

# 単位細骨材量が若材齢時のモルタルの超音波速度に及ぼす影響

Influence by Unit Fine Aggregate Content on Ultrasonic Wave Velocity of Mortar in the Period of Early Age

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 ○学生員 安澤 朋也(YASUZAWA Tomoya)

函館工業高等専門学校 環境システム工学専攻 学生員 大西 逸樹(ONISHI Itsuki)

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 澤村 秀治(SAWAMURA Shuji)

アイレック技建(株) 営業開発本部 永島 裕二(NAGASHIMA Yuji)

## 1. はじめに

コンクリートの自己収縮、マスコンクリートの温度応力、膨張コンクリートの膨張ひずみ発現のように、若材齢コンクリートの体積変化を扱う問題では、体積変化を発生させる駆動力とともに、若材齢時におけるコンクリートの強度発現・弾性係数の変化を的確に把握する必要がある。筆者らは、打設直後からコンクリートの超音波速度の変化を連続自動計測し、この結果より若材齢コンクリートの弾性係数の変化を推定する方法を示している<sup>1)2)</sup>。

若材齢コンクリートの超音波速度は、配合設計条件のうち、骨材条件の影響を強く受けると考えられる。超音波速度による若材齢コンクリートの弾性係数推定手法を汎用的なものにするためには、骨材の構成が超音波速度に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。これに対し我々は、若材齢コンクリート、およびセメントを石灰石粉末で置き換えて意図的に強度を低下させた疑似若材齢コンクリートを用い、骨材量や細骨材率が若材齢コンクリートの超音波速度、弾性係数に及ぼす影響を検討してきた<sup>3)</sup>。

しかしながら、これまでの検討手法では、若材齢コンクリートの超音波速度に対するセメントペーストの寄与、細骨材・粗骨材の寄与を分離して定量化することはできない。刻々とコンクリートの剛性が変化する若材齢時の挙動を扱うためには、超音波速度に対するセメントマトリックス部の強度発現の寄与、骨材の寄与を、時間と温度の関数として定量化することが必要である。

そこで本研究では、骨材が若材齢コンクリートの超音波速度に及ぼす影響を評価するための基礎資料を得ることを目的とし、その第一段階として、単位細骨材量が若材齢時のモルタルの超音波速度に及ぼす影響を実験的に検討し、時間とともに温度の影響をも考慮できる超音波速度計算モデルの提案を試みた。

## 2. 実験概要

本研究で使用した超音波計測用供試体を図-1 に示す。超音波プローブは厚さ0.1mmのステンレス粘着シートを介してコンクリートに密着し、型枠とコンクリートはエアキャップで絶縁され超音波が型枠を伝播しないような構造となっている。計測システムは、超音波速度測定器、計測制御・データ収録用のパーソナルコンピュータ、コンクリート温度計測用のデジタルデータロガー、プローブを装着したコンクリート供試体に一定の、あるいは変動する温度環境を与える恒温槽から構成されている。超音波速度の計測は、打設直後から開始し、自動計測によって15分間隔で記録された超音波受信波形から、超音波速度の変化を求める<sup>1)</sup>。

実験の要因と水準を表-1に示す。実験は先ずセメントペーストを対象に、打設・養生温度を10℃～30℃の間で5水準に設定した実験を行った。これより、セメントペースト部分の超音波速度の変化を把握するとともに、異なった温度条件における超音波伝播速度発現曲線を用いてアーレニウスの反応速度則に基づいたデータ処理を行い、セメントペースト部分の超音波伝播速度発現特性の温度依存性を定量化する。

次に、打設・養生温度を20℃に統一し、細骨材容積率  $S_c$  を0%～50%の間で6水準に設定したモルタルに対して超音波速度の変化を計測する実験を行う。これらの結果を基に、超音波速度に対するセメントペーストの寄与、細骨材の寄与を3.2節に示す方法によって分離推定する。

