

# 論文 強度発現途上にあるコンクリートの超音波速度における粗骨材量の影響の定量化

澤村 秀治\*1・安澤 朋也\*2・丸山 久一\*3・永島 裕二\*4

**要旨:** コンクリートの超音波速度は、細骨材量や粗骨材量など材料の構成の影響を強く受け、セメントマトリックス強度が小さい強度発現途上の若材齢コンクリートでは、その傾向が著しい。したがって、超音波計測の結果を汎用的なものとするためには、骨材量の影響を適切に評価しなければならない。本研究では、骨材の超音波速度がその容積率に応じてコンクリートの超音波速度に寄与するとしたモデルを考え、今回は特に粗骨材量がコンクリートの超音波速度に及ぼす影響の定量化を試みた。その結果、提案した計算モデルが、コンクリートの超音波速度に対する粗骨材量の影響を適切に評価できることを明らかにした。

**キーワード:** 若材齢コンクリート, 超音波速度, 骨材容積率, アーレニウスプロット, 有効材齢

## 1. はじめに

コンクリートの自己収縮、膨張コンクリートの膨張ひずみ発現のように、強度発現途上にある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)</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、骨材量の影響を強く受ける<sup>2)</sup>。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、骨材量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。これに対し筆者らは、若材齢モルタルを対象に、超音波速度計測結果から、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し、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、細骨材量の影響を時間と温度の関数として定量化することを検討してきた<sup>3)</sup>。

本研究では粗骨材を含むコンクリートを対象に、粗骨材容積率が若材齢コンクリート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>。

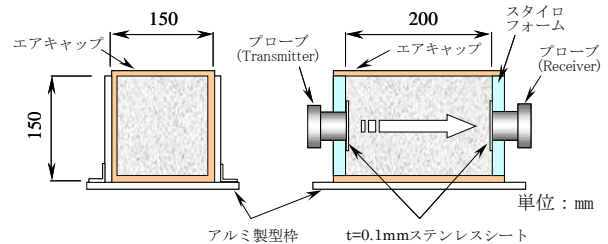


図-1 超音波自動計測用供試体の概要

実験の要因と水準を表-1に示す。実験は先ずモルタルを対象に、打設・養生温度を 11℃~31℃の間で 7 水準に設定して実験を行った。これより、モルタル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と温度履歴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った。これにより、モルタル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。

表-1 実験の要因と水準

種別	実験の要因	実験の水準	
モルタル	打設/養生温度	7水準	11℃, 13℃, 17℃, 20℃, 25℃, 29℃, 31℃
コンクリート	粗骨材容積率	6水準	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%

\*1 函館工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工修 (正会員)

\*2 函館工業高等専門学校 環境システム工学専攻

\*3 長岡技術科学大学 環境・建設系教授 Ph.D. (正会員)

\*4 アイレック技建株式会社 営業開発本部

次に、打設・養生温度を 20℃に統一し、粗骨材容積率  $G_c$  を 0%~50%の間で 6 水準に設定したコンクリートに対して、超音波速度の変化を計測する実験を行った。これらの結果を基に、超音波速度に対するモルタルの寄与、粗骨材の寄与を 3.3 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、モルタル・コンクリートの示方配合を表-3 に示す。水セメント比は、モルタルおよび低粗骨材容積率コンクリートで材料分離を起こさない粘性が得られると判断された 45%に設定した。また、粗骨材を除いたモルタル部分の細骨材容積率  $S_c$  については、全ての供試体で 40%としている。

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
粗骨材	峯朗産碎石(2005)	2.70

表-3 モルタル・コンクリートの示方配合

Name	W/C	Sc	Gc	単位質量 (g/liter)			
	%	%	%	W	C	S	G
MT454011	45	40	0	352	783	1056	0
MT454013							
MT454017							
MT454020 (C454000)							
MT454025							
MT454029							
MT454031							
C454010	10	317	705	950	270		
C454020	20	282	626	845	540		
C454030	30	247	548	739	810		
C454040	40	211	470	634	1080		
C454050	50	176	391	528	1350		

