuring method of surface P-wave speed

○ (株)東洋計測サーチ 山下 健太郎 アプライドリサーチ(株) 境 友昭
Kentaro Yamashita (Toyo survey and research Inc) Tomoaki Sakai (Applied Inc.)
iTECS 技術協会 極檀 邦夫
Kunio Gokudan (iTECS Association)

衝撃弾性波法を用いた表面弾性波速度の測定方法を検討した。加速度計を測定面に接触させる方法，導波板に取り付け直接接触させない方法，インパクトの質量の大小及び形状の違い，加速度計の質量の違いなど，測定方法の違いが弾性波速度の測定結果に及ぼす影響について，等方等質の弾性体であるMCナイロン板を用いて基礎的な検証を行った。

キーワード：衝撃弾性波，表面縦弾性波，弾性波速度

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手間と，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すものである。

2. 表面での弾性波速度の測定

表面での弾性波速度の測定では，2つのセンサを用いる。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センサをコンクリート表面に対し鉛直に設置し，センサ間の距離を200mm～1000mm程度に移動しながら測定する手法²⁾と，②センサを一定の距離を持つ2つの導波板に取り付け，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。

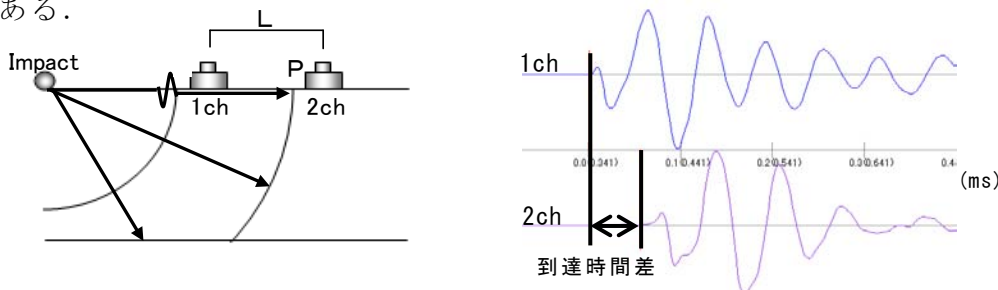


図1 表面での弾性波速度測定方法

3. 実験の概要

本研究では，理想的な弾性体と看なし得る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，が弾性波速度の測定結果に及ぼす影響を検討した。

実験は表1の組合せによって実施した。弾性波速度の測定は供試体木口部(幅60mm, 長さ1200mm)の中央付近で行った。供試体及び実験状況を写真1に示す。

測定装置はiTECS-6(アプライト株式会社製)を用い、実験ケース毎に12回計測を行い、得られた波形を平均化したものを代表波形として解析を行った。

表1 実験ケース組合せ

感度軸の向き	加速度計		インパクト		
	質量	感度	形状	径	質量
鉛直	4g	100 mV/G	円柱	3mm	3.0g
	14g	10mV/G	端球	4mm	17.1g
水平	35g	10mV/G	鋼球	16mm	19.5g
			鋼球	30mm	110g

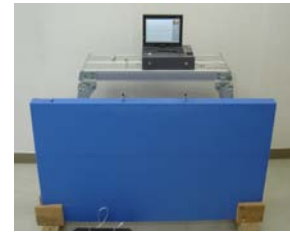


写真1 実験状況

3.1 MC ナイロン板の弾性波速度の推定

MC ナイロンの表面での弾性波速度は不明である。そこで、使用した供試体と同一材料で作られた棒状の供試体(直径150mm 高さ510mm)の弾性波速度を測定したところ、1950m/sであった。ここで、固体内を伝搬する弾性波の速度はポアソン比の影響を受け、(1)式で表される。(ν:ポアソン比, E:ヤング係数, ρ:密度)