本実験で使用した材料の一覧を表-2に、セメントペースト・モルタルの配合を表-3に示す。実験では細骨材容積率によってモルタルのコンシステンシーが大きく変化し、空気量のコントロールが困難であるため、消泡剤を使用している。また、水セメント比は、セメントペースト、低細骨材容積率モルタルで材料分離を起こさない粘性が得られる40%に設定した。

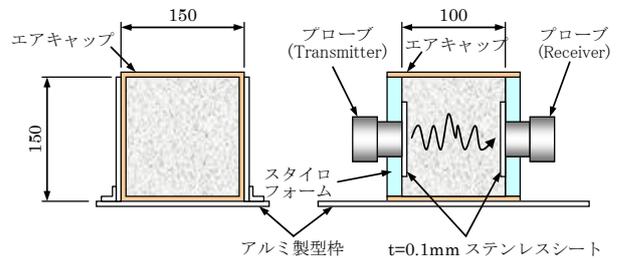


図-1 超音波計測用供試体

表-1 実験の要因と水準

種別	実験の要因	実験の水準
セメントペースト	打設・養生温度	5水準 10℃, 14℃, 20℃, 25℃, 30℃
モルタル	細骨材容積率	6水準 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%

表-2 使用材料一覧

名称	仕様等	密度(g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
細骨材	函館市豊原産天然砂	2.64
消泡剤	micro-air 404(100倍希釈)	1.00

表-3 セメントペースト・モルタルの配合

Name	W/C %	$S_c$ %	単位質量(g/liter)								
			W	C	S	消泡剤					
P4010	40	0	715	1815	0	10.9					
P4014											
P4020(MT4000)											
P4025											
P4030											
MT4010							10	639	1633	348	9.8
MT4020							20	562	1452	696	8.7
MT4030							30	476	1270	1054	7.6
MT4040							40	402	1089	1400	6.5
MT4050							50	314	907	1760	5.4

3. 実験結果および考察

3.1 セメントペーストの超音波速度発現特性の温度依存性

図-2 にセメントペースト供試体温度の経時変化を示す。温度履歴には水和熱による温度上昇が含まれており、5水準の打設・養生温度によって、その結果が大きく異なることがわかる。打設・養生温度を 30℃としたケースでは、ピーク温度が 73℃に達した。

図-3 にセメントペースト供試体の超音波速度の経時変化を示す。計測結果では、それぞれ滑らかな超音波速度の上昇が記録されており、また温度が高いほど強度発現が早まる傾向を明瞭に読み取ることができる。

