

粗骨材容積率を考慮した若材齢コンクリートの超音波速度のモデル化

Modeling of Ultrasonic Wave Velocity of Early Age Concrete Considered Absolute Volume Ratio of Coarse Aggregate

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 環境都市工学科 村上 紘稀(MURAKAMI Koki)
 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

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より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の超音波速度計測結果から、超音波速度に対するモルタル部の強度発現の寄与、粗骨材の寄与を分離定量化し、精度の高い超音波速度計算モデルを提案することを試みてきた³⁾。しかしながら、既往の研究で用いてきた超音波伝播時間を基にした計算モデルでは、コンクリート内部での粗骨材の超音波速度を適切に定量化することができず、その結果、超若材齢域におけるコンクリートの超音波速度を精度よく評価することができていない。

そこで本研究では、より精度の高い超音波速度計算モデルの構築を目的として、既往のモデルとは異なる新たな超音波速度計算モデルを提案し、そのモデルを用い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について検討を行った。

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。コンクリートを打設した供試体は、20℃一定に設定した恒温槽の中で養生し、自動計測システムによって超音波速度の測定を行った。超音波速度の計測は打設直後から開始し、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。実験はコンクリートを対象に行い、水セメント比 W/C を 40%、45% の 2 水準、粗骨材容積率 G_c を 0%～50%の間で 6 水準に設定して実験を行った。これらの結果を基に、新たな超音波速度計算モデルを用いて、超音波速度に対するモルタル部の寄与、粗骨材の寄与の定量化を行う。

本実験で使用した材料の一覧を表-2 に、コンクリートの示方配合を表-3 に示す。水セメント比については、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 40%、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。

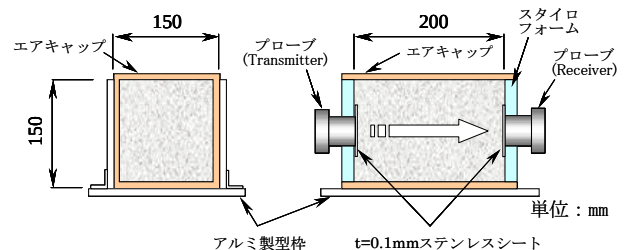


図-1 超音波計測用供試体

表-1 実験の要因と水準

種別	実験の要因	実験の水準
コンクリート	水セメント比	2水準 40%, 45%
	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	嵯朗産碎石(2005)	2.70

表-3 コンクリートの示方配合

Name	W/C	S_c	G_c	単位質量(g/liter)			
	%	%	%	W	C	S	G
C404000(モルタル)			0	335	838	1056	0
C404010	40	40	10	302	754	950	270
C404020			20	268	670	845	540
C404030			30	235	586	739	810
C404040			40	201	503	634	1080
C404050			50	168	419	528	1350
C454000(モルタル)			0	352	783	1056	0
C454010	45	40	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 コンクリート超音波速度の計測結果

本研究では、モルタル部の温度依存性を考慮するために、有効材齢によるデータ整理を行うこととした。水セメント比 W/C=45%、細骨材容積率 S_c =40%のモルタル供試体の超音波速度計測結果より、式-1 に示す修正有効材齢を得た³⁾。

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

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(℃)

T_0 : 1℃

図-2 は、コンクリート(W/C=45%)の超音波速度と有効材齢(式-1)の関係を示したものである。各水準において超音波速度の計測結果が滑らかな上昇傾向を示していることから、修正有効材齢を用いることで、超音波速度の温度依存性を適切に評価することができた。