MC ナイロンの材料特性を考慮し、ポアソン比を0.3と仮定すると(1)式より、板状のMC ナイロンを伝搬する弾性波速度は約2262m/sとなる。また、供試体表面から20mmの深さでの透過法による弾性波速度の測定値は約2280m/sであった。本論では、2270m/sを一応の基準値(以降基準値)として論を進める。

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots \dots \dots (1)$$

4. 実験方法及び結果

4.1 インパクト先端の形状や質量が弾性波速度の測定に及ぼす影響

先端が球状のインパクトの打撃によって、図2に示すような圧縮波が生成される(図中○印)。従って、図に示す座標系Z及びXの正の方向に加速度計の感度軸を向けた(但し圧縮方向を正)場合(以降鉛直、水平と記す)、観測される波形の初動はいずれも上向き(圧縮方向)になるとは必ずである。先端が球状でない場合は、異なる波形が励起される可能性もあるため、4種類の異なるインパクトを用いて実験を行った。

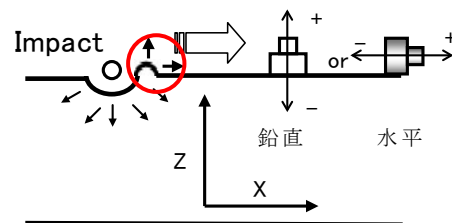


図2 初動波の生成

4.1.1 実験方法

測定には4gの加速度計を用いた。加速度計間の距離は300mmとし、鉛直、水平とも供試体表面に接着した。弾性波の入力は、直径3mm円柱、直径5mm球端ハンマ、直径16mm鋼球、直径30mm鋼球によって、1ch側センサから、測定ライン上の350mm離れた点を打撃して行った。到達時間差は、上向き方向の初動波形を読み取った。

4.1.2 測定結果

弾性波速度の測定結果を図3に示す。鉛直に加速度計を設置した場合の方が「基準値」(図中破線)に近い結果が得られた。

インパクトの質量の違いによる弾性波速度の測定結果に有意差は認められなかった。但し、先端形状が円柱のインパクトを使用した事例では、極端に弾性波速度の測定値が低下する現象が見られた。このため、以降の検証では直径3mm円柱のインパクトの使用を除外した。

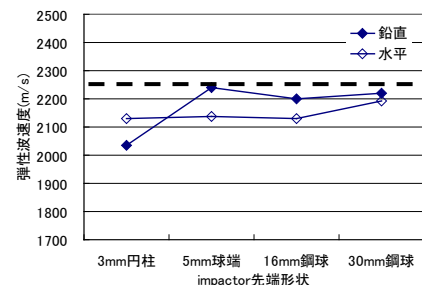


図3 インパクトの形状と弾性波速度

4.2 加速度計の質量が弾性波速度の測定に及ぼす影響の検討

図4に打撃力が同一の条件のもとで、感度及び質量の異なる3種類の加速度計(4g-100mV/G, 4g-10mV/G, 35g-10mV/G)を用いて測定した加速度波形を示す。

これより、感度が低く、質量が大きい加速度計では立上りがなだらかで、初動の

ピークが最も小さい値となることがわかった。加速度計の質量が大きくなると、波動の伝搬に対する慣性抵抗力も大きくなり、微弱な波動の検知を難しくする可能性があると考え、質量の異なる3種類の加速度計を用いて弾性波速度の測定を行った。

4.2.1 実験方法

質量の異なる加速度計(4g, 14g, 35g)を鉛直に設置し、4.1.1と同様の要領で測定を行った。

4.2.2 実験結果

測定結果を図5に示す。4gの加速度計を使用した測定では、「基準値」(図中破線)に近い結果が得られた。加速度計の質量が大きくなると約10%弾性波速度が遅く観測された。図中凡例はインパクタの質量を示す。