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 モルタルの超音波速度発現特性の温度依存性

図-2 にモルタル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、7 水準の打設・養生温度によって、水和発熱の性状が大きく異なるため、その結果、温度履歴に大きな差を生じている。

図-3 にモルタル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超音波速度の増加、すなわち強度発現が早まる傾向が明らかである。

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、モルタルの超音波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 ( $dv_m/dt$ ) 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<sup>4)</sup>。

$$\ln\left(\frac{dv_m}{dt}\right) = \ln\left(\frac{dv_m}{dt}(T_s, v_m)\right) - \frac{E(v_m)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right) \quad (1)$$

$v_m$  : モルタルの超音波速度 (m/s)

$T$  : モルタルの絶対温度 (°K)

$-E(v_m)/R$  : 活性化エネルギー (m/s・°K/day)

$T_s$  : 基準温度 (293°K=20°K)

式(1)は超音波伝播速度変化率の対数  $\ln(dv_m/dt)$  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  $-E(v_m)/R$  に相当し、 $dv_m(v_m, T_s)/dt$  はモルタルの超音波速度が  $v_m$  になり、かつ温度が 20°K ( $T_s=293°K$ ) 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  $v_m$ 、z 軸が超音波速度変化率の

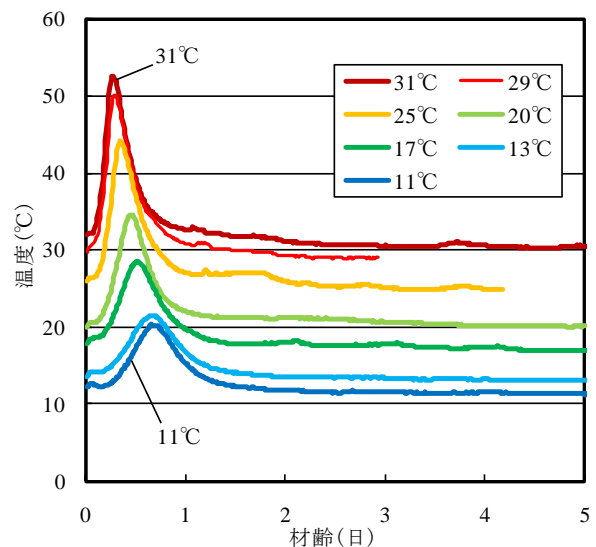


図-2 モルタル供試体温度の経時変化

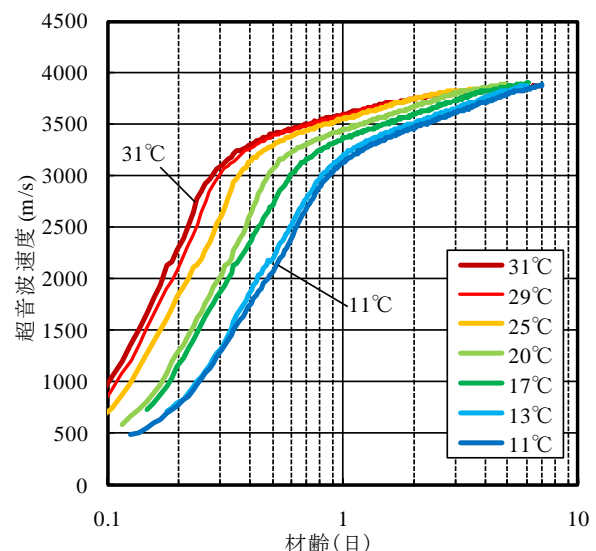


図-3 モルタル供試体超音波速度  $v_m$  の経時変化

対数  $\ln(dv_m/dt)$  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、活性化エネルギーは  $1/T$  に対しては一定値としてよい。一方、超音波速度の水準によってアーレニウスプロットの傾きが変化するので、活性化エネルギーは超音波速度の増加に依存する。

