論文　弾性波法における入力波長と部材寸法の関係が弾性波伝播速度に及ぼす影響

西岡　啓介[*1]・渡辺　健[*2]・橋本　親典[*3]・大津　政康[*4]

要旨：弾性波における弾性波伝播速度の計測での弾性波の波長と部材寸法の関係の影響について検討するために，角柱コンクリート供試体において弾性波の入力周波数およびセンサの位置を変化させながら計測を行った。その結果，弾性波伝播速度は入力波長に対してセンサ間距離が充分でないと計測が難しいこと，弾性波の進行方向と直交方向の断面寸法に対して波長が短くなるにつれて3次元弾性体を伝わる弾性波が卓越し，断面寸法より波長が長くなるにつれて1次元弾性体を伝わる弾性波が卓越することが示された。

キーワード：弾性波伝播速度，波長，部材寸法，弾性波法

1. はじめに

近年コンクリート構造物の維持管理において，コンクリート構造物に損傷を与えることなく検査可能な非破壊検査手法が注目を集めている。

弾性波を利用した非破壊検査手法である弾性波法においては，弾性波の伝播速度を正しく計測しておくことが，その検査結果の精度に影響を与える。計測対象の形状や内部欠陥の位置を，伝播時間や共振周波数と弾性波の伝播速度の関係より求める衝撃弾性波法[1)2)]などでは，その伝播速度を事前に正しく計測しておくことが非常に重要となる。

コンクリート構造物における弾性波速度の計測においては，弾性波の波長と部材寸法の関係より，見かけ上の伝播速度が変化することが指摘されている[3)4)]。

既往の研究において，弾性波伝播速度は供試体寸法が入力波長よりもある程度長いと精度のよい計測が可能であることが示された[5)]。しかし，入力波長と波の進行方向に垂直な部材寸法の影響についての検討が十分ではなかった。そこで，アコースティック・エミッション(AE)計測装置を用いた透過法による計測により，側面に設置したセンサを移動させながら計測を行い実験的に検討することにした。

2. 弾性波法について

2.1 概説

本研究では，弾性波の入力を，機械的衝撃力と超音波発振子により行い，コンクリート表面に設置したセンサにより計測を行った。

2.2 弾性波伝播速度

弾性波動理論によれば，弾性体内部を伝播する弾性波伝播速度は式(1)のように求められる。

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

ここで，E：弾性係数(N/mm^2)，ρ：密度(g/cm^3)，ν：ポアソン比とすると，C_p：弾性波伝播速度(m/s)となる。

一次元弾性体における弾性波伝播速度を式(2)に示す。

*1 徳島大学　工学部建設工学科　(正会員)
*2 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス部助手　博士(工学)　(正会員)
*3 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス部教授　工博　(正会員)
*4 熊本大学大学院　自然科学研究科環境共生科学専攻教授　工博　(正会員)

表－1　配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
					水 *W*	セメント *C*	細骨材 *S*	粗骨材 *G*	混和剤 *A*
20	17.5	52	3.5	46	189	363	775	893	0.02178

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (2)$$

一般的に，弾性波の波長が弾性波の伝播方向である部材長さより短い場合に正確な弾性波速度が計測されるとされている [3]。また, 一般的に, 波長が伝播方向と直交方向の部材断面寸法より短い場合は式(1)の速度が卓越し，長い場合は式(2)の速度が卓越するという指摘がある [4]。

3. 実験概要

3.1 作製した供試体と配合

本実験では，波長と部材寸法の関係について調べるために，長さの異なる供試体を 3 種類用意した。それらの寸法はそれぞれ，100×100×400mm，100×100×600mm，100×100×1200mとなる。また供試体の配合は，**表－1** に示す。

