

単位粗骨材量が若材齢時のコンクリートの超音波速度に及ぼす影響

Influence by Unit Coarse Aggregate Content on Ultrasonic Wave Velocity of Concrete in the Period of Early Age

函館工業高等専門学校 環境システム工学専攻 ○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¹⁾²⁾．

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，若材齢モルタルの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の寄与，細骨材の寄与を，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³⁾．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，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が必要である．

そこで本研究では，粗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ことを目的として，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，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¹⁾．

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，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．

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 3.2 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，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 45%に設定した．また，モルタル部の細骨材容積率 S_c については全ての供試体で 40%としている．

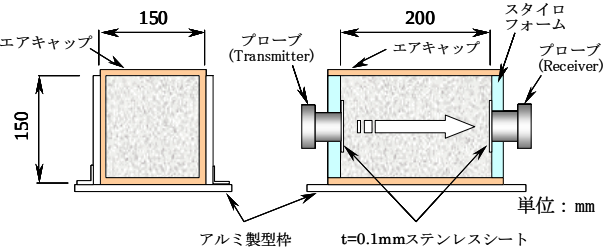


図-1 超音波計測用供試体

表-1 実験の要因と水準

種別	実験の要因	実験の水準
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%

表-2 使用材料一覧

名称	仕様等	密度(g/cm ³)
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	義朗産砕石(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	40	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、その結果が大きく異なることがわかる。

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。

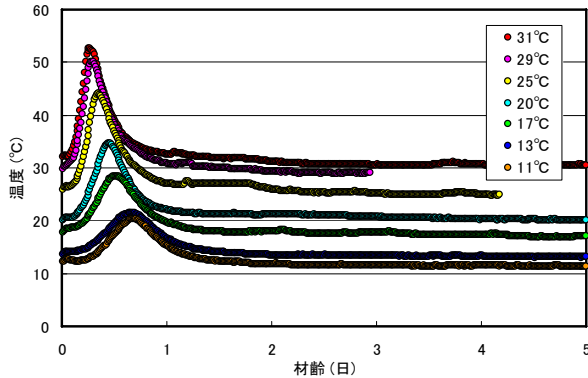


図-2 モルタル供試体温度の経時変化

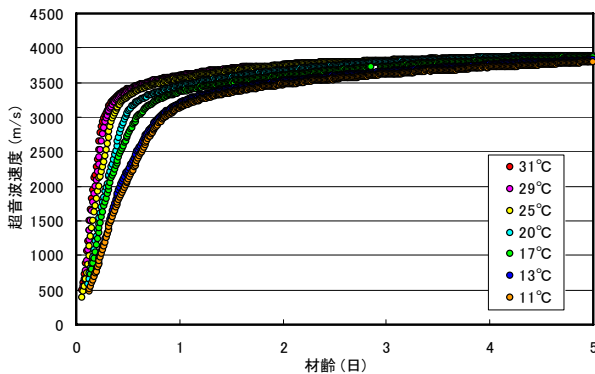


図-3 モルタル供試体超音波速度 v_m の経時変化

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_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。

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

ただし、 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°C)

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°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_m 、z 軸が超音波速度変化率の対数 $\ln(dv_m/dt)$ 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、モルタル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。

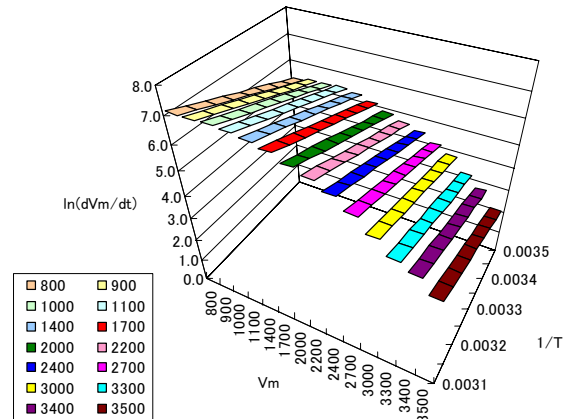


図-4 モルタル超音波速度 v_m のアーレニウスプロット

図-5 に活性化エネルギーと超音波速度の関係を示す。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_m 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。