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

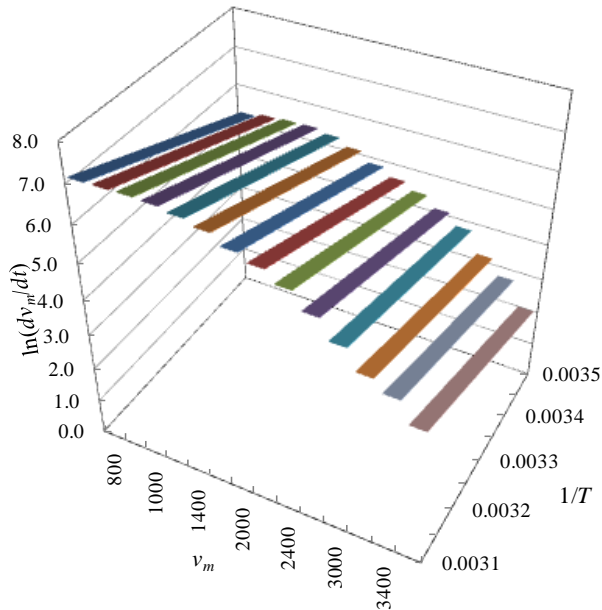


図-4 モルタル超音波速度  $v_m$  のアーレニウスプロット

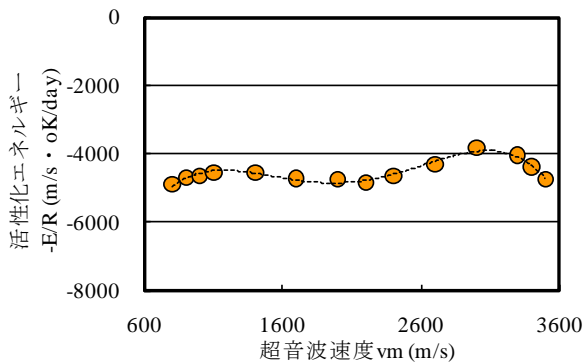


図-5 活性化エネルギーと超音波速度  $v_m$  の関係

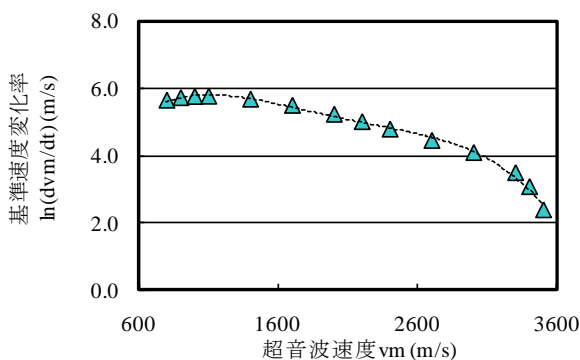


図-6 基準超音波速度変化率と超音波速度  $v_m$  の関係

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  $v_m$  の関数として扱うべきであるが、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。

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  $v_m$  の関数にならないと仮定した場合に相当する<sup>4)</sup>。式(2)に土木学会・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“-4536”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。

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

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 15.48 - \frac{4536}{273 + T/T_0} \right] \quad (3)$$

$\Delta t_i$  : 温度が  $T$  である時間 (日)

$T$  : コンクリートの温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$  :  $1^{\circ}\text{C}$

図-7 に、モルタルの超音波速度  $v_m$  と有効材齢: 式(3) の関係を示す。温度履歴がまったく異なる条件で得られたデータであっても、有効材齢で整理することによって、モルタルの超音波速度のカーブは同一のラインに集まる。したがって、モルタル超音波速度の変化の温度依存性は、式(3)によって適切に表現できることがわかる。