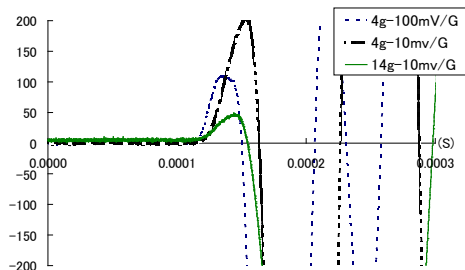


図4 加速度波形

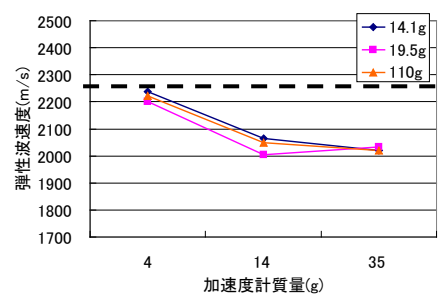


図5 加速度計質量と弾性波速度

4.3 加速度計の感度軸の向きが弾性波速度の測定に及ぼす影響の検討

設置した加速度計の感度軸の向きによって測定される弾性波速度に違いがあるか検討を行った。また、加速度計を導波板に取付けて設置する測定方法では、被測定面と加速度計の間に距離が見受けられる⁴⁾ことから、加速度計の設置高さを変えて測定を行い、弾性波速度の測定結果に及ぼす影響の検討を行った。

4.3.1 実験方法

測定は4.1.1と同様に行った。さらに、高さ60mm、幅24mm、厚さ2mmで中央にスリットを有する鋼製アングルを導波板として、300mmの間隔で木製の桿に取付け、ネジによって、設置高さを調節した。写真2に加速度計の設置状況を示す。測定桿に10kgの錘を下げ、導波板と測定面を密着させた。設置高さは、0mm(測定面に接着)、10mm, 15mm, 20mm, 30mm, 40mmとした。

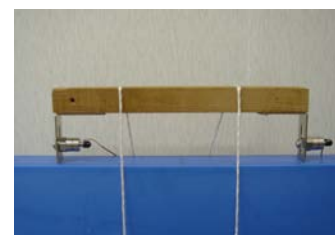


写真2 加速度計設置状況

4.3.2 実験結果

加速度計の感度軸を鉛直、水平の状態での測定面に接着した場合の測定結果を図6に示す。4gの加速度計を用いた測定では、鉛直に設置した場合が、「基準値」に最も近く、感度軸の向きによる測定値の差が見られた。その他の事例では、感度軸の違いに由来すると思われる差は認められなかったが、「基準値」からは約10%弾性波速度が低下して観測された。凡例は加速度計の感度軸の向きと質量を表している。

図7に加速度計の感度軸を水平の状態での設置高さを変えて測定した結果を示す。設置高さを上げると、計測される弾性波速度は徐々に低下し、設置高さ20mm近傍で最も低くなる傾向が見られた。凡例は加速度計の質量-インパクタの質量を示す。

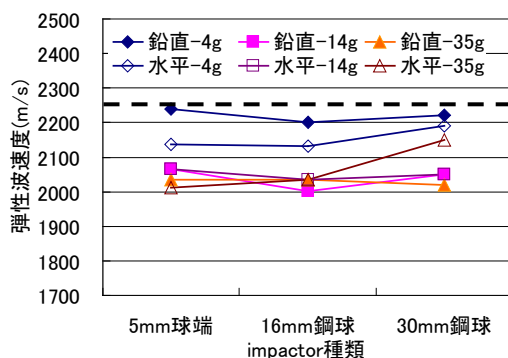


図6 感度軸の向きと弾性波速度

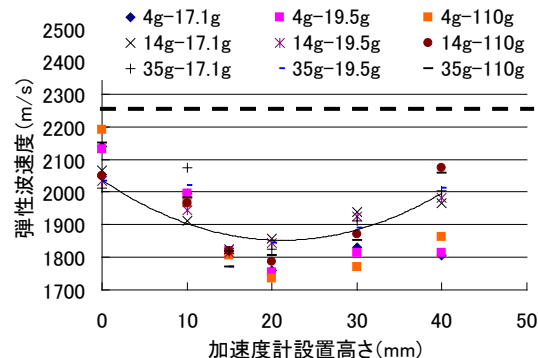


図7 加速度計設置高さと弾性波速度

図 8 に、4g の加速度計を用い、先端径 5mm の球端ハンマで打撃を行った際に得られた測定波形を示す。加速度計の質量の違いにより若干の差はあるものの、概ね設置高さが 15mm を越えた辺りから、初動が下向きとなる波形が観測された。この波形の位相の変化が、弾性波速度が低下して測定される原因として考えられる。