3.2 実験方法

直径の異なる鋼球および周波数の異なる超音波発振子，2 種類のテストハンマを用いて，コンクリート供試体端部から弾性波を入力し，伝播する弾性波を供試体端部と側面部に取り付けた 2 つの周波数広帯域 AE センサによって受振することにより，弾性波を検出した。鋼球とテストハンマの写真を**写真－1** に示す。その際供試体側面部に設置した AE センサを 100mm ずつ移動させていくこととした。使用した鋼球と超音波発振子，テストハンマによる上限周波数，入力波長を**表－2** に示す。鋼球を用いた機械的な衝撃力により発生される弾性波の上限周波数は，鋼球とコンクリート表面との接触時間により決定される。鋼球の直径を *D(mm)*とすると，接触時間 *Tc* および上限周波数 *fc(kHz)*はそれぞれ式(3), (4)より決定される [2]。

$$Tc = 0.0043D \qquad (3)$$

$$fc = \frac{1.25}{Tc} \qquad (4)$$

表－2 の波長は, 予備試験として実施した超音波計測器により計測した弾性波伝播速度 C_p＝4025m/s より算出した。計測におけるサンプリングタイムは，鋼球および超音波による入力において，それぞれ 1 μsec であり，サンプリング数は 2048 とした。

鋼球及びテストハンマでの入力の位置を**図－1** に示す。部材断面寸法の中心から垂直な線上での，距離 30mm の位置を打撃することにした。**写真－2** に超音波発振子, 鋼球による弾性波の入力状況を示す。

テストハンマ

鋼球

写真－1

表－2　上限周波数

入力方法		入力可能な上限周波数 (kHz)	波長(mm) (Cp=4025m/s)
鋼球による衝撃力	5.5mm	52.9	76.1
	15.9mm	18.3	219.9
超音波発振子	200kHz	200	20.1
テストハンマ		10kHz前後[6]	約402.5

供試体は，鋼球を用いた 4 点の支点により支持し，その上に供試体を静置した。支点の位置は，それぞれの供試体について，長さ方向の両端から 50mm, 幅方向からそれぞれ 20mm 内側の位置とした。**写真－3** はセンサの配置を示した写真である。

3.3 弾性波速度の算出方法

図－2 は実験の概略図を示したものである。図において入力した点からセンサ 1 までの距離を A, センサ 2 までの距離を B とする。また入力した時間を t_0, センサ 1 に到達するまでの時間を t_1, センサ 2 に到達するまでの時間を t_2 とすると，弾性波伝播速度 C_p は，式(5) ，(6)として表される。

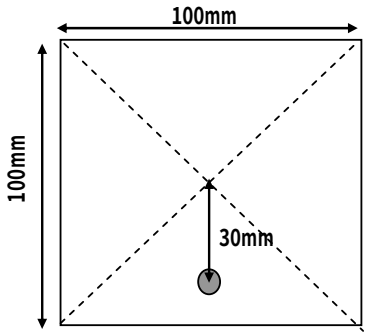
$$C_p = \frac{A}{t_1 - t_0} \tag{5}$$

$$C_p = \frac{B}{t_2 - t_0} \tag{6}$$

これらの式を整理すると，

$$C_p = \frac{B - A}{t_2 - t_1} \tag{7}$$

となる。このときの t_1 および t_2 については，一般的には計測した波形の初動到達時間を目視により読み取り求めた時間である。今回の実験では，弾性波がしきい値を超えたときの時間と波形より読み取った初動到達時間の両方を比較，検討することにした。**図－3** においてΔｔが波形から求めた時間であり，Δｔ’がしきい値を越えた時間を表している。今回の実験では，超音波の入力に関しては 10 回の計測における平均値を，