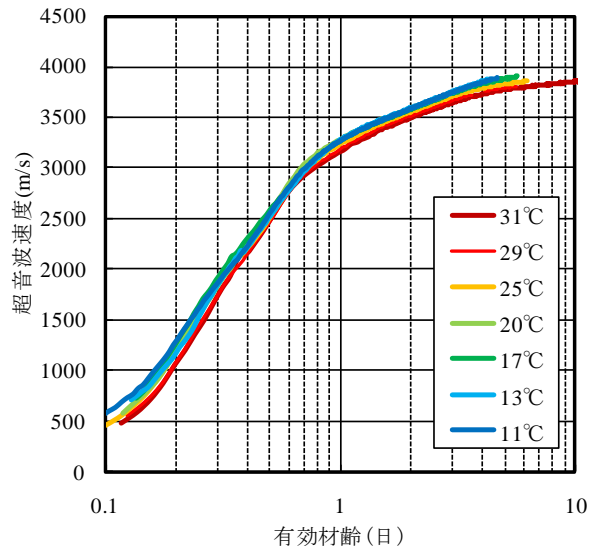


図-7 モルタル超音波速度  $v_m$  と有効材齢の関係

### 3.2 有効材齢によるコンクリート超音波速度の処理

粗骨材を含むコンクリートの計測では、表-1 のように粗骨材容積率  $G_c$  を変化させると、それに伴って単位セメント量に変化する。その結果、水和熱による温度上昇の程度が大きく異なるため、打込み温度を統一したとしても、それぞれのケースで供試体は異なった温度履歴を受けてしまう。コンクリートの超音波速度変化率、すな

わち強度発現速度は温度の影響を受けるので、このままでは統一した評価ができない。

図-8 に、コンクリート供試体の温度履歴を示す。粗骨材容積率  $G_c$  が小さいほど単位セメント量が大きくなるため、 $G_c$  が小さくなるにしたがって温度上昇が大きくなる。 $G_c=0\%$  のケースと  $G_c=50\%$  のケースでは、ピーク温度に  $10^\circ\text{C}$  程度の差が存在する。

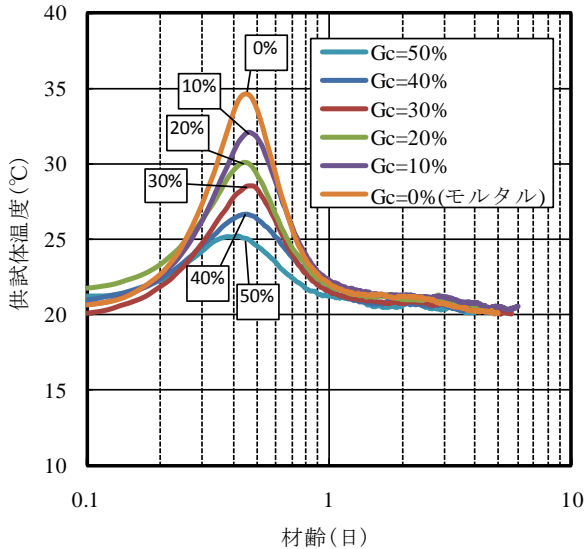


図-8 コンクリート供試体温度の経時変化

図-9 にコンクリートの超音波速度  $v_c$  と実材齢の関係を示す。コンクリート温度が高いときには超音波速度の変化が早まるため、ピーク温度となる材齢  $0.3\sim 0.6$  日付近で超音波速度の上昇カーブに乱れを生じている。同一材齢における比較では、それぞれの  $G_c$  のケースのコンクリートは異なったマチュリティーとなっている。