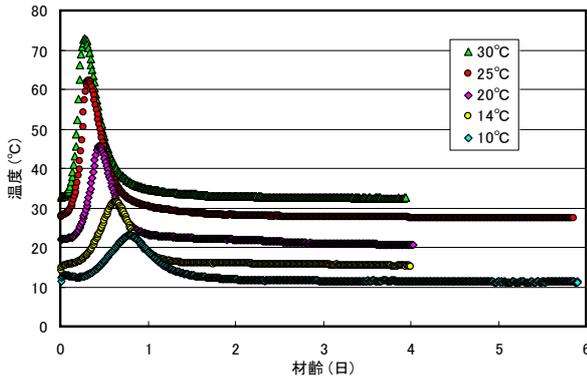


図-2 セメントペースト供試体温度の経時変化

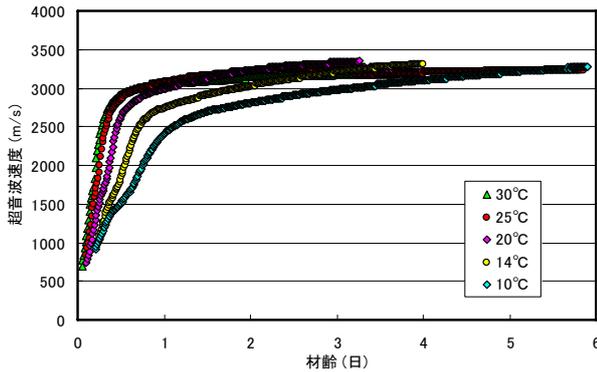


図-3 セメントペースト供試体超音波速度  $v_p$  の経時変化

セメントの水和反応は化学反応の一種であるため、その反応速度は温度の影響を著しく受ける。このような反応速度と反応温度の定量的な関係はアーレニウスの反応速度則を基にしたアーレニウスプロットにより整理することができる。本研究では、セメントペーストの超音波伝播速度の単位時間あたりの変化、すなわち超音波速度変化率 ( $dv_p/dt$ ) を反応速度を表すパラメータとみなし、アーレニウスプロットによる温度依存性の評価を行った。アーレニウスプロットにおける超音波速度変化率と温度の関係は、式-1 で表すことができる。

$$\ln\left(\frac{dv_p}{dt}\right) = \ln\left(\frac{dv_p}{dt}(T_s, v_p)\right) - \frac{E(v_p)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right) \quad \text{式-1}$$

ただし、 $v_p$  : セメントペーストの超音波速度 (m/s)

$T$  : セメントペーストの絶対温度 (°K)

$-E(v_p)/R$  : 活性化エネルギー (m/s<sup>2</sup>·°K/day)

$T_s$  : 基準温度 (293°K=20°C)

式-1 は超音波伝播速度変化率の対数  $\ln(dv_p/dt)$  と絶対温

度の逆数  $1/T$  の関係を表す直線の式である。直線の傾きは  $-E(v_p)/R$  に相当し、 $dv_p(v_p, T_s)/dt$  はセメントペーストの超音波速度が  $v_p$  になり、かつ温度が 20°C ( $T_s=293^\circ\text{K}$ ) であるときの超音波速度変化率である。

図-4 は式-1 に基づいたアーレニウスプロットを超音波速度別に 3D 表示したものである。x 軸が絶対温度の逆数  $1/T$ 、y 軸が超音波速度  $v_p$ 、z 軸が超音波速度変化率の対数  $\ln(dv_p/dt)$  となっている。アーレニウスプロットが良好な直線性を示すことから、セメントペーストの活性化エネルギーは  $1/T$  に対しては一定であり、超音波速度の増加に依存する値であることがわかる。

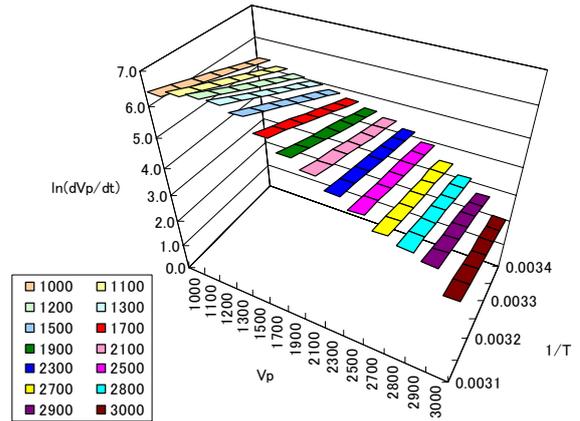


図-4 セメントペースト超音波速度  $v_p$  のアーレニウスプロット

図-5 に活性化エネルギーと超音波速度の関係、図-6 に基準超音波速度変化率と超音波速度の関係を示す。図-5 より明らかなように、活性化エネルギーは超音波速度に対して一定の値とはならない。超音波速度の変化の温度依存性を正しく評価するためには、活性化エネルギーを  $v_p$  の関数として扱わなければならないが、ここでは有効材齢の考え方をを用いて温度依存性を扱うこととした。