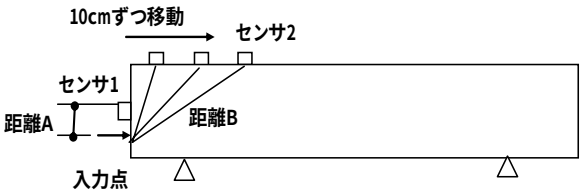


図－1　鋼球，テストハンマの入力位置

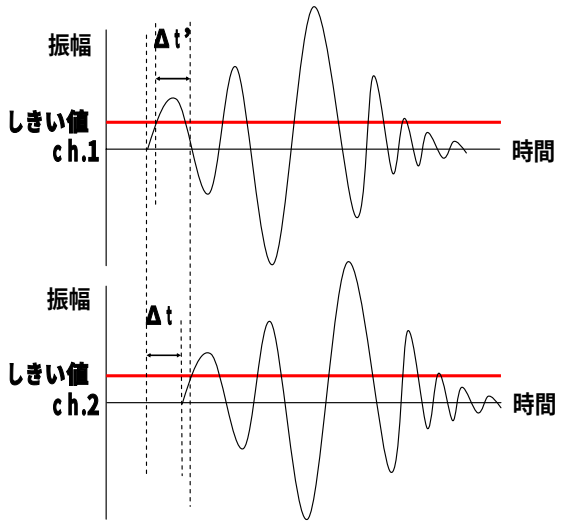
鋼球入力　　超音波入力

写真－2　鋼球，超音波(200kHz)の入力の様子

写真－3　センサ配置



図－2　実験概略図



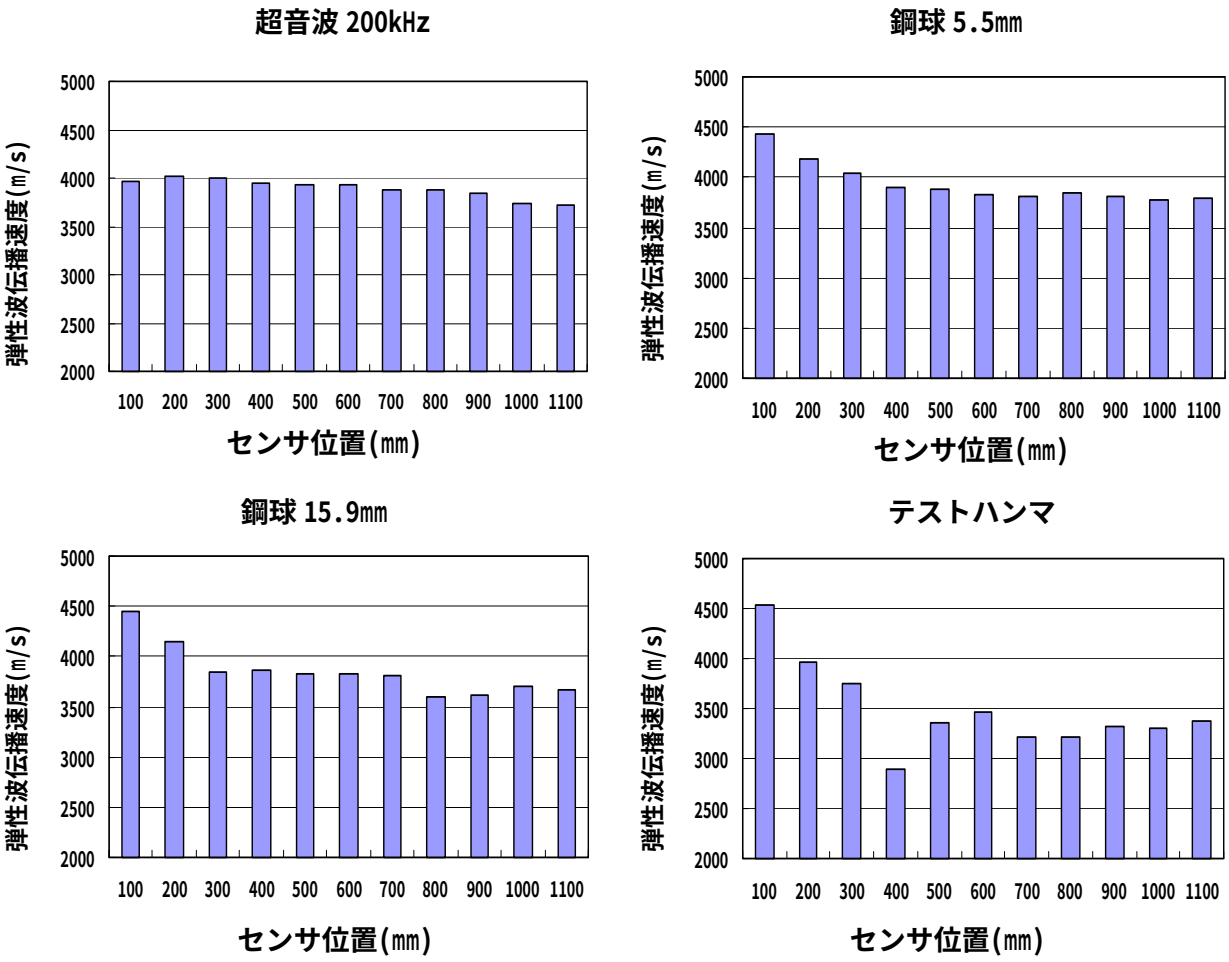
図－3　計測時間の種類の違い

鋼球による衝撃力の入力に関しては 20 回繰り返してその平均値を C_p としている。

4. 結果と考察

4.1 弾性波伝播速度の計測結果

供試体を両端支持し, 側面部に設置した AE センサを移動させていった際の計測による 1200mm 供試体の超音波 200ｋHz 入力，鋼球 5.5mm，鋼球 15.9mm，テストハンマ入力における伝播速度の結果を**図－4** に示す。この時の計測時間は, **図－3** における弾性波がしきい値を越えた時の時間であるΔｔ’を用いた。図中の横軸のセンサ位置とは供試体端部を 0 としたときのセンサの位置を示している。**図－4** において超音波 200kHz の入力では，センサ位置が 600mm 付近までは 3900m/s 安定しているが 700mm 以降ではわずかに速度の低下が見られる。