論文 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

野上 茜^{*1}·渡辺 健^{*2}·橋本 親典^{*3}·大津 政康^{*4}

要旨:本研究では,部材長さの異なる角柱コンクリート供試体を用いて,様々な弾性波の入 力方法により波長の異なる弾性波の伝播速度を透過法により計測し,部材寸法と入力周波数 の関係およびセンサ配置の影響について実験を行った。その結果,今回行った実験の範囲で は,弾性波伝播速度の計測の際に,センサの設置位置により見かけの伝播速度が影響を受け ることが分かった。また,弾性波伝播方向と平行な部材長さが,波長より十分に長い場合に 伝播速度が正確に計測できること,伝播方向と直交する部材断面と波長の関係については影 響がほとんどないことが分かった。

キーワード:弾性波伝播速度,波長,部材寸法,弾性波法,透過法

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、見た目の伝播速度が変化することが指摘 されている³⁾⁴⁾。

そこで本研究では、コンクリートの部材寸法 と伝播する弾性波の波長の関係が、弾性波伝播 速度の計測結果にどのように影響するかを検討 するために、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、 実験的に検討することにした。さらに、供試体 に拘束条件や,使用するセンサの周波数特性の 影響およびセンサの設置個所の影響について検 討を行った。

2. 弾性波法について

2.1 概説

弾性波法は、コンクリートを伝わる波をセン サにより検出し、検出した信号を弾性波として 把握し、これを分析することによってコンクリ ートに関する種々な情報を得て検査する方法で ある。弾性波法は、弾性波の発信要因、および 受信方法のみに着目すると、超音波法、衝撃弾 性波法、打音法およびアコースティック・エミ ッション法に分類される⁵⁾。本研究では、弾性波 の発生を、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 衝撃力による上限周波数について

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(m)とすると、接触時間 Tc および上限周波

*1	徳島大学大学院	先端技術科学教育部	知的力学シ	/ステ』	「工学員	∮攻 (〕	E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	1)
*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	长生科学 専习	女教授	工博	(正会)	員)

$$Tc = 0.0043D \tag{1}$$

$$fc = \frac{1.25}{Tc} \tag{2}$$

2.3 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(3)のように求められる。

$$V_{p} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$
(3)

ここで, *E*: 弾性係数(N/mm²), *ρ*: 密度(g/cm³), ν : ポアソン比とすると、 V_p : 弾性波伝播速度 (m/s)となる。

一次元弾性体での弾性波伝播速度を式(4)に示す。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{4}$$

一般的には、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,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(3)の速度が卓越し、長い場合は式(4)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5種類用 意した。それらの寸法はそれぞれ、100×100× 100mm, 100×100×200mm, 100×100×400mm, $100 \times 100 \times 600$ mm, $100 \times 100 \times 1200$ mm z^{2}

表一1 配合 粗骨材のスランプ水セメン 単位量 (kg/m³) 空気量 細骨材率 最大寸法 ト比 水 セメント 細骨材 粗骨材 混和剤 (%) (%) (cm)(mm)(%) W S G CA 3.5 189 363 775 893 0.02178 20 17.5 52 46



センサ端部

150kHz 共振型センサ



写真-2 使用センサ





写真-1 センサ配置

写真-3 鋼球および超音波発振子による入力

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。使 用した鋼球の直径と、式(1)、(2)よりもとめた上 限周波数、超音波発振子により入力される周波 数および入力波長を**表**-2 に示す。この波長は、 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 V_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 μ sec であり、サンプリング数は 2048 とした。

鋼球での入力の方法として,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。



図-1 鋼球を用いた際の入力の仕方

センサの設置個所の違いによる影響を検討す るため、供試体の端部に設置した計測、およ び側面に設置した計測を実施した。それらの 様子を**写真-1**に示す。

また,センサの受け持つ周波数帯による影響を調べるために,鋼球による弾性波入力の場合,広帯域センサおよび150kHz 共振型センサを用いて計測を行った。使用したセンサを 写真-2に示す。

写真-3 に超音波発振子による弾性波の入 力状況を示す。

表-2 上限周波数

<u>አታን</u>	方法	入力可能な 上限周波数 (kHz)	波長(mm) (V _p =4025m/s)	
	5.5mm	52.9	76.1	
鋼球による	9.5mm	30.6	131.5	
衝撃力	15.9mm	18.3	219.9	
	19.0mm	15.3	263.1	
超音波	28kHz	28	143.8	
発振子	200 kHz	200	20.1	

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、100×100×100mm の場合については、長さ方向の両端から 20mm,軸方向の両端から 20mmの位置で支持した。

3.3 弾性波速度の算出方法

実験の概略図を図-2に示す。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 V_p は、式 (5)、(6)として表される。

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

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



図-2 弾性波伝播速度の実験

これらの式を整理すると,

$$V_{p} = \frac{B - A}{t_{2} - t_{1}} \tag{7}$$

となる。

このときの t₁および t₂については,それぞれ 弾性波がしきい値を超えたときの時間である。 実際の到達時間に比べ,若干の時間差があり, 今回,計測波形の目視によりその時間差につい て観察した。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,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 V_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,AE センサを供試体端部 に設置した際の計測による結果を図-3 に示す。

超音波発振子による入力周波数が200kHzおよび28kHzを用いた計測では、供試体長さ100mmの供試体の結果を除いて、弾性波伝播速度が4000~4200m/s程度になっている。この値は、予備試験において超音波計測装置で計測した弾性