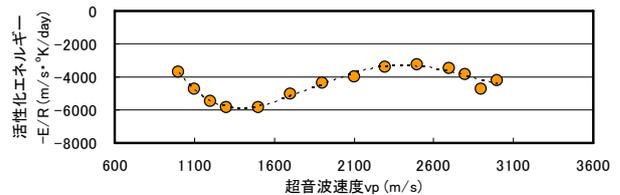


図-5 活性化エネルギーと超音波速度  $v_p$  の関係

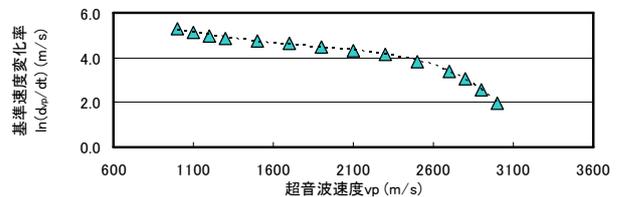


図-6 基準超音波速度変化率と超音波速度  $v_p$  の関係

有効材齢は、式-1 において活性化エネルギーが一定値、すなわち  $v_p$  の関数にならないと仮定した場合に相当する。式-2 にコンクリート標準示方書[設計編]で用いている有効材齢の式を示す。この式では活性化エネルギーを”4000”としていることになる。これに対して本研究では、図-5 で得られた活性化エネルギーの平均値”4435”を用い、式-3 に示す修正した有効材齢を用いることとした。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T/T_0} \right] \quad \text{式-2}$$

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot \exp \left[ 15.14 - \frac{4435}{273 + T/T_0} \right] \quad \text{式-3}$$

ただし、 $t_e$  : 有効材齢 (日)

$\Delta t$  : 温度が  $T$  である時間 (日)

$T$  : コンクリートの温度 (°C)

$T_0$  : 1°C

図-7 に、セメントペーストの超音波速度  $v_p$  と有効材齢(式-3)の関係を示す。有効材齢で整理することにより、温度水準が異なっても、セメントペーストの超音波速度の上昇傾向はほぼ同一のラインをたどることがわかる。これより、セメントペースト超音波速度の変化の温度依存性を、この有効材齢によって適切に表現できることがわかる。

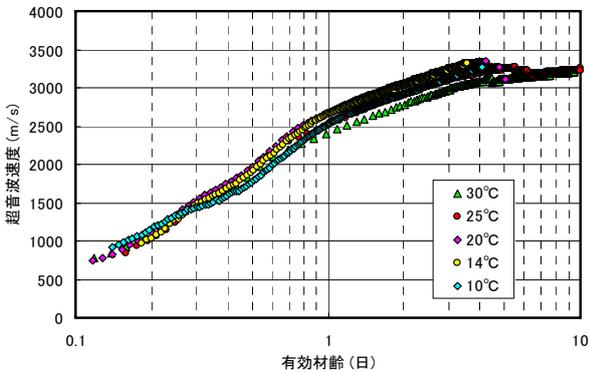


図-7 セメントペースト超音波速度  $v_p$  と有効材齢の関係

### 3.2 モルタルにおけるセメントペーストおよび細骨材の超音波速度の分離推定と定量化

ここでは、モルタル供試体に対する超音波速度の計測結果を、式-3の有効材齢を用いて整理し、モルタル中のセメントペーストおよび細骨材が、それぞれモルタルの超音波速度にどのように寄与するかをモデル化する。さらにこのモデルによって、超音波速度の計測値から、セメントペーストの超音波速度、細骨材の超音波速度を分離推定する。

図-8 にモルタル供試体温度の経時変化を示す。これらのデータは打設・養生温度がすべて 20°C に統一されているが、細骨材量が少なくセメントペーストが多いモルタルでは、水和熱による温度上昇が大きくなる。各ケースで温度履歴が異なるので、温度依存性を考慮した処理が必要である。