鋼球入力においては 200kHz の入力に比べ, センサの設置位置が近いと伝播速度は速く計測されており 4000m/s を超えているが, センサの設置位置が離れていくと伝播速度は低下していき鋼球 5.5mm においては約 3700m/s，鋼球 15.9mm においては約 3600m/s となっている。弾性波の周波数が低下し入力波長が長くなるほど弾性波伝播速度が低下していることが分かる。テストハンマにおいても同様にセンサ設置位置が近いと伝播速度が非常に不安定であり，センサの位置が長くなるにつれて安定し 3300m/s 程度となっている。尚、これらの弾性波伝播速度の実測値は，鋼球入力，テストハンマ入力においては伝播速度の安定している 1100mm の位置における値を用いているが，超音波 200kHz 入力においては，



図－4　各種入力によるセンサ距離と伝播速度の関係

600mm の位置での値を用いた。これは，200kHz 入力において，センサ距離が大きくなると，波の減衰により伝播速度が若干低下しているためであり，最も安定している 600mm の位置における値を用いた。以上のことから部材寸法に関わらず計測する際，センサ間距離はその入力波長よりもある程度長い状態で計測する必要がある。また，鋼球や超音波入力においてはセンサ位置が離れるにつれ弾性波伝播速度の安定した値が低下する傾向があり，その原因として供試体寸法が長いと弾性波が減衰しているのではないかと考えられる。また，波長が長くなるにつれて弾性波伝播速度が低下しており同じ弾性波伝播速度を計測しているつもりでも異なる結果となりこれらについては **4.3** で検討を行った。