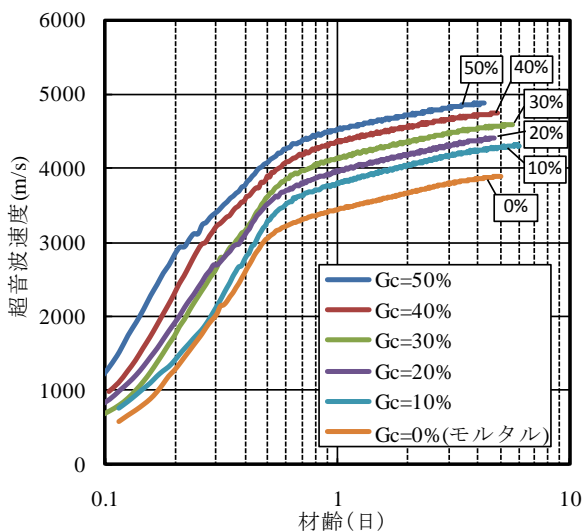


図-9 コンクリート超音波速度  $v_c$  と材齢の関係

3.3 節で行うモルタル超音波速度  $v_m$  と粗骨材超音波速度  $v_g$  の分離推定では、同一マチュリティーのデータを組み合わせることが必要である。ここで、3.1 節で求めた

有効材齢を用いることにより、温度履歴が異なる超音波計測データを統一して扱うことができるようになる。

図-10 は、コンクリートの超音波速度と式(3)の有効材齢の関係を示したものである。有効材齢で整理すると、粗骨材容積率  $G_c$  が大きいほどコンクリートの超音波速度  $v_c$  が大きくなる傾向がより明瞭になり、それぞれの超音波速度の上昇カーブが平行に並ぶようになることがわかる。ここでは、有効材齢を用いることによって、超音波速度の計測結果に含まれる温度履歴の違いの影響を、取り除くことができたと考える。

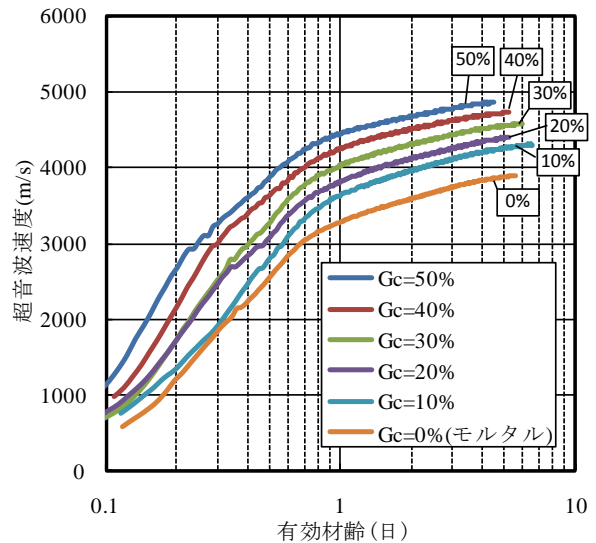


図-10 コンクリート超音波速度  $v_c$  と有効材齢の関係

### 3.3 コンクリートにおけるモルタルおよび粗骨材の超音波速度の分離推定と定量化

ここでは、コンクリート中のモルタルおよび粗骨材が、それぞれコンクリートの超音波速度にどのように寄与するかをモデル化し、そのモデルを用いて、超音波速度の計測値から、モルタルの超音波速度、粗骨材の超音波速度を分離推定する。

コンクリートの超音波速度  $v_c$  は、モルタルの超音波速度  $v_m$  と粗骨材の超音波速度  $v_g$  が合成されたものである。それぞれが絶対容積  $V_m, V_g$  によって  $v_c$  に寄与すると考えると、 $v_c$  と  $v_m, v_g$  の関係を式(4)のようにモデル化することができる<sup>5)</sup>。

$$\frac{1}{v_c} = \frac{(V_m/V_c)}{v_m} + \frac{(V_g/V_c)}{v_g} = \frac{1-G_c}{v_m} + \frac{G_c}{v_g} \quad (4)$$

$v_c, V_c$  : コンクリートの超音波速度, 絶対容積  
 $v_m, V_m$  : モルタルの超音波速度, 絶対容積  
 $v_g, V_g$  : 粗骨材の超音波速度, 絶対容積  
 $G_c$  : 粗骨材容積率,  $V_g = G_c \cdot V_c$