図-9 は、モルタル供試体超音波速度の経時変化を示している。材齢 0.4 日から 0.5 日付近で、供試体の温度上昇が大きいケースほど、超音波速度の上昇が大きいことがわかる。このように材齢で整理すると、超音波速度の計測結果には、細骨材量だけでなく、温度の影響も含まれることになる。

図-10 は、モルタルの超音波速度と有効材齢の関係を示したものである。図-9 と比較すると、細骨材容積率  $S_c$  が大きいほど超音波速度  $v_m$  が大きくなる傾向がより顕著になり、また超音波速度の上昇傾向もより滑らかになっているのがわかる。有効材齢を用いることにより、超音波速度の計測結果から温度の影響を取り除くことができ、温度依存性を適切に評価することができた。

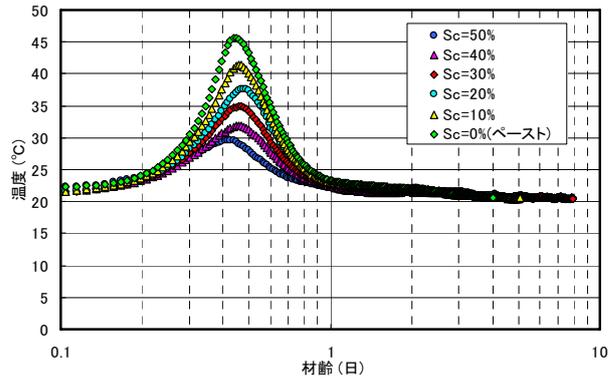


図-8 モルタル供試体温度の経時変化

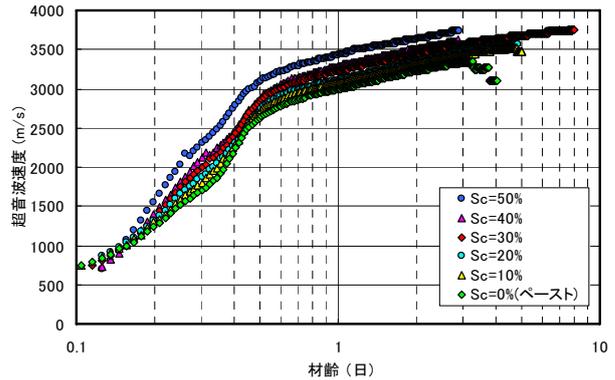


図-9 モルタル供試体超音波速度  $v_m$  の経時変化

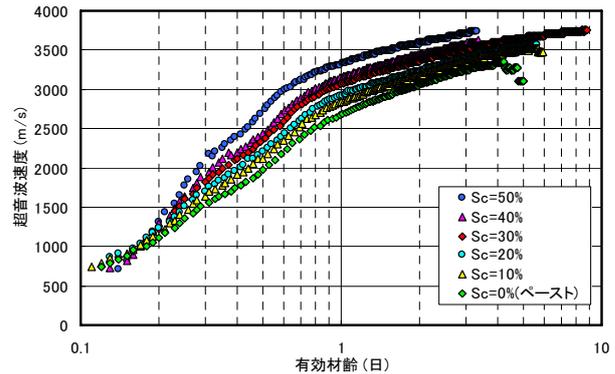


図-10 モルタル超音波速度  $v_m$  と有効材齢の関係

モルタルの超音波速度  $v_m$  は、セメントペーストの超音波速度  $v_p$  と細骨材の超音波速度  $v_s$  が合成されたものである。それぞれが絶対容積  $V_p, V_s$  によって  $v_m$  に寄与すると考えると、 $v_m$  と  $v_p, v_s$  の関係を式-4 でモデル化することができる<sup>4)</sup>。

$$\frac{1}{v_m} = \frac{(V_p/V_m)}{v_p} + \frac{(V_s/V_m)}{v_s} = \frac{1-S_c}{v_p} + \frac{S_c}{v_s} \quad \text{式-4}$$

