

擬似若材齢コンクリートの力学特性と超音波速度に対する骨材の影響

Influence of Aggregate on Mechanical Properties and Ultrasonic Wave Velocity of False Early Age Concrete

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(OHNISHI Itsuki)
 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 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や、マスコンクリートの温度応力などのように、若材齢コンクリートの体積変化を取り扱う場合、若材齢時におけるコンクリートの強度発現および弾性係数の変化を的確に把握する必要がある。コンクリートの弾性係数を推定するために、超音波伝播速度の計測が簡便で有効であり、多くの適用事例があるが、既往の研究の多くは硬化コンクリートを対象としており、若材齢コンクリートを対象とした研究は少ないのが現状である。

筆者らは、打設直後からコンクリートの超音波伝播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¹⁾や、配合条件が若材齢コンクリートの超音波伝播速度と動弾性係数の関係に及ぼす影響²⁾を示しているが、若材齢コンクリート、特に材齢1日未満のコンクリートは、超音波速度、弾性係数の値が刻々と変化していくのに反し、若材齢時を長時間維持することが難しいため、時間に追われる実験の中で精度の高い測定データを得ることは困難である。また、超音波伝播速度により若材齢コンクリートの弾性係数推定法を汎用的にするためには、骨材の構成による影響をより定量的に評価する必要がある。

そこで本研究では、コンクリートの若材齢時を再現するために、セメントに対する石灰石微粉末(以下 LSP)の置換によって、セメントペーストの強度を意図的に低下させた擬似若材齢コンクリートを用いて、若材齢時におけるコンクリートの動弾性係数や圧縮強度などの力学的性質、および粗骨材容積率が若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

擬似若材齢コンクリートの超音波速度および圧縮強度等の力学特性に対する粗骨材の影響を検討するため、細骨材容積率を40%に固定したモルタルに、6水準の粗骨材容積率を与えた擬似若材齢コンクリートを打設し、各実験を行った。供試体の実験要因と水準を表-1に、使用材料およびコンクリートの配合を表-2、表-3に示す。実験の要因は、LSP置換率を0%から80%の範囲で20%刻みで5水準、粗骨材容積率を0%から50%の範囲で10%刻みで6水準とし、それらを組み合わせて配合を決定したコンクリート円柱供試体を1水準につき3本ずつ作製した。また今回の配合では、セメントとLSPの密度が異なるため、水粉体質量比W/Pによって配合を決定した場合、

高LSP置換率において単位水量Wに対して粉体容積が大きくなってしまふ。これを解決するため、従来の水粉体質量比W/Pではなく、水と粉体の容積比 V_w/V_p で配合を決定し、全てLSP置換率0%時の水粉体容積比1.422を基準として単位水量と粉体の関係性を保つこととした。また、今回の配合では、純粋なマトリックス強度と骨材の影響を検討するため、混和剤は使用しないこととした。

表-1 実験の要因と水準

実験の要因		実験の水準	
石灰石微粉末の置換率	5水準	0%, 20%, 40%, 60%, 80%	
粗骨材容積率Gc	6水準	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%	

表-2 使用材料一覧

名称	仕様等	密度(kg/cm ³)
セメント	C:普通ポルトランドセメント	3.16
	LSP:石灰石微粉末	2.74
細骨材	S:函館市豊原産天然砂	2.64
粗骨材	G:上磯磯朗産砕石2005	2.70

表-3 コンクリートの配合

Name	vW/vC	Sc (%)	Gc (%)	単位質量(kg/m ³)				
				W	C	LSP	S	G
L00	1.422	40.0	0.0	321	783		1087	
L20				321	608	152	1087	
L40				321	443	295	1087	
L60				321	287	430	1087	
L80				321	139	558	1087	
L00				10.0	289	705		979
L20			289		547	137	979	270
L40			289		398	266	979	270
L60			289		258	387	979	270
L80			289		126	502	979	270
L00			20.0		257	626		870
L20				257	486	122	870	540
L40				257	354	236	870	540
L60				257	229	344	870	540
L80				257	112	446	870	540
L00				30.0	225	548		761
L20			225		425	106	761	810
L40			225		310	207	761	810
L60			225		201	301	761	810
L80			225		98	390	761	810
L00			40.0		193	470		652
L20				193	365	91	652	1080
L40				193	266	177	652	1080
L60				193	172	258	652	1080
L80	193	84		335	652	1080		
L00	50.0	160		391		544	1350	
L20		160	304	76	544	1350		
L40		160	221	148	544	1350		
L60		160	143	215	544	1350		
L80		160	70	279	544	1350		

