

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

境友昭*1, 極檀邦夫*2, 山下健太郎*3

1. はじめに

衝撃弾性波法による表面弾性波速度の測定では、2点間を伝搬する波動の遅延時間と距離から弾性波速度を算出方法が採られている。この方法では、測定距離の設定、遅延時間の検出に関する誤差がある。本報告では、複数の調査者が同一波形データを解析した場合の解析誤差、また同一供試体の同一測定線で実際に弾性波速度を測定した場合の誤差、偏差について検討した結果を示す。

2. 測定方法の適用性

打撃によって生成される波形は、必ずしも急峻な立ち上がりを示すものではない。むしろ、滑らかな曲線を描いており、測定波形に計測系の雑音が混入することを考慮すると、純粋な意味においても波形の立ち上がりを客観的に検出することは非常に難しい。このため、波形に閾値を設け、その閾値を越えた時点を波動の到達時間の指標とする方法¹⁾が提案されている。しかし、この方法では、波動が伝搬する過程での粘性抵抗による周波数構成の変化などによって、常に客観的な値が推定されという保証がない。

そこで、本報文では波形の立ち上がりを解析技術者が主観的に判断した場合のばらつき、偏差について被験者による試行実験を行った。被験者は、実際の業務に携わる経験の浅い技術者20名である。

試験に使用した波形は、(a)計算機で生成した波形、(b)実測波形、および(c)被験者が自ら実測した波形、とした。

2.1 数値計算波形を用いた解析誤差の検証

波形は、インパルスレスポンス関数を、表面波(レーリー波)について式(1)、縦弾性波について式(2)として算出したものである。また、入力波形として、1波正弦波を用いている。ここで、 L は、打撃点から測定点までの距離、添字 i は、測定点の番号(=1,2)、 d は、想定しているコンクリート板の厚さ、 j は多重反射の回数を示している。また、係数 a は、打撃によって発生する速度振幅成分のうち、レーリー波として伝搬される成分の振幅比率である。波形は、この両方のインパルスレスポンスを畳み込んで作成したものである。さらに、信号には振幅係数 a の5%に相当するランダム誤差を混入させた。

$$h_R(t) = \begin{cases} \frac{a}{\sqrt{2\pi L_i}} & , t = \frac{L_i}{C_R} \\ 0 & , t \neq \frac{L_i}{C_R} \end{cases} \quad (1)$$
$$h_P(t) = \begin{cases} \frac{(1-a)}{2\pi L_i} & , t = \frac{L_i}{C_P} \\ \frac{(1-a)}{4\pi j d} & , t = \frac{2jd}{C_P} \\ 0 & , t \neq \frac{L_i}{C_P}, t \neq \frac{2jd}{C_P} \end{cases} \quad (2)$$

*1) アプライドリサーチ(株)

正会員 工博

*2) iTECS 技術協会 理事長

正会員 工修

*3) (株) 東洋計測リサーチ

正会員

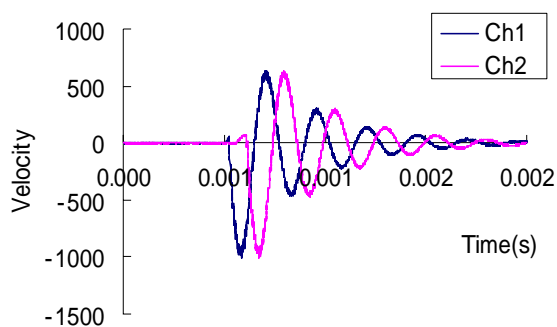


図-2.1 生成波形の 1 例(測定距離 150mm)

表-2.1 人工波形に対する被験者試験の結果

波形	1	2
設定弾性波速度(m/s)	4,000	3,885
被験者数	20	18
平均値	3,988	3,994
偏差	0.3%	-2.8%
変動係数	1.9%	0.5%

測定距離は、100mm から 50mm ステップで 600mm までの 12 ファイルで 1 セットとした。設定した弾性波速度は、4,000m/s と 3885m/s の 2 種である。試験結果を表-2.1 に示す。被験者に対する呈示順は、波形 1、2 の順であり、当然のことながら、被験者は人工的に作成された波形であること、また設定されている弾性波速度の値は知らされていない。試験結果 1 回目は、正解の弾性波速度と平均値の差は僅かに 0.3% であり、また変動係数も 1.9% と小さい。ただし、標準偏差は、74(m/s) であり、弾性波速度からコンクリート強度を推定する場合の誤差率を考慮すると、十分に小さい値とは言えない。波形 2 は、2 回目の試行であったため、標準偏差は 20.5(m/s) とかなり改善されている。ただし、この理由は被験者のほとんどが、波形 1 の試行結果から、「弾性波速度の設定値は 4,000m/s に違いない」と予見をもって解析に当たったためと想定される。真値は、3,885m/s であるが、正解値を下回る数値を算出した被験者は一人もいなかったこと、偏差が -2.8% と大きかったことが、その根拠である。