波伝播速度 4025m/s とほぼ一致しており,精度 の高い弾性波伝播速度が検出されたといえる。 200kHz と 28kHz の結果を比較すると,その結果 にほとんど差異は見られない。ここで弾性波の 波長と部材寸法の関係について考える。表-2よ り,200kHzの入力の際の波長は20.1mmであり, これは弾性波の伝播方向である供試体長さより 短く,弾性波伝播方向の直交方向である断面寸 法の100mmよりも短い。28kHzでは波長は143. 8mm であり,これは供試体の長さ100mを除く と,供試体長さより短く,断面寸法100mmより も長い。このことより,超音波の入力において は,波長の長さと弾性波伝播方向の直交方向で ある断面寸法の関係が弾性波伝播速度には影響 を及ぼしていないといえる。

供試体長さ 100mm の供試体においては, 弾性 波伝播速度が低下している。明確な理由は不明 であるが, 表-2 に示す波長と供試体の長さを比 較すると, 200kHz では波長のほうが短いため, 波長の影響とは言い難い。供試体長さが 200mm 以上の場合では, 200mm の際に最も速度が速く, 供試体長さが長くなるにつれて, 弾性波速度が



図-3 センサを供試体端部に設置した際の弾性波伝播速度

徐々に低下している。これは,供試体寸法が長 くなるに従い,弾性波の減衰が生じることによ る影響であると考えられる。

鋼球による入力を用いた計測では、鋼球径が いずれの場合においても、供試体長さが 100mm および 200mm を除くと、弾性波速度が 3900~ 4100m/s 程度となっている。超音波による入力結 果と比べても大きな違いはなく、精度良く弾性 波の速度が計測されている。鋼球径の異なる結 果を比較してもほとんど差がない。表-2より, 鋼球径が5.5mmものでは波長が76.1mmであり, 弾性波伝播方向の直交方向である断面寸法の 100mmよりも短い。その他の鋼球径では波長が 断面寸法よりも長いが,その影響はほとんどな いと言える。

鋼球を用いた場合,供試体長さが 100mm およ





図-4 センサを供試体側面に設置した際の弾性波伝播速度

図-5 150kHz 共振型センサを用いた際の弾性波伝播速度

び200mmにおいて弾性波伝播速度が速くなる傾向が見られる。鋼球径が15.9mm および19.0mm では波長がそれぞれ,219.9mm および263.1mm である。そのため、一般的には400mm以上の供 試体長さで伝播速度が正確に計測されることに なり、図-3の傾向はそれに当てはまる。しかし、 鋼球径が5.5mm および9.5mmの場合は、波長が それぞれ76.1mm および131.5mm であり供試体 長さが200mmの場合は、正確な弾性波速度が計 測できる条件にも関わらず、良い結果が得られ ていない。これらの理由は明確ではなく、今後 検討が必要である。超音波による入力と同様に、 供試体長さが長くなるにつれて徐々に弾性波速 度が遅くなる傾向があることが分かる。

供試体を両端支持し,AEセンサを供試体側面 に設置した際の計測による結果を図-4に示す。

超音波発振子による入力周波数が 200kHz お よび 28kHz を用いた計測では、供試体長さが 100mm および 1200mm を除けばほぼ 4100~ 4200m/s 程度となっており、図-3の結果とほぼ 同じ結果となっている。一方、鋼球を使用した 結果においては供試体長さ100mmの結果を除く と伝播速度が 3500~3700m/s となり, 超音波に よる結果よりも見かけの弾性波伝播速度が遅い 結果となった。図-3の鋼球を使用した結果と比 較すると、図-4の伝播速度が低いことが分かる。 このことより、供試体側面にセンサを設置した 場合には,弾性波の見かけの速度が低下する可 能性が明らかとなった。これは、センサが供試 体端部にある場合は,弾性波の伝播方向とセン サ感度軸方向が平行であり,感度が良いが,セ ンサが側面にある場合は弾性波の伝播方向とセ ンサ感度軸とが直交方向となり、感度の悪い計 測条件であるためと考えられる。

4.2 センサの周波数帯の影響

使用するセンサを 150kHz 共振型で計測した ときの結果を図-5 に示す。図-3 および図-4 の結果と比較すると、今回の実験の範囲におい ては、センサの周波数帯が変化しても伝播速度 の計測結果にほとんど影響がないことが明らか となった。また、そのセンサ設置の違いによる 伝播速度の変化の傾向も同様であることが分か った。

5. まとめ

本研究では,部材長さの異なる角柱コンクリ ート供試体を用いて,様々な弾性波の入力方法 により波長の異なる弾性波の伝播速度を透過法 により計測し,部材寸法と入力周波数の関係お よびセンサ配置の影響について実験を行った。 その結果,以下のことが明らかとなった。

(1)センサを供試体の端部に設置した透過法による計測では,供試体寸法が波長よりもある程度 長くなれば精度良く弾性波伝播速度を計測する ことが可能である。

(2)今回の実験の範囲では,波長と弾性波伝播方向と直交する断面寸法の関係については,その影響がないことが分かった。

(3)センサを供試体の側面に設置した透過法による計測では、衝撃的な外力を用いた入力において、弾性波の伝播速度が低下する可能性が示された。

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
- Sansalone, M.J. and Streett, W.B. : Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 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) 日本コンクリート工学協会編:コンクリート 構造物の診断のための非破壊試験方法研究 委員会報告書,2001