# 論文 超音波測定に基づくコンクリートの硬化挙動の評価手法に関する基礎研究

内田 慎哉\*1・河村 彰男\*2・鎌田 敏郎\*3・久田 真\*4

要旨:現時点では,時々刻々と変化するコンクリートの硬化挙動を的確に,しかも連続的に 把握するための手法は確立されていない。そこで本研究では,これらのことを踏まえ,AE 計測システムを用いて連続的に超音波計測を行い,短時間に変化する材料の硬化挙動を捉え ることを試みた。その結果,超音波の伝播速度,受振波形の最大振幅値あるいは周波数分布 により,セメントペーストの硬化挙動を連続的にモニタリングできることを示した。また, これらのパラメータは,それぞれ材料の異なる性状を評価している可能性を明らかにした。 キーワード:硬化挙動,非破壊検査,超音波法,伝播速度,最大振幅値,周波数分布

1. はじめに

コンクリートの硬化挙動を把握するための試 験方法<sup>1)</sup>にはさまざまなものがある。代表的な ものとして,超音波伝播速度を用いた方法や貫 入抵抗試験が挙げられる。

超音波伝播速度を用いた研究は,1950年代か ら 60年頃にかけて活発に行われた。このうち, Whitehurst<sup>2)</sup>は,材齢3時間から伝播速度の計測 を行い,伝播速度は時間とともに大きくなり, 材齢5,6時間後,増加率が著しく減少しながら 頭打ちになるとし,さらに,速度勾配が変曲す る部分をもって終結時間であるとしている。

一方,明石ら<sup>3)</sup>によれば,伝播速度は時間と ともに大きくなるものの,速度勾配の明確な変 曲部は確認できないとしている。ただし,これ らの研究に用いられた計測器では,すべて超音 波探触子を使用しているため,受振波形をデジ タル値として連続的に記録することは困難であ った。

また,1960年以降の研究では,超音波の縦波 と横波とを分離して計測し,これらの伝播速度 から体積弾性率およびせん断弾性率を算定し, 凝結に伴う物性の変化を捉えたもの<sup>4)</sup>もある。 しかしながら,超音波伝播速度と硬化挙動との 関係に不明確な部分が多いのが現状である。

ビカー針試験やプロクター貫入抵抗試験では, 始発および終結時間を貫入針の貫入抵抗により 定義しているものの,その物理的な意味が不明 確である。また,これらの試験では作業方法の 観点からみて,短時間に硬化するコンクリート の急激な材質変化を逐一追跡していくことは物 理的に難しく,このような材料の硬化挙動を的 確に捉える手法がないのが現状である。

そこで,本研究ではコンクリートとセメント ペーストの硬化挙動とが密接な関係にあるとい うことに基づき,基礎研究としてセメントペー ストのみを実験の対象にした。超音波の計測に は AE 計測システムを活用し,評価パラメータ として伝播時間,波形の最大振幅値および周波 数分布を用いて,短時間に変化する材料の硬化 挙動を捉えることを主眼とした検討を行うこと とした。

### 2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

セメントには,超速硬セメントを使用した。 セメントペーストの材質の違いや凝結遅延剤に よる効果が計測パラメータに与える影響を確認

- \*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻(正会員)\*2 (株)熊谷組 土木本部土木技術部(正会員)
- \*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 博(工)(正会員)
- \*4 新潟大学助教授 工学部建設学科 博(工)(正会員)

するため,以下の2つのケースを設定し た。すなわち,ケースAでは,セメント ペーストの水セメント比を40%とし,凝 結遅延剤の添加率をセメント量の0.6, 0.9 および1.2%と変化させた。また,ケ ースBでは,水セメント比を30,40 お よび50%とし,それぞれ凝結遅延剤を 0.6%添加した。