図-10 に示した、有効材齢で整理された  $v_c$  の実測値の中から、異なった粗骨材容積率( $G_{c1} \cdot G_{c2}$ )を持つデータを組み合わせ、同一有効材齢におけるコンクリート超音

波速度( $v_{c1} \cdot v_{c2}$ )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モルタルの超音波速度  $v_m$  と粗骨材の超音波速度  $v_g$  を分離推定することができる。

$$\begin{cases} 1/v_{c1} = (1-G_{c1})/v_m + G_{c1}/v_g \\ 1/v_{c2} = (1-G_{c2})/v_m + G_{c2}/v_g \end{cases} \quad (5)$$

図-11、図-12 は、異なった粗骨材容積率  $G_c$  を持つデータを二つ組み合わせ、式(5)を解いて求めた粗骨材超音波速度  $v_g$ 、およびモルタル超音波速度  $v_m$  の計算結果を有効材齢で整理したものである。

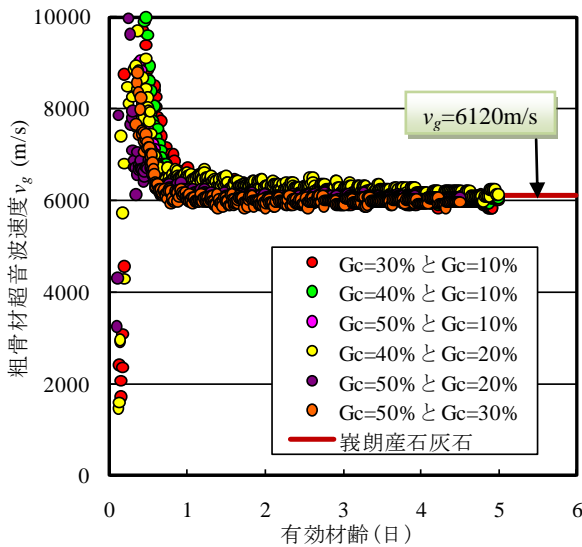


図-11 粗骨材超音波速度  $v_g$  の計算値

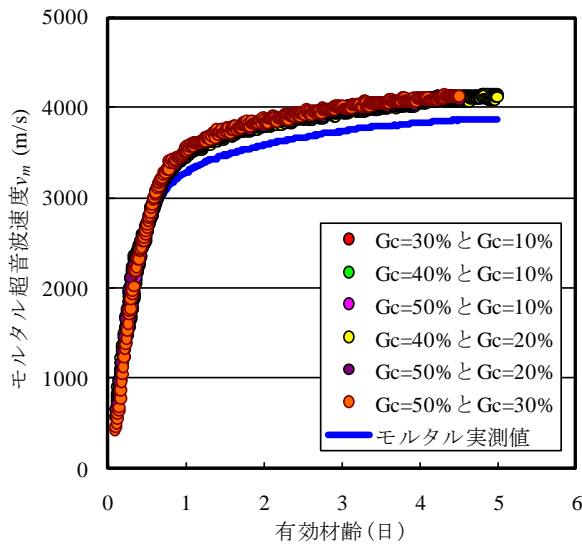


図-12 モルタル超音波速度  $v_m$  の計算値

図-11 では、有効材齢が1日以降の範囲において粗骨材の超音波速度  $v_g$  の計算値は、ほぼ一定の値を示している。これは粗骨材として用いている峯朗産石灰石の円柱供試体から得られた超音波速度の実測値 6120m/s と同程度の値となった。しかし、1日未満の超若材齢域では、粗骨材超音波速度は一定の値とはならず、大きな変動を

示した。粗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が、粗骨材超音波速度の計算値は有効材齢 0.3~0.4 日付近でピークに達し、その後、一定の値に収束していく。強度発現が進みモルタル部が弾性体と見なせるような範囲では式(4)でコンクリートの超音波速度  $v_c$  を実用上十分な精度でモデル化できるものの、有効材齢 0.5 日未満での適合性を確保するためには、式(4)の補正を検討する必要がある。