ただし、 $v_m, V_m$  : モルタルの超音波速度, 絶対容積

$v_p, V_p$  : ペーストの超音波速度, 絶対容積

$v_s, V_s$  : 細骨材の超音波速度, 絶対容積

$S_c$  : 細骨材容積率,  $V_s = S_c \cdot V_m$

図-10 に示した、有効材齢で整理された  $v_m$  の実測値の中から、異なった細骨材容積率 ( $S_{c1}, S_{c2}$ ) を持つデータを組み合わせ、同一有効材齢におけるモルタル超音波速度 ( $v_{m1}, v_{m2}$ ) を用い、式-5 の連立方程式を解く。この手順で、その有効材齢におけるセメントペーストの超音波速度  $v_p$  と細骨材の超音波速度  $v_s$  を分離推定することができる。

$$\begin{cases} 1/v_{m1} = (1 - S_{c1})/v_p + S_{c1}/v_s \\ 1/v_{m2} = (1 - S_{c2})/v_p + S_{c2}/v_s \end{cases} \quad \text{式-5}$$

図-11, 図-12 は, 異なった細骨材容積率  $S_c$  を持つデータを二つ組み合わせ, 式-5 を解いて求めた細骨材の超音波速度  $v_s$ , およびセメントペーストの超音波速度  $v_p$  の計算値である。

図-11 では, 有効材齢が 1 日以降の範囲において細骨材の超音波速度の計算値は, ほぼ一定の値を示している。しかし, 1 日未満の超若材齢時の範囲では, 有効材齢の増加に伴い超音波速度も増加する結果となった。細骨材の超音波速度は, 材齢に関わらず一定であるはずである。このことは, モルタルが弾性体と見なせる範囲では式-4 のモデルが成り立つが, 弾性体とはいえない超若材齢域では, 細骨材粒子とセメントペーストの間に“インターフェース効果”のようなものを考慮しなければいけないことを示唆している。

図-12 に示したセメントペーストの超音波速度の計算値は, それぞれの組み合わせケースで完全に一致しており, さらに, モルタルの超音波速度から分離推定したセメントペーストの超音波速度と, セメントペーストの超音波速度の実測値も一致していることがわかる。このことから, 式-5 はセメントペーストの超音波速度を適切に推定できることがわかった。

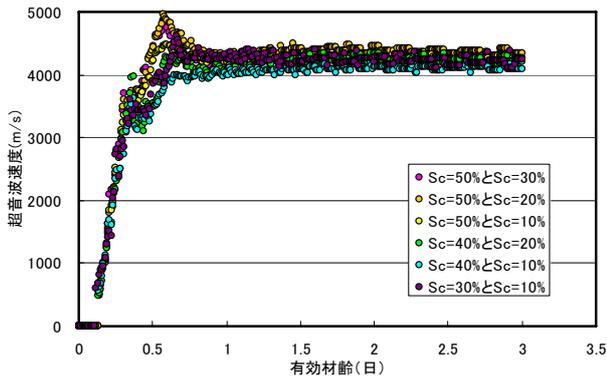


図-11 細骨材超音波速度  $v_s$  の計算値

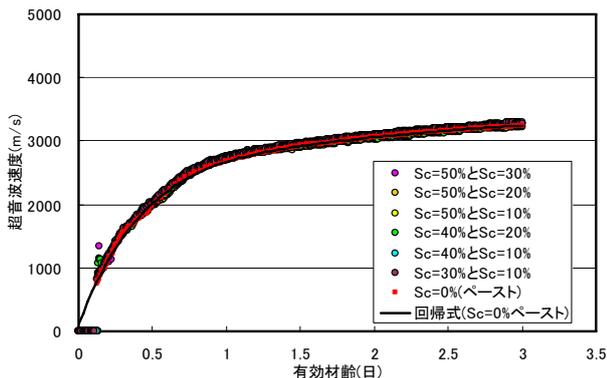


図-12 セメントペースト超音波速度  $v_p$  の計算値

### 3.3 超音波速度計算モデルの精度

図-13 は細骨材の超音波速度  $v_s$  を, 図-11 の有効材齢 1.5 日以降の平均値 4260m/s とし, セメントペーストの超音波速度  $v_p$  を図-12 に示した回帰式で定義し, 式-4 によりモルタルの超音波速度  $v_m$  を算出した結果である。細骨材量の少ない  $S_c=10\%$  のケースでは, 実測値と計算値は同一のライン上にあり, この配合における有効材齢 3 日目までのモルタルの超