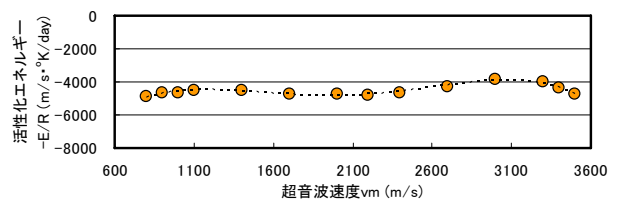


図-5 活性化エネルギーと超音波速度 v_m の関係

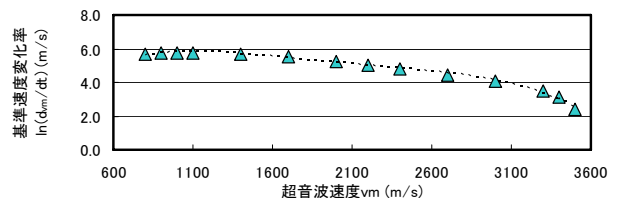


図-6 基準超音波速度変化率と超音波速度 v_m の関係

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。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“-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。

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

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

ただし、 t_e : 有効材齢(日)

Δt_i : 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、モルタルの超音波速度 v_m と修正有効材齢(式-3)の関係を示す。修正有効材齢で整理することにより、温度水準が異なっても、モルタル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、モルタル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。

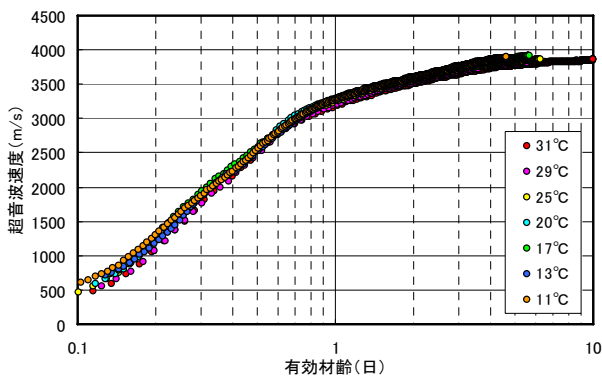


図-7 モルタル超音波速度 v_m と有効材齢の関係

3.2 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。

図-8 は、コンクリートの超音波速度と有効材齢(式-3)の関係を示したものである。粗骨材容積率 G_c が大きいほど超音波速度 v_c が大きくなる傾向が顕著であり、また超音波速度の上昇傾向も滑らかなのがわかる。これより、修正有効材齢を用いることで、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。

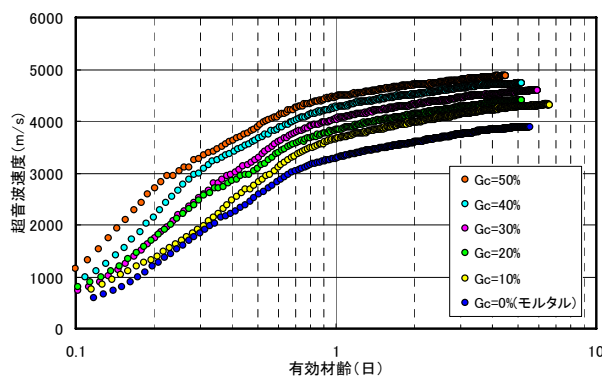


図-8 コンクリート超音波速度 v_c と有効材齢の関係

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 でモデル化することができる⁴⁾。

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

ただし、 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-8 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}, 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}, 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。

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

図-9、図-10 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の超音波速度 v_g 、およびモルタルの超音波速度 v_m の計算値である。

図-9 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の計算値は、ほぼ一定の値を示している。これは、峯朗産石灰石からコアを抜き取り、超音波速度を測定した結果である 6120m/s とほぼ同じ値となっている。しかし、1日未満の超若材齢時の範囲では、超音波速度は一定の値とはならず、ばらついた値となってしまう。有効材齢の進行に伴い超音波速度が増加していき、実測値である 6120 m/s を超え 0.3~0.4 日付近でピークに達し、その後、有効材齢の増加とともに超音波速度が減少し一定の値に収束していく結果となった。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。このことは、コンクリート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、粗骨材粒子とモルタルの間に、粗骨材の見掛けの超音波速度を変化させる何らかの要因があることを示唆している。

図-10 に示したモルタル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いることがわかる。これより、式-5 はコンクリート中のモルタルの見かけの超音波速度を適切に推定できることがわかる。しかし、実測値と計算値を比較すると、モルタル超音波速度の実測値と分離推定した計算値は異なった値を示しており、計算値は実測値よりも5%程度速い超音波速度を示した。このことは、コンクリート内部では、モルタルの見掛けの超音波速度を上昇させる何らかの要因があり、それを考慮する必要があることを示唆している。

3.3 超音波速度計算モデルの精度

ここでは、ケース1(粗骨材超音波速度 v_g をコアの実測値である 6120m/s、モルタル超音波速度 v_m を実測値の回帰式で定義)と、ケース2(粗骨材超音波速度 v_g をコアの実測値であ

る 6120m/s, モルタル超音波速度 v_m を分離推定結果の回帰式で定義)の条件において, 式-4 によりコンクリートの超音波速度 v_c を算出した結果の精度について検討する.