図-12 では、モルタルの超音波速度の計算値は、全ての粗骨材容積率  $G_c$  の組み合わせで良好な一致を示した。ただし、その値はモルタル供試体( $G_c=0\%$ )の超音波速度の実測値より 6%程度大きな値となっており、式(4)でコンクリートの超音波速度  $v_c$  を求める場合には、モルタル超音波速度  $v_m$  の補正が必要である。

### 3.4 超音波速度計算モデルの精度

ここでは、粗骨材超音波速度  $v_g$  を峯朗産石灰石の実測値である 6120m/s を用いることとして、モルタル超音波速度  $v_m$  を実測値の回帰式で定義する場合(Case1)と、モルタル超音波速度  $v_m$  を計算値と実測値の差を考慮して補正する場合(Case2)のそれぞれについて、式(4)によりコンクリートの超音波速度  $v_c$  を算出し、その結果および精度について検討する。

図-13 の Case1 では、全ての  $G_c$  の水準において、実測値と計算値に差が生じていることがわかる。これは、分離推定した粗骨材の超音波速度が有効材齢1日未満において一定値を示していないこと、また分離推定したモルタル超音波速度が、モルタル供試体の実測値よりも高いことが表れており、計算値はコンクリートの超音波速度  $v_c$  を小さめに評価する。このことから、 $v_m$  実測値をそのまま用いるだけでは、式(4)のモデルによるコンクリート超音波速度  $v_c$  の推定は、十分な精度が得られないことが明らかになった。

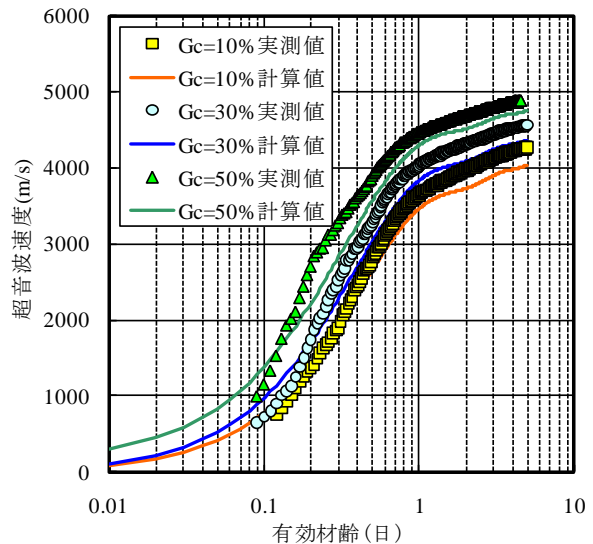


図-13 超音波速度  $v_c$  の計算値と実測値(Case1)

図-14 に図-12 で示したモルタル超音波速度  $v_m$  の実測値に対する計算値の比率と有効材齢の関係を示す。これによると、有効材齢 0.5 日未満ではばらつきがあるが、有効材齢 0.5 日以降になると  $v_m$  実測値に対する  $v_m$  計算値の比率は概ね一定となり、その平均値は 1.064 となった。Case2 では、この値を用いて補正した  $v_m$  実測値を用いる。