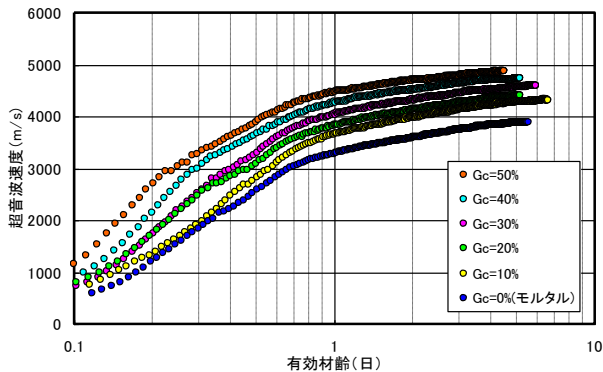


図-2 コンクリート超音波速度 v_c と有効材齢の関係

3.2 既往のモデルによるコンクリート超音波速度の推定³⁾

3.2.1 既往のモデルにおける超音波速度推定の考え方

図-3 に示すように、コンクリートをモルタル層と粗骨材層の2層から成る混合物であると仮定する。各層を通過する超音波伝播時間の合計がコンクリート全体の超音波伝播時間に一致すると考えると、コンクリートの超音波速度 v_c 、モルタルの超音波速度 v_m 、粗骨材の超音波速度 v_g の関係を式-2 でモデル化することができる⁴⁾。

$$\frac{1}{v_c} = \frac{(V_m/V_c)}{v_m} + \frac{(V_g/V_c)}{v_g} = \frac{1-G_c}{v_m} + \frac{G_c}{v_g} \quad \text{式-2}$$

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, $V_g = G_c \cdot V_c$

3.2.2 超音波速度の分離推定

図-2 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-3 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。

$$\begin{cases} 1/v_{c1} = (1-G_{c1})/v_m + G_{c1}/v_g \\ 1/v_{c2} = (1-G_{c2})/v_m + G_{c2}/v_g \end{cases} \quad \text{式-3}$$

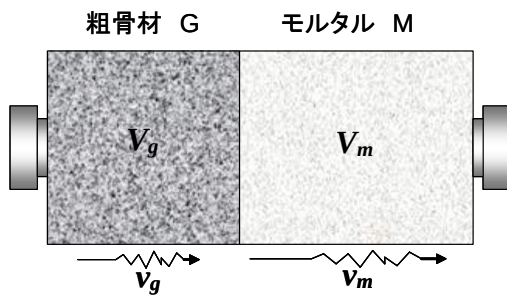


図-3 2層混合物と見なしたコンクリート供試体

図-4, 図-5 に、式-3 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 の計算値を示す。

図-4 より、 v_g の計算結果は有効材齢 1 日以降の範囲において一定の値を示しており、実測値である 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おり、粗骨材の超音波速度は材齢によらず一定となるはずであることから、コンクリートを弾性体と見なせない超若材齢域においては、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存在していることがわかる。

図-5 に示した v_m 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。しかし、計算値は実測値よりも約 6%速い超音波速度を示していることから、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。

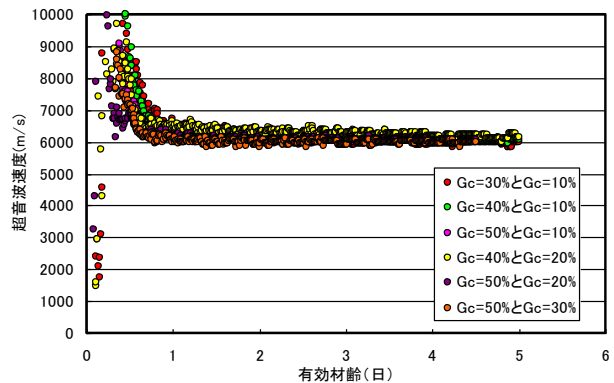


図-4 粗骨材超音波速度 v_g の計算値(既往のモデル)

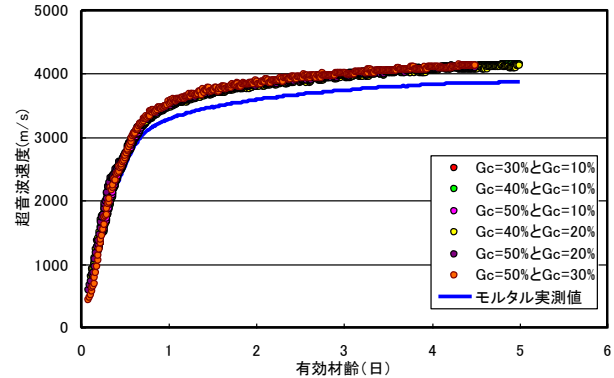


図-5 モルタル超音波速度 v_m の計算値(既往のモデル)

3.2.3 従来モデルの超音波速度推定精度

ここでは、粗骨材の超音波速度 v_g をコアの実測値である 6120m/s、モルタルの超音波速度 v_m を分離推定結果の回帰式で定義し、式-2 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した。