2.2 超音波計測方法

型枠および試料の概要を図 - 1 に示す。 この図に示すように,幅 100mm,高さ 100mm,長さ 400mmの木製型枠を作製 し,短軸方向に超音波を透過させるため, 型枠両側面の中央部にそれぞれ穴を開け, AE センサの一部を試料内に埋め込める ようにした。センサ間距離は 65mm とし た。実験は 5 の室内で行い,セメント ペーストをモルタルミキサにより練り混 ぜた後に,型枠に投入した。なお,超音 波計測については,セメントに水を加え

た時点から開始し,セメントペーストが硬化した後,伝播速度の変化がゆるやかとなるまで行った。計測中はセメントペーストおよび AE センサに触れないよう注意した。

本研究で用いた超音波計測システムを図 - 2 に示す。パルスジェネレータにより,印加電圧 375V,送振間隔 0.8sec でパルス波を発振し,AE センサにより受振した後,サンプリング周波数 2MHz でデジタル化して AE 計測装置で記録し た。発振には 0~1MHz の間に幅広く応答感度 があり,140kHz に共振点をもつ AE センサを用 いた。また,測定においては,ノイズ除去を目 的として 50~500kHz のバンドパスフィルタを 用いた。

本計測システムには,以下に示す3つの特徴 がある。すなわち,まず,超音波センサと異な りAE センサを使用しているため,超音波を縦 波あるいは横波と区別することなく,ペースト 中を透過した弾性波の波形として検出できる。 また,パルスジェネレータを使用しているため,





(単位:mm)



図-2 超音波計測システム

最初に発振したパルスと次に発振したパルスが 干渉しないようにパルス送振間隔を調整できる。 さらに,波形の記録に AE 計測装置を用いるた め,連続的な計測が容易である。

2.3 超音波評価パラメータ算定方法

パルスを発振した時間と,超音波がセメント ペーストを透過し,しきい値を越えて AE セン サにより受振された時間との時間差から伝播時 間を求めた。AE センサ間距離を,算出した伝 播時間で割ることにより伝播速度を求めた。

また,最大振幅値は,検出した受振波形をパ ソコンの画面上で確認した上で求めた。

さらに,周波数分布は,得られた受振波形を 高速フーリエ変換して求めた。

2.4 貫入抵抗試験方法

超音波計測と同時に,硬化挙動を評価するた めの従来の手法であるプロクター貫入抵抗試験 を行い,超音波計測時のセメントペーストの状 態を確認した。なお,この試験はケース B につ いてのみ実施した。 3.実験結果と考察

## 3.1 超音波伝播速度による評価

超音波伝播速度と経過時間との関係をケース A およびケース B について, それぞれ図 - 3(a) および(b)に示す。まず,図-3における経過時 間 Ohr とは, セメントに加水が行われた時間を 示しており、この時点では型枠内に試料はなく, センサ間には空気が存在するのみである。図に よれば値は約 330m/s を示しており 加水直後は 空気の伝播速度が計測されている。続いて、い ずれの配合においても,型枠に投入された直後 の試料では超音波が透過しない領域 5)あるいは 透過しても伝播速度が水(約 1500m/s)よりも 遅い領域がある。このうち,超音波が受振され ない理由は,セメントペーストの粘性による超 音波のエネルギー吸収が大きいためと考えられ る。凝結遅延剤添加率および水セメント比が大 きくなるほど,これらの領域は長くなる傾向を 示した。その後は,水の伝播速度に近い値を始 点として時間の経過とともに伝播速度は速くな り,明確な変曲部を伴って頭打ちとなった。

一方,変曲部近傍における単位時間当たりの 速度の増加割合は,凝結遅延剤の添加率の違い よりも水セメント比の大小に依存し,水セメン ト比が大きくなるにしたがって,増加割合がゆ るやかになることがわかった。

ある媒体中での超音波伝播速度 vは,一般化 した形で記述すると式(1)のようになる<sup>6)</sup>。

$$v = \left[\frac{K + (4/3)G}{\rho}\right]^{\frac{1}{2}} (m/s)$$
(1)