図-11 のケース 1 の場合では, 全ての水準において, 全体的な精度があまりよくないということがわかる. これは, 分離推

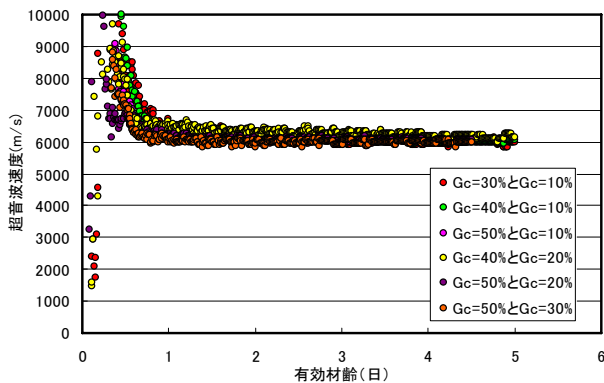


図-9 粗骨材超音波速度 v_g の計算値

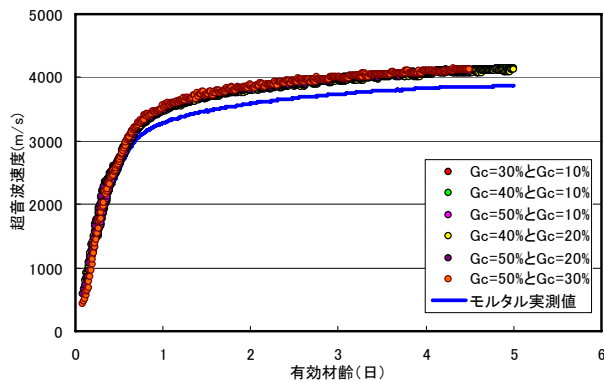


図-10 モルタル超音波速度 v_m の計算値

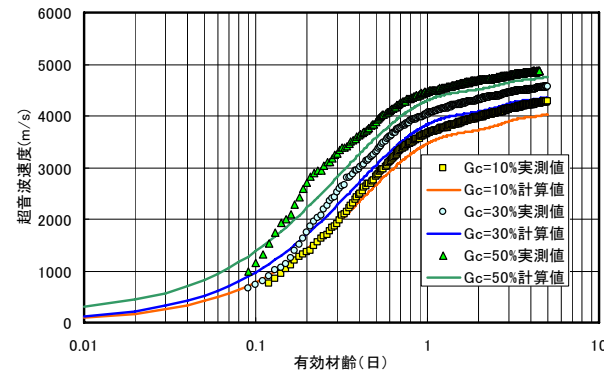


図-11 コンクリート超音波速度の計算値と実測値(ケース 1)

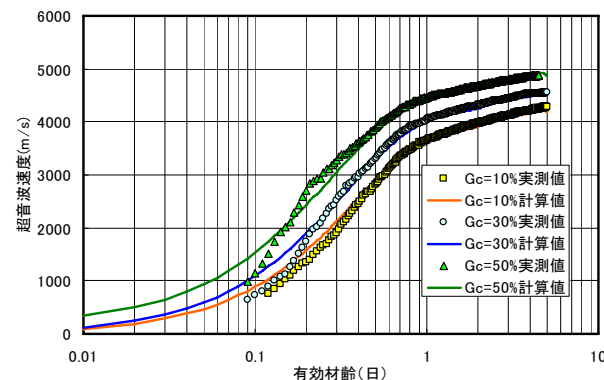


図-12 コンクリート超音波速度の計算値と実測値(ケース 2)

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となっていないこと, また分離推定したモルタルの超音波速度が実測値よりも高いということと密接に関連している. このことから, 実測値をそのまま代入するだけでは, 式-4 のモデルは成り立たないことがわかる.

図-12 のケース 2 の場合では, 有効材齢 0.5 日以降の範囲において, コンクリートの超音波速度を精度良く推定できていることがわかる. しかし, 0.5 日未満については, 粗骨材容積率が小さい場合はある程度の推定精度を示すものの, 粗骨材容積率が 30%, 50%と大きくなるに従って, 挙動を適切に表現することができないという結果になっている. このことから, 今後は超若材齢域における粗骨材超音波速度のモデル化・定量化が課題となる.

4. まとめ

本研究では, 若材齢時のモルタルおよびコンクリートの超音波速度の変化を測定し, 超音波速度に対する粗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 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.
- 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(式-4)としてモデル化できる.
- 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, 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 0.5 日未満については検討が必要である.

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) 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) 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