図-6 より、分離推定結果を考慮してやることで有効材齢 0.5 日以降のコンクリートの超音波速度をほぼ正確に推定することができる。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となった。これより、式-2 による超音波速度推定の精度を高めるためには超若材齢域における v_g の定量化が必要であるが、分離推定結果が大きくばらついているため、適切にモデル化することは困難である。

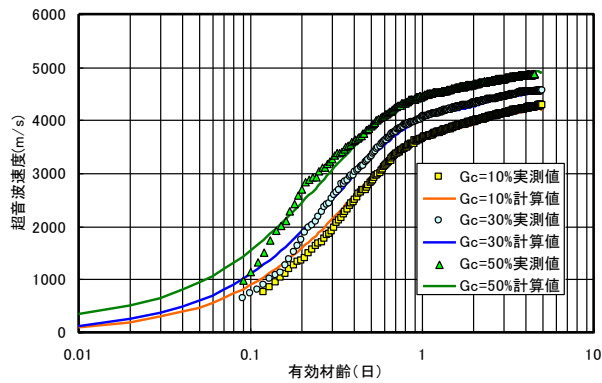


図-6 コンクリート超音波速度の計算値と実測値(式-2)

3.3 新モデルによるコンクリート超音波速度の推定

3.3.1 新モデルにおける超音波速度推定の考え方

コンクリートの超音波速度は配合条件によって大きく変化するが、理論的には粗骨材絶対容積率 $G_c=0\%$ のとき $v_c = v_m$, $G_c=100\%$ のとき $v_c = v_g$ となるはずであり、さらに、コンクリートの超音波速度は配合によらず $v_m \leq v_c \leq v_g$ となる。これらの条件を満たす関数を図で表すと図-7 のようになり、式-4 で表すことができる。

$$v_c = (1 - G_c)^N v_m + G_c^N v_g \quad \text{式-4}$$

N : 粗骨材の影響を考慮するための補正パラメータ

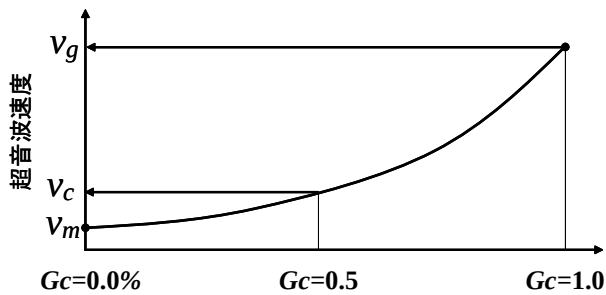


図-7 新モデルにおけるコンクリート超音波速度の考え方

3.3.2 超音波速度の分離推定

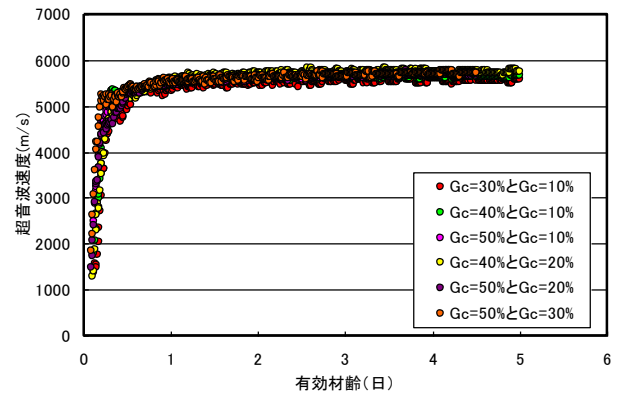
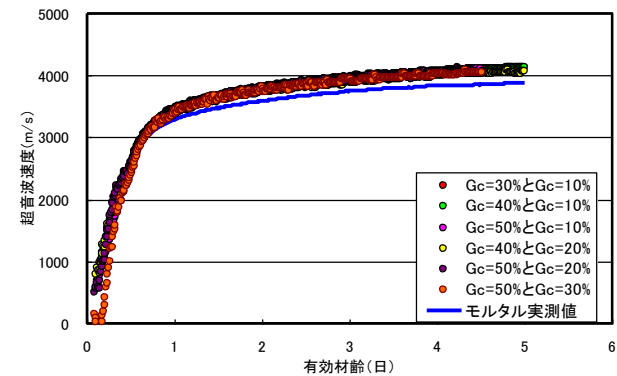
既往のモデルの場合と同様に、式-5 の連立方程式を解くことで、モルタルの超音波速度 v_m と粗骨材の超音波速度 v_g を分離推定することができる。なお、分離推定を行う際の補正パラメータ N の値は、 $N=1$ (コンクリートの超音波速度に影響を及ぼす因子は体積比のみを考慮) としている。