ここで, ρは媒体の密度, K は体積弾性率お よびG はせん断弾性率である。フレッシュなセ メントペーストは,水和の開始以前は懸濁液と みなせるが,凝結の始まりとともに粘弾性が増 し,さらに硬化が進んで完全な固体へと変化し ていく。これより,経過時間の初期においては, 媒体としての水の体積弾性率に支配されていた 伝播速度が,セメントの水和の進行とともに, セメントペースト全体における水和物(体積弾



性率は明らかに水より大きいと考えられる)の 占める割合が大きくなり,結果的に伝播速度が 増加していくものと考えられる。そして,水和 物の生成速度がゆるやかになると,もはや弾性 率の増分が小さくなり,伝播速度がほぼ一定と なるものと考えられる。

一方,ケース A では,伝播速度が頭打ちする 領域においては,凝結遅延剤の添加率に関わら ず伝播速度はおよそ 3000m/s 程度となった。セ メントペーストの一般的な伝播速度と比較して も妥当な値と考えられる。また、ケースBでは、 水セメント比が大きくなるほど伝播速度が遅く なる傾向を示している。これにより、本計測シ ステムにおいても、セメントペーストの密実性 の違いや遅延剤の効果を、定性的ではあるが伝 播速度を用いて把握することができたと考えら れる。

図 - 4 にプロクター貫入抵抗試験の結果を示 す。これによれば,貫入抵抗が生じ始める時点 は,水セメント比が小さいほど早い。また,貫 入抵抗が生じた後は,水セメント比によらず, おおむね単調に増加している。いずれも,伝播 速度と近い傾向を示している。

図 - 5 に貫入抵抗を伝播速度と対応させて示 す。JIS A 6204 においては,凝結の目安として, 貫入抵抗値が 3.5N/mm<sup>2</sup> および 28.0N/mm<sup>2</sup> に達 した時間をそれぞれ始発および終結としている。 これを参考にすれば,水セメント比 50%の場合 は若干異なるものの,本実験の範囲内では,始 発以前から超音波が透過し,始発から終結まで の間に伝播速度が徐々に増加しているものと考 えられる。以上のことから,本研究の範囲内で は,伝播速度は始発から終結の間において,凝 結硬化に関する状態変化を把握するのに有効な 指標ということができる。

3.2 最大振幅値による評価

最大振幅値比と経過時間の関係を図 - 6 に示 す。本研究では,計測ごとには厳密な感度較正 を行っていないため,ここでいう最大振幅値比 とは,各配合で得られた振幅の最大値を1とし てそれに対する比率として定義したものである。

ケースAおよびケースBのいずれにおいても, ある時点において最大振幅値比は急激に増加し, その後頭打ちとなった。この傾向は,明石ら<sup>3)</sup> が行った縦波の最大振幅値を用いた研究結果と も一致している。超音波が透過し始めたころの セメントペーストは,水にセメント粒子が懸濁 したかなり濃厚なサスペンジョンである<sup>4)</sup>。こ



のため,ペーストは粘弾性的性質を有しており <sup>4)</sup>,主に粘性拡散による著しい減衰のため振幅 は小さくなる。しかしながら,水和反応に伴っ て,粘性拡散による減衰が小さくなり,透過エ ネルギーが飛躍的に大きくなったためと考えら れる。

また,伝播速度と同様に,配合によるセメン トペーストの硬化挙動の違いを確認することが できた。

図 - 3 と図 - 6 との比較において、伝播速度の 場合と最大振幅値比が急激に増加し始める時間 はおおむねー致しているものの,頭打ちとなる までの時間は明らかに最大振幅値比の方が短い ことがわかる。このように,最大振幅値比は, 伝播速度とは異なり,セメントペーストの粘性 に関する側面からの評価に有効であるものと考 えられる。また,図-4および図-6との比較よ り,最大振幅値比は,始発後のより早い段階で の急激な組織変化を捉えている可能性が高いと 考えられる。