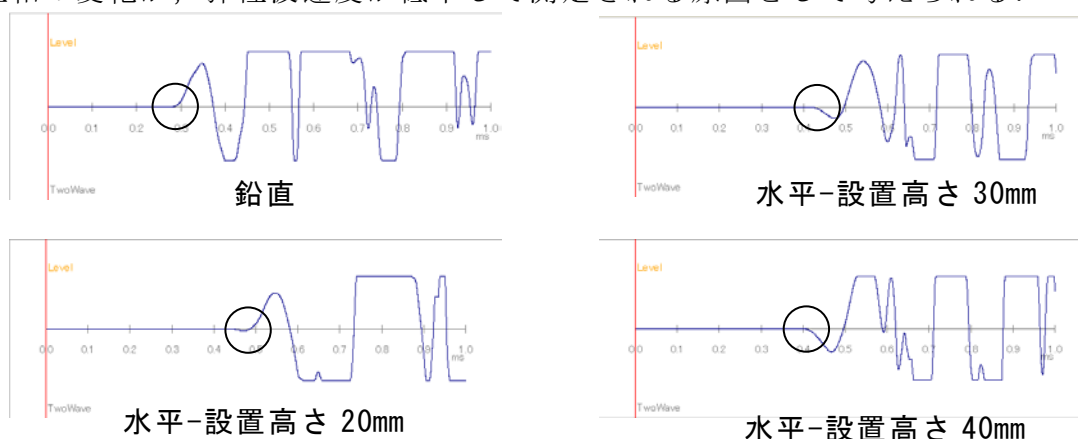


図 8 測定波形

5. まとめと考察

5.1 インパクトの形状と質量の選定

先端が直径 5mm の球端のハンマ (17.1g) と直径 16mm (19.5g) の鋼球によって打撃した場合の測定波形を比較すると、インパクトの質量がほぼ等しくても、先端の球径の小さいインパクトの方が初動の立上りが急峻となることがわかった。但し、直径 3mm の円柱では安定した波形が得られなかったことから、表面での弾性波速度の測定には、先端が球状で、ある程度の質量を持つインパクトが適しているといえる。

5.2 加速度計の選定

4g の加速度計を用いた測定において、「基準値」に最も近い値が得られた。従って、加速度計の選定においては高感度で低質量のものをを用いることが望ましい。

5.3 感度軸を水平にした測定方法についての考察

加速度計の設置高さを上げていくと、弾性波速度の測定値が徐々に低下し、設置高さ 20mm 近傍から再び増加する傾向が見られた。また、初動が下向きとなる波形も設置高さ 15~20mm 近傍を転換点としていた。

ここで、導波板を、先端に集中加重（加速度計の質量）を受ける片持ち梁として固有振動数を計算すると、最大で 1.5kHz 程度であった。一方、入力周波数は 5kHz 以上であるため、導波板が高次モードの振動を起し、波形の初動が反転する現象が起きたと考えられる。

感度軸を水平に設置して測定を行う場合は、低質量の加速度計を測定面に密着させる方法が最適であるが、導波板を使用する際は、測定精度を損なう恐れがあるので、可能な限り測定面に近い位置に設置するとともに、導波板の持つ固有振動数と入力周波数の関係を慎重に検討する必要があることがわかった。

[参考文献]

- 1) 独立行政法人土木研究所：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）
- 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) 同上 P166 写真-2