2.2 実波形による検証

実際の現場で測定された波形を元に、弾性波速度の算出試行を行った。被験者は、計算波形の場合と同じである。測定波形の例を図-2.2 に示す。測定位置は、表-2.2 に記すように M1、S2 の 2 現場である。表中の推定弾性波速度は、筆者の解析値であるが、真実ではない。M1、S2 とともに橋梁の現場であるが、M1 は供用後 30 年ほどを経過しているものの、表面直下(約 10cm)にジャンカが広く分布しており、見掛けの弾性波速度が非常に遅い事例である。S2 は、新設の PC 橋梁であり、高強度コンクリートで内部欠陥の存在が認められないコンクリート(厚さ 1.3m)である。試験の結果、内部欠陥のあるコンクリート M1 では、弾性波速度の解析値にバラツキがあり、変動係数が 5% に達する。ただし、これは弾性波速度の平均値が小さいためであり、実際的な標準偏差は、120m/s である。S2 では、偏差、変動係数とも小さいが、弾性波速度の標準偏差は 110m/s であり、M1 コンクリートと大きな違いはない。

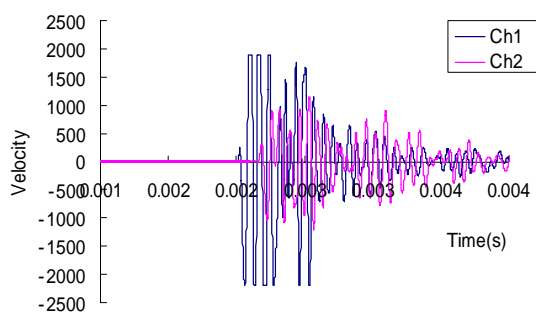


図-2.2 実測波形の 1 例(M1,300mm)

表-2.2 実波形に対する被験者試験の結果

波形	M1	S2
推定弾性波速度(m/s)	2,300	4,100
被験者数	20	19
平均値	2,398	4,032
偏差	-4.2%	1.6%
変動係数	5.0%	2.7%

2.3 コンクリート供試体での弾性波速度測定

ついて、実際に測定装置を使用し、コンクリート供試体を用いて、表面弾性波速度の測定解析を行った。被験者は、実測調査の前日までに、数値計算波形、既測定波形データを使用して、解析方法についての試行を行った者である。供試体コンクリートは、直方体のもの2個であり、その概略を表-2.3に示す。

測定は、2点センサー法によった。測定点の距離は100mmから100mmピッチで600mmまでとし、おのおの測定距離で3回程度の繰り返し測定を行った。測定試行後、各測定者が自ら測定データを解析した。なお、測定位置は、表-2.3中に示す特記事項の影響が少ないと想定される位置を予め決めており、全ての被験者が同一測定位置で測定することとした。

試験結果を表-2.4に示す。これらの供試体でも、真値は不明である。二つの平均値には違いがあり、コンクリートの配合強度の違いを反映していると言えよう。測定の変動係数は、3%台であり、この値は、表-2.1、表-2.2のS2波形の場合よりも大きい。表-2.1、2.2の事例が、同一波形データに対する解析誤差を表現しているのに対し、表-2.3の事例は、解析誤差のみならず測定誤差が含まれている。両者の分散比が小さいことから、表-2.3の変動係数に「測定誤差」が含まれているとは言えないが、解析単独の場合よりも誤差が大きくなっているものと推測される結果である。

表-2.3 コンクリート供試体

名称	T1	T2
寸法	1800×900×380	1750×900×300
設計強度	27kN/mm ²	35kN/mm ²
特記事項	シース空隙	剥離模型

表-2.4 供試体に対する被験者試験の結果

供試体	T1	T2
被験者数	14	23
平均値	3,830	4,054
標準偏差	129	156
変動係数	3.4%	3.8%

2.4 測定誤差への対応

2.4.1 システム誤差

弾性波測定における測定システムの離散化誤差(デジタル計測におけるサンプリング時間間隔による誤差)の問題は、ASTM²⁾でも指摘がある。この誤差は、測定時間に関する誤差である。弾性波速度は、測定点間の距離を L 、時間差を T とすると、測定誤差を含めたとて、式(3)で算出される。

$$C_p = \frac{L + \Delta L}{T + \Delta T} = \frac{L}{T} \left(\frac{1 + \frac{\Delta L}{L}}{1 + \frac{\Delta T}{T}} \right) \approx \frac{L}{T} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) \left(1 - \frac{\Delta T}{T} \right) = \frac{L}{T} (1 + \varepsilon_L + \varepsilon_T) \quad (3)$$