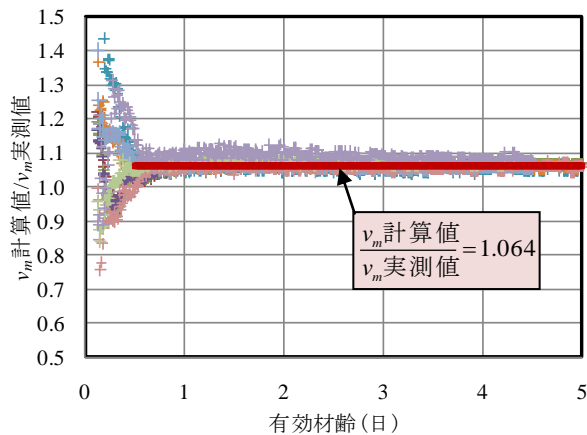


図-14  $v_m$  計算値/ $v_m$  実測値の経時変化

図-15 の Case2 では、モルタル超音波速度  $v_m$  に実測値を 1.064 倍した値を用い、式(4)によりコンクリートの超音波速度  $v_c$  を求めた。このように  $v_m$  を補正することによって、有効材齢が 0.5 日以上範囲に限れば、式(4)のモデルでコンクリートの超音波速度を精度良く推定できることがわかる。しかし、有効材齢 0.5 日未満の範囲では、粗骨材容積率が 30%、50%と大きくなるにしたがって、 $v_c$  の実測値と計算値は乖離するようになり、粗骨材容積率が大きいと、式(4)のモデルでは十分な精度が得られない。有効材齢 0.5 日未満の超若材齢域では、図-11 に見られたように粗骨材超音速度  $v_g$  の計算値が大きく変動しており、超若材齢域での精度を確保するためには、これらの要因について詳細な検討が必要である。

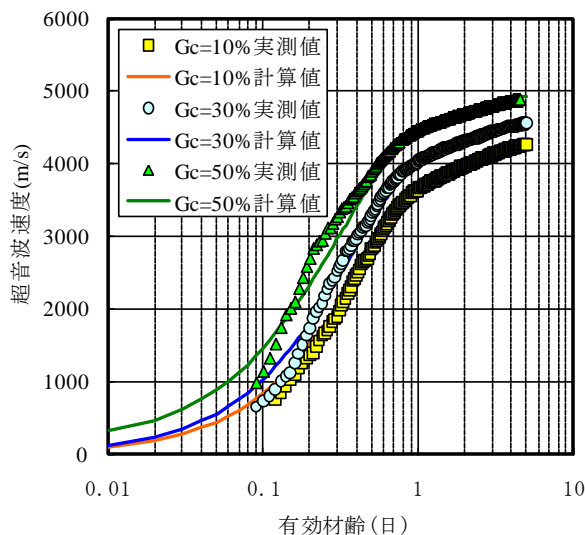


図-15 超音波速度  $v_c$  の計算値と実測値(Case2)

#### 4. まとめ

本研究では、強度発現途上のモルタルおよびコンクリートの超音波速度の変化を連続的に測定し、モルタルの超音波速度発現特性の温度依存性の定量化、およびコンクリートの超音波速度に対する粗骨材量の寄与のモデル化を行った。その結果、以下のような知見を得た。

- ① モルタル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。修正有効材齢を用いることにより、温度の影響を適切に考慮することができる。
- ② コンクリートの超音波速度は、モルタルの超音波速度  $v_m$ 、粗骨材の超音波速度  $v_g$  および粗骨材容積率  $G_c$  の関数としてモデル化できる【式(4)】。
- ③ 異なった粗骨材容積率を与えたコンクリートの超音波速度の計測結果を組み合わせることにより、モルタルの超音波速度  $v_m$ 、粗骨材の超音波速度  $v_g$  を分離して推定することができた。
- ④ 式(4)によるコンクリート超音波速度  $v_c$  の計算モデルは、モルタルの超音波速度  $v_m$  を補正することにより、有効材齢 0.5 日以降では実用的に十分な精度を示すが、有効材齢 0.5 日未満の領域における精度確保が今後の課題である。

謝辞：本研究は、平成 21 年度科学研究費補助金 基盤研究(C) 課題番号：21560492 (代表：澤村秀治) により遂行したものである。ここに記して謝意を表する。

#### 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脹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) 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
- 3) 安澤朋也, 大西逸樹, 澤村秀治, 永島裕二: 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, 平成 20 年度土木学会北海道支部論文報告集, E-20, 2009.1
- 4) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp.140-149, 1997.6
- 5) Yiching Lin, Chao-Peng Lai, Tsong Yen: Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity(UPV) in Concrete, ACI Materials Journal, V.100, No.1, pp.21-28, January-February 2003