3.3 周波数分布による評価

図 - 7 に,水セメント比 30%のケースにおけ る周波数分布の経時変化を把握するため,超音 波透過開始時間から計測終了時までの間につい て,その代表的なものを経過時間と対応させて 示した。これによれば,時間の経過に伴って, およそ 100kHz 近傍の周波数成分が徐々に卓越 する傾向が見られる。しかもこの現象は,最大 振幅値比がほぼ1で一定となり(経過時間約15 分:図-6(b)参照),さらに伝播速度の増加も頭 打ちになった時点(経過時間約40分:図-3(b) 参照)以降において顕著になっていることがわ かる。これらより,受振波形の周波数分布は, セメントペーストの硬化過程において,特に終 結以降に変化が現れていることから、セメント 硬化体組織が密実になるに従って 100kHz 近傍 の超音波の成分が透過しやすくなることを示し ているものと考えられる。

以上のことから,伝播速度や最大振幅値比が 頭打ちする領域においても,周波数分布を新た な評価パラメータとして用いることにより,セ メントペーストの硬化挙動を把握できる可能性 があることがわかった。なお周波数分布の傾向 は,その他の実験ケースにおいてもほぼ同様で あった。

4. まとめ

以下に,本研究で得られた結果を示す。

AE 計測システムを活用することにより,フレッシュ状態から硬化過程におけるセメントペーストにおいて,超音波を連続的に計



測することができた。

- 本実験の範囲内では、伝播速度は、プロク ター貫入抵抗試験により判断した始発から 終結までの範囲において、セメントペース トの状態変化を把握するための指標として、 感度の良好なパラメータと考えられる。
- 3)最大振幅値は、セメントペーストにおける 粘性の増大に起因して変化するパラメータ と考えることができ、評価指標としては、 凝結過程における適用範囲は伝播速度より も小さい。
- 周波数分布は、硬化後の水和物の生成状況 と対応して変化する指標と考えられ、伝播 速度および最大振幅値では感度の低下する 領域においても、硬化挙動を把握できる可 能性がある。

現時点では,セメントペーストの硬化挙動を

超音波パラメータである伝播時間や受振波最大 振幅値および周波数分布から定性的に示すにと どまっている。今後はコンクリートについても 同様の検討を行い,凝結と超音波透過開始点や 伝播速度および最大振幅値の初期勾配,頭打ち の開始点などの物理的意味を明確にし,コンク リートの硬化挙動を定量的に把握する手法に発 展させる予定である。

### 謝辞

実験の実施およびデータ整理にあたり桑原常 晃君ならびに淺野雅則君を始めとする岐阜大学 破壊診断工学研究室の方々にご協力を頂きまし た。実験に用いた試料は,小野田ケミコ(株) よりご提供頂きました。ここに記して謝意を表 します。

#### 参考文献

- 21) 笠井芳夫:コンクリートの初期性状,コン クリートジャーナル,Vol.11,No.10,pp.1-15, 1973
- Whitehurst, E. A.: Use of the soniscope for measuring setting time of concrete, Proc. ASTM, Vol.51, pp.1166-1183, 1951
- 3) 明石外世樹,山路文夫:超音波パルスによるコンクリートの凝結測定について,セメント技術年報,XVII,pp.164-171,1959
- 4) 角田 忍,明石外世樹:超音波による凝結 初期におけるセメントペーストおよびモル タルの物性変化の測定,材料,Vol.32,No.352, pp.175-181,1983
- 5) 山路文夫:コンクリートの凝結測定に関す る検討,セメント技術年報 XXX ,pp.259-262, 1976
- 6) たとえば和田八三久,生嶋 明共編:超音 波スペクトロスコピー[基礎編],培風館, p.165,1990