離散化時間誤差を ΔT 、距離測定誤差を ΔL としているが、時間測定誤差の期待値は測定時間 T によらず一定の値を持ち、また実用的な範囲では、距離の測定誤差についても同様に測定距離 L とは独立と考えられる。なお式(3)では、測定距離に関する誤差率(ε_L)および測定時間に関する誤差率(ε_T)を用いている。図-2.3は、測定距離による誤差の期待値を測定装置のサンプリング時間との関係で示したものである。図では、弾性波速度を4,000m/sに設定している。誤差は、測定距離に反比例して減少するが、測定距離300mmではサンプリング時間が1 μ sの場合約0.6%である。測定誤差(センサー間隔の設定誤差、打撃点での信号を計測する方法では、打撃位置の精度)も同様に測定距離に反比例する。

表面弾性波速度の測定方法では、距離を固定して測定する方法と、測定距離を変えながらデータを採取し、その平均値で弾性波速度を算出する場合、個別測定点のデータに含まれる誤差の期待値が測定距離によって異なるという問題がある。この問題は、距離で重み付けした加重平均を用いることによって回避することができる。すなわち、弾性波速度の決定値は、

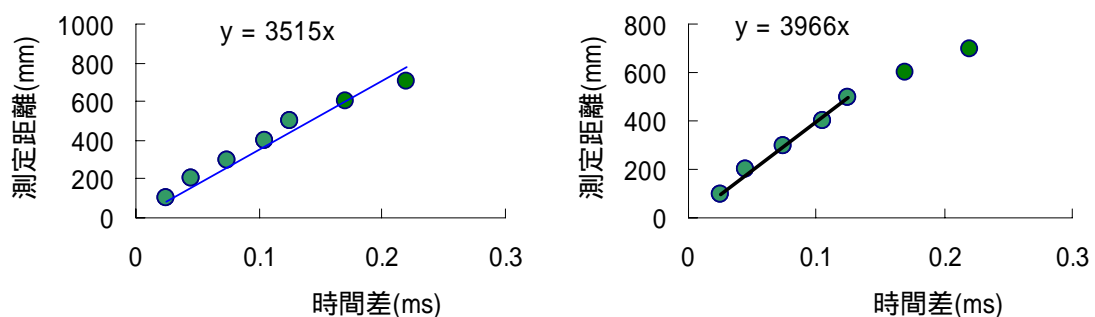
$$C_P = \frac{\sum_i C_{Pi} \cdot L_i}{\sum_i L_i} \quad (4)$$

である。

2.4.2 異常値の排除

測定線のコンクリート表面下にジャンカ、ひび割れなどがあると、見掛けの弾性波速度が低下することは既に述べたとおりである。特に伝搬距離が長くなるとコンクリート内の気泡などによる波動の分散が生じ、見掛けの弾性波速度に変化が生じる可能性がある。図-2.5 にその例を示す。測定した全点での弾性波速度の計算は、3515m/s であるが、見掛けの弾性波速度が遅くなっている 600mm 以遠のデータを除外すると、弾性波速度は、3966m/s となっている。

弾性波速度から強度推定を行う場合、弾性波速度が 3500m/s 程度では、20N/mm² 前後、4000m/s では少なくとも 30N/mm² と判定されることを考慮すると、測定データの吟味と取り扱いは、非常に重要性となる。なお、図-2.5 において、データが異常であるかどうかは、図の原点を通過する回帰直線を求めた場合、データが少なくとも 3 個以上回帰直線の上あるいは下に連続することから判断している。



(a) 全測定点を含めた場合

(b) 弾性波速度が遅いデータを除外した場合

図-2.5 異常値の排除

参考文献

- 1) 鬼塚哲雄他；衝撃により入力された弾性波の評価パラメータに関する基礎的検討，JSNDI シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集，Vol.1,pp.221-226，2003
- 2) ASTM C 1383 98a Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plate Using the Impact-Echo Method

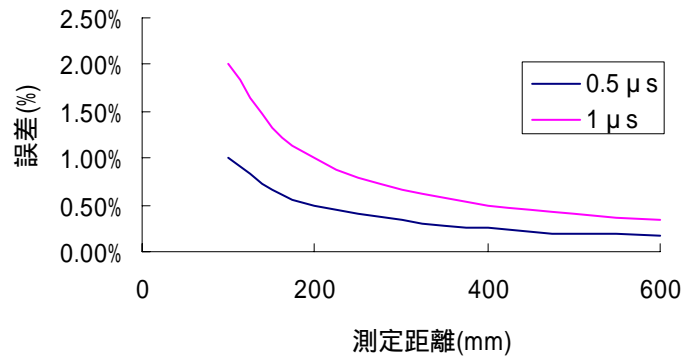


図-2.4 測定距離のシステム誤差の関係