4.2 時間の決定方法による差の検討

ここで**図-4** における伝播速度の計測時間を，しきい値を超えた時間ではなく実際の波形から初動到達時間を目視により読みとった時間を用いて求めた，弾性波伝播速度を比較したものを**図－5** に示す。今回は 100mm，600mm，1100mm の位置に設置したときの弾性波伝播速度を求めた。この時，両者の伝播速度の誤差は，超音波 200kHz 入力において 2.5%，鋼球 5.5mm 入力において 1.7%，鋼球 15.9mm 入力において 4.3%，テストハンマの入力では 5.6%となっている。このことから，伝播速度の算出に用いる計測時間が異なっても，両者の伝播速度に大きな変化はなく，その他の寸法が 400mm，600mm の供試体においても大きな差は見られなかった。つまり，今回の試験の範囲ではしきい値を越えた時点からの計測時間によって求められた弾性波伝播速度も，十分信頼性のある正確な値であることが示された。

4.3 波長と断面寸法に関する考察

ここで，初動到達時間より算出した弾性波伝播速度を用いて断面寸法と波長の比(断面/波長)と伝播速度の関係をプロットしたものを**図-6** に示す。これより断面寸法に対して波長が短いほど伝播速度が大きくなり，長くなると伝播速度が小さくなることが分かる。200kHz 発振子は波長が短いため 3 次元弾性体を伝わる実体波 Cp，テストハンマでは波長が長いため棒を伝わる縦波速度 C_l と仮定する。これらの関係は次の式(8)に示される。

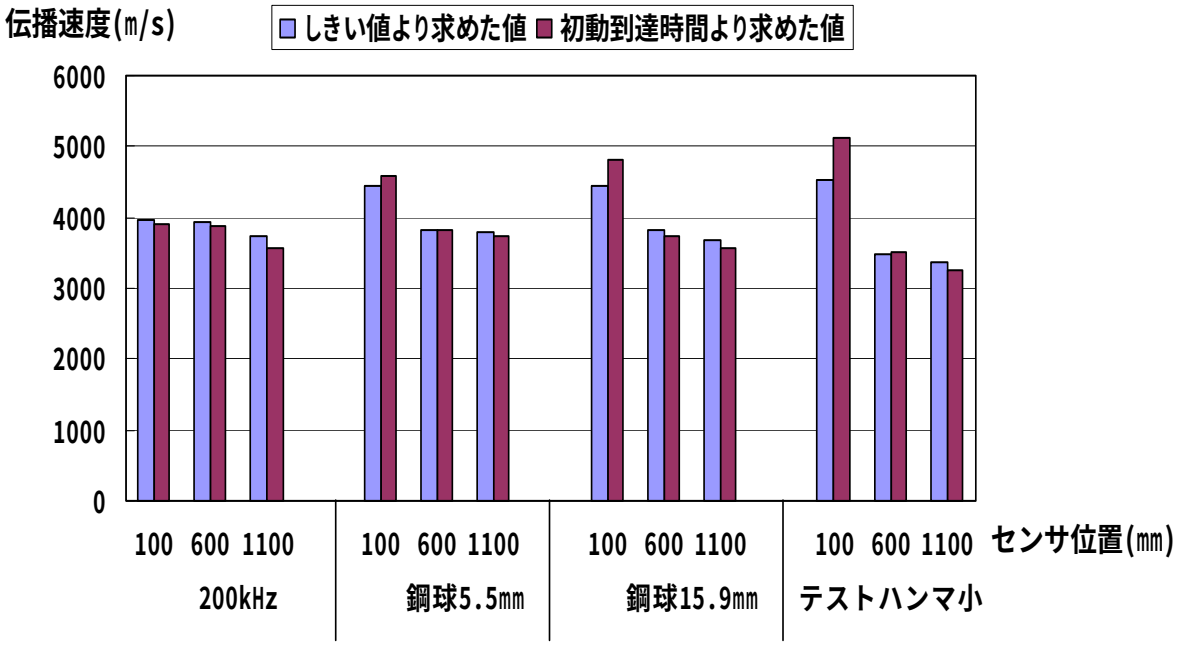
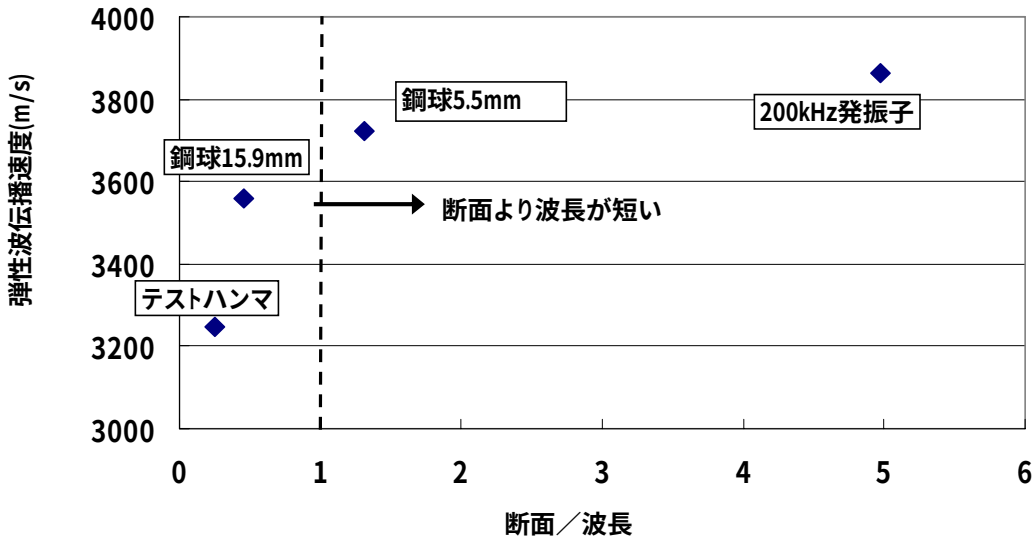