音波速度は式-4 によって推定可能であることがわかる。しかし, 細骨材量の多い  $S_c=30\%$ ,  $50\%$  のケースでは, 有効材齢 0.3 日以降で式-4 は十分な推定精度を示すものの, 0.3 日未満の挙動を適切に表現できず, モルタルの超音波速度を大きめに推定することがわかる。これには, 図-11 において細骨材の超音波速度が若材齢時に低下していることと密接に関係しており, 今後はこの超若材齢時の挙動の定量化, モデル化が課題である。

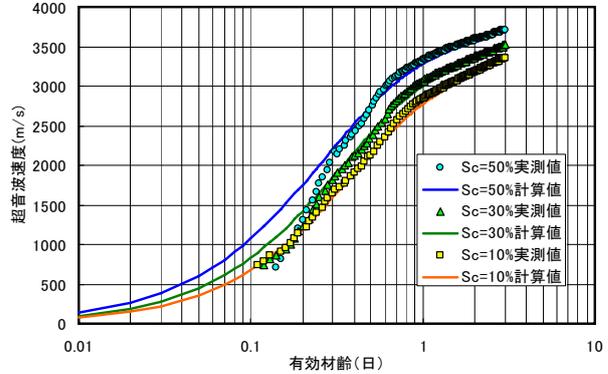


図-13 モルタル超音波速度の計算値と実測値

### 4. まとめ

本研究では, 若材齢時のセメントペーストおよびモルタルの超音波速度の変化を測定し, 超音波速度に対する細骨材量の寄与について検討を行った。その結果, 以下のような知見を得た。

- ① セメントペーストの超音波速度発現特性の温度依存性は, アーレニウスの反応速度則でモデル化できる。この結果を基に, 修正した有効材齢(式-3)を示した。
- ② モルタルの超音波速度は, セメントペーストの超音波速度  $v_p$ , 細骨材の超音波速度  $v_s$  および細骨材容積率  $S_c$  の関数(式-4)としてモデル化できる。
- ③ 異なった細骨材容積率を与えたモルタルの超音波速度の計測結果を組み合わせることにより, セメントペーストの超音波速度  $v_p$ , 細骨材の超音波速度  $v_s$  を分離して推定することができた。
- ④ 式-4 によるモルタル超音波速度  $v_m$  の計算モデルは, 全体としては実用的に十分な精度を有するものの, 有効材齢 0.3 日未満の精度については検討が必要である。

### 参考文献

- 1) 澤村秀治, 須藤卓哉, 丸山久一, 永島裕二: 超音波伝播速度による水和熱抑制型膨張コンクリートの強度発現特性の評価, コンクリート工学年次論文集, 第29巻, pp.705-710, 2007.7
- 2) 須藤卓哉, 川尻峻三, 澤村秀治, 永島裕二: 超音波伝播速度を用いた膨張コンクリートの弾性係数推定法に関する研究, 平成18年度土木学会北海道支部論文報告集, E-20, 2007.2
- 3) 澤村秀治, 丸山久一, 永島裕二: 若材齢コンクリートの超音波速度と弾性係数に対する骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, 第30巻, pp.525-530, 2008.7
- 4) Yiching Lin, Chao-Peng Lai, Tsong Yen: "Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity(UPV) in Concrete", ACI Materials Journal, V.100, No.1, January-February 2003, pp.21-28