2.2 実験・計測方法

擬似若材齢コンクリートの超音波速度の測定は、表-3に示した全ての配合について、それぞれ円柱供試体（φ100×200）を1水準につき3本ずつ作製し、一定の強度を得るため20℃±1℃の水槽で材齢28日を超えるまで水中養生を行った。その後、適宜取り出し、供試体長、供試体直径、質量等を計測した後、円柱供試体の供試体軸方向において、超音波速度の計測、JIS A 1127に規定される一次共鳴振動による動弾性係数の計測、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験法」に基づく圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 擬似若材齢コンクリートの力学特性

擬似若材齢コンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験、動弾性係数試験により得られた結果を図-1、図-2、図-3にそれぞれ示す。

図-1より、圧縮強度は、LSP置換率の減少（＝材齢の進行）によるマトリックス強度の増加に伴い上昇するが、粗骨材容積が増加してもほとんど変化が見られなかった。また一部では粗骨材を混入したことにより、圧縮強度が低下するものも見られた。このことから、圧縮強度は、粗骨材の影響をほとんど受けず、材齢の進行に伴うマトリックス強度に支配されることがわかる。

図-2に粗骨材容積率と静弾性係数 E_c の関係、図-3に粗骨材容積率と動弾性係数 E_d の関係を示す。どちらも圧縮強度と同様に、LSP置換率の減少、言い換えれば材齢の進行に伴い弾性係数は増加し、さらにマトリックス強度の低い高LSP置換率域、つまり若材齢時に著しく増加する傾向にある。しかし圧縮強度とは違い、粗骨材容積率の増加に伴い弾性係数の値も単調に増加している。このことより、圧縮強度と比較して、コンクリートの弾性係数は、若材齢期ではマトリックス強度に大きく依存するが、材齢の進行とともにマトリックス強度よりも粗骨材容積率の影響をより強く受けるといえる。

図-4に全ての円柱供試体のLSP置換率別の超音波速度 v_c と静弾性係数 E_c の関係を示す。これによると、コンクリートのLSP置換率および粗骨材量が異なり、強度に差があっても v_c と E_c の関係は概ね同一曲線上にあり、擬似若材齢コンクリートの v_c と E_c はひとつの回帰式でモデル化することが可能であるといえる。これらのデータを回帰して、 v_c - E_c 関係式として、式1を示す。

$$E_c = e^{-1.25 \times 10^{-7} v_c^2 + 1.76 \times 10^{-3} v_c - 1.92} \quad (式1)$$

図-5に全ての円柱供試体のLSP置換率別の超音波速度 v_c と動弾性係数 E_d の関係を示す。 v_c - E_d 関係も、静弾性係数 E_c と同様の傾向を示すが、 E_c に比べてばらつきが少ないことがわかる。またコンクリートのLSP置換率および粗骨材量が異なり、強度に差があっても v_c と E_d の関係が同一曲線上にあることから、擬似若材齢コンクリートの v_c と E_d もひとつの回帰式でモデル化が可能であるといえる。これらのデータを回帰して、 v_c - E_d 関係式

として、式2を示す。

$$E_d = e^{-8.81 \times 10^{-8} v_c^2 + 1.32 \times 10^{-3} v_c - 0.52} \quad (式2)$$

3.2 弾性係数回帰式の評価

擬似若材齢コンクリートで得られた v_c - E_c 関係と、参考文献3)において通常のコンクリートに対して求めた v_c - E_c 関係を比較したものを図-6に、同様に v_c - E_d 関係と参考文献2)で得られた v_c - E_d 関係を比較したものを図-7に示す。図-6では、静弾性係数 E_c の回帰式は、超音波速度が1500m/s付近では同程度であるが、その後参