図-5　計測時間の違いによる弾性波伝播速度



図－6　断面寸法/波長と弾性波伝播速度の関係

$$C_l = C_p \sqrt{\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}} \qquad (8)$$

式(8)に C_p：3900m/s，C_l：3300m/s を代入すると動ポアソン比νは約 0.32 となり，一般的な動ポアソン比といわれている 0.25～0.4 の値の範囲となった。これらのことより，波長が断面寸法よりも十分に短い場合には実体波が卓越し，波長が部材断面よりも長くなるにつれて棒を伝わる縦波が卓越する傾向が実験的に示された。弾性波伝播速度の計測では，波長と部材寸法の関係に常に注意を払っておくことが重要であり，伝播速度を用いる場合にはその結果の解釈に十分な注意が必要となる。

5. まとめ

弾性波における弾性波伝播速度の計測での弾性波の波長と部材寸法の関係の影響について検討した結果，以下の知見を得た。

(1)センサを側面に設置した透過法による計測において，波長の異なる弾性波を入力する際，センサ間隔が入力波長よりも充分長くなると精度の良い弾性波伝播速度の計測ができる。

(2) 弾性波の進行方向と直交方向の断面寸法に対して波長が短くなるにつれて 3 次元弾性体を伝わる弾性波が卓越し，断面寸法より波長が長くなるにつれて１次元弾性体を伝わる弾性波が卓越する。

謝辞

本研究を進めるにあたり，徳島大学大学院修士課程の藤垣博敏氏，野上茜氏に協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，pp.124-125，2004.8
2) Sansalone, M.J. and Streett, W.B. ：Impact-Echo, Bullbrier Press，Ithaca，N.Y.，1997
3) British Standards Institution：BS1881 Part203, 1986
4) 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，pp.20-23，2004.8
5) 野上　茜　他：弾性波伝播速度の計測における波長とコンクリート部材寸法の影響，コンクリート工学年次論文集，pp1985-1990，2006
6) 渡辺　健：コンクリートの弾性波動理論と欠陥評価に関する研究，熊本大学学位論文，pp82-83，2001 年