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

図-8、図-9 に、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 の計算値を示す。

図-8 より、既往のモデルでの分離推定結果に見られた超若材齢域における過大なばらつきは、新モデルを用いることでほとんど解消されることがわかる。しかしながら、有効材齢 1 日以降の超音波速度は約 5630m/s で一定となっており、実測値である 6120m/s を大きく下回る結果となった。

図-9 の v_m の計算値については、既往のモデルを用いた場合とほぼ同様の傾向を示しており、それぞれの組み合わせ

図-8 粗骨材超音波速度 v_g の計算値(新モデル)図-9 モルタル超音波速度 v_m の計算値(新モデル)

ケースで算出された v_m の値はどれも完全に一致しているが、計算値は実測値よりも約 4%速い超音波速度を示す結果となっている。

3.3.3 補正パラメータ N の決定

分離推定結果が非常に安定していることから、粗骨材及びモルタル超音波速度の定量化・モデル化を行うことは可能であるが、それぞれの超音波速度を補正しモデルに代入するという計算方法は汎用的ではない。そこで、 $G_c=0\% \sim 50\%$ の 6 水準、及び $G_c=100\%$ (粗骨材)、計 7 水準の超音波速度のデータを用いて、実測値に最もフィットする N の値を最小自乗法により決定することとした。W/C=40%、45%のコンクリート超音波速度のデータより決定した N の値は式-6、式-7 に示すように有効材齢の関数として表すことができる。

$$N = \frac{0.0487}{t_e^{1.5607}} + 1 \quad \text{式-6}$$

$$N = \frac{0.0344}{t_e^{1.5871}} + 1 \quad \text{式-7}$$

式-6、式-7 を図で表すと、図-10、図-11 のようになる。これらの図より、W/C が異なる供試体であっても、係数 N は同様の傾向を示すことがわかる。有効材齢 1 日以降では N の値が 1 に収束していくことから、硬化後のコンクリートの超音波速度は体積比の影響のみを考慮すれば良いことがわかる。それ以前の、モルタル部と粗骨材の弾性係数が大きく異なる若材齢域の範囲では、超音波速度を低下させる何らかの要因が存在することから、係数 N は一定の値とはならない。

3.3.4 従来モデルの超音波速度推定精度

ここでは、粗骨材の超音波速度 v_g をコアの実測値である 6120m/s、モルタルの超音波速度 v_m を実測値の回帰式で定義し、最小自乗法により決定した補正パラメータ N を用いて、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した。

図-12、図-13 より、 $W/C=40\%$ 、 45% ともに、低粗骨材容積率のコンクリートにおいて若干の乱れが生じているものの、有

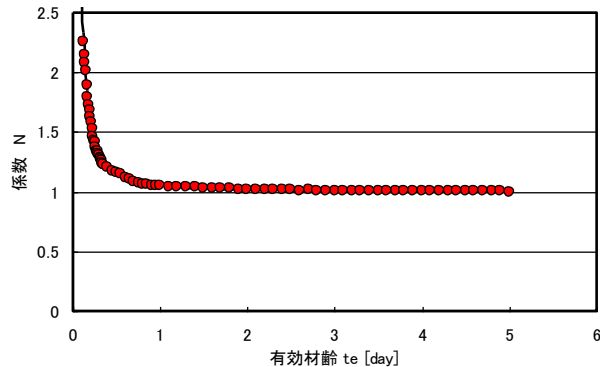


図-10 補正パラメータ N と有効材齢の関係 ($w/c=40\%$)

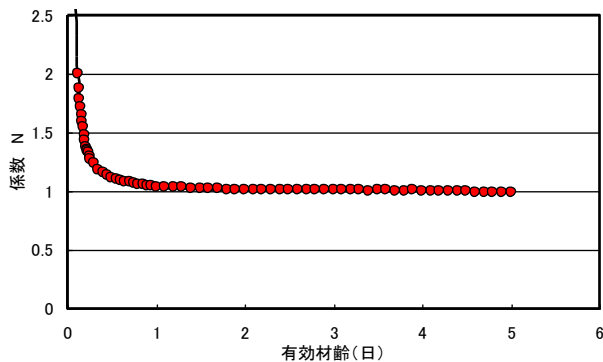


図-11 補正パラメータ N と有効材齢の関係 ($w/c=45\%$)

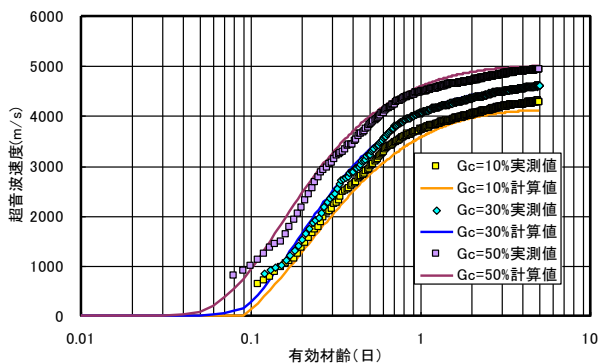


図-12 コンクリート超音波速度の計算値と実測値 ($w/c=40\%$)

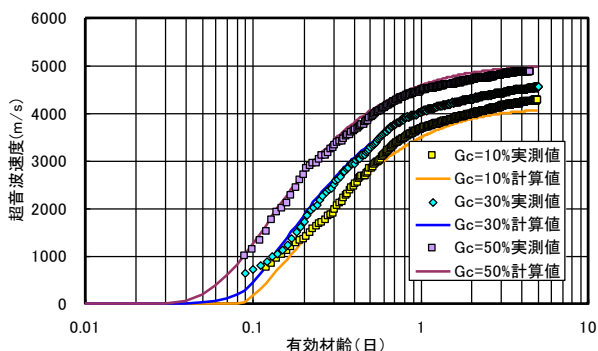


図-13 コンクリート超音波速度の計算値と実測値 ($w/c=45\%$)

効材齢 0.2 日以降のコンクリートの超音波速度を精度良く推定することができる。これより、既往の計算モデルでは推定することが困難であった、粗骨材容積率が大きいコンクリートの超音波速度を、式-4 を用いることで適切に推定することができる。超音波速度を計算する際には、分離推定結果ではなく実測値を代入することができるため、既往のモデルと比較して汎用性が高いモデルとなっている。

4. まとめ

本研究では、既往の研究で用いられている計算モデル、及び回帰的な条件から提案した新たな計算モデルの2つのモデルを用いて、若材齢コンクリートの超音波速度の推定を行った。その結果、以下のような知見を得た。

- ① 既往の超音波速度計算モデル(式-2)を用いた場合には、有効材齢 0.5 日以降のコンクリートの超音波速度を精度良く推定することができる。しかしながら、モルタルの超音波速度の分離推定結果が実測値と異なるため、単にモデルに実測値を代入するだけでは精度の良い推定を行うことができない。また、粗骨材超音波速度の定量化も困難であるため、特に粗骨材容積率が大きいコンクリートにおいて、超若材齢域における超音波速度を適切に推定することができない。
- ② 新モデル(式-4)を用いた場合では、低粗骨材容積率のコンクリートにおいて推定精度がやや劣るものの、適切な補正パラメータ N を導入することにより、有効材齢 0.2 日以降からのコンクリートの超音波速度を精度良く推定することができる。分離推定結果を代入していた既往のモデルとは異なり、新モデルは実測値をそのまま代入することができるため、汎用性が高いモデルとなっている。
- ③ 今後も引き続き、若材齢コンクリートの超音波速度に影響を及ぼす要因について実験的に検討を行い、補正パラメータ N のモデル化・定量化を進める必要がある。

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) 澤村秀治, 安澤朋也, 丸山久一, 永島裕二: 強度発現途上にあるコンクリートの超音波速における粗骨材量の影響の定量化, コンクリート工学年次論文集, 第32巻, pp.551-556, 2010.7
- 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