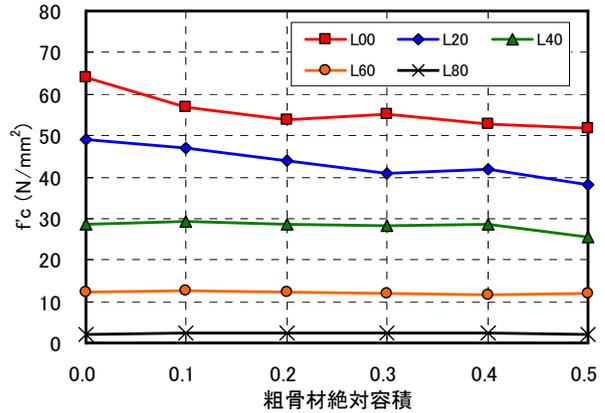


図-1 粗骨材容積率と圧縮強度 f_c の関係

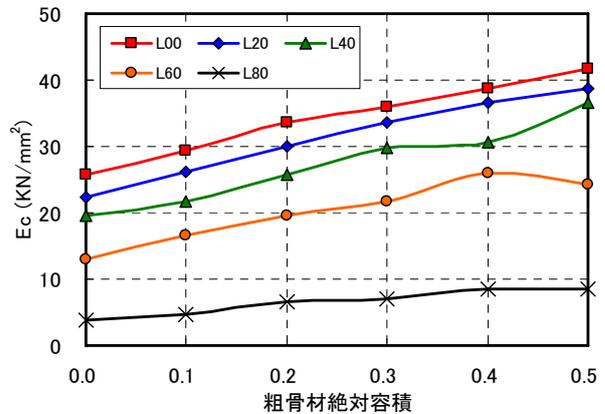


図-2 粗骨材容積率と静弾性係数 E_c の関係

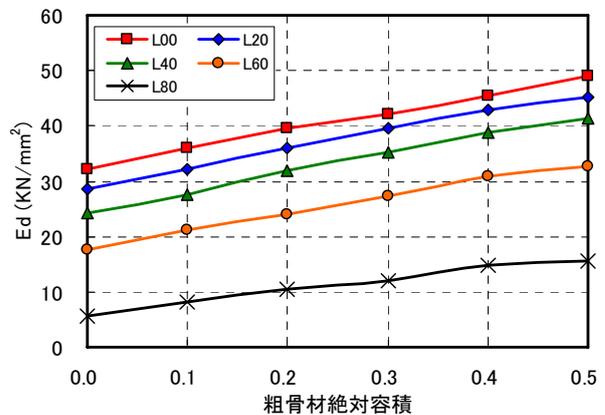


図-3 粗骨材容積率と動弾性係数 E_d の関係

考文献3)に比べ E_c がやや大きめの値となり、 $v_c=4500\text{m/s}$ を超えたあたりで逆転する傾向となっている。また図-7でも、動弾性係数 E_d の回帰式は、文献2)に比べ若干高い値を示すことがわかる。しかし、今回の実験結果では、骨材量やマトリックス強度に違いがあっても、データのばらつきはなく、 v_c の増加に伴い弾性係数の値も関数的に増加していることから、骨材の構成やマトリックス強度は、 v_c - E_c 関係、 v_c - E_d 関係に影響を及ぼさないといえる。また、どちらも我々の既往の研究と同様の傾向を示し、指数回帰式でモデル化できることから、擬似若材齢コンクリートは、一般の若材齢コンクリートの力学特性を、適切に再現できると考える。

3.3 擬似若材齢コンクリートにおける粗骨材およびモルタルの超音波速度の分離推定と定量化

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 が合成されたものとして考え、式3のようにモデル化できる⁴⁾。

$$\frac{1}{v_c} = \frac{(V_m/V_c)}{v_m} + \frac{(V_g/V_c)}{v_g} = \frac{1-G_c}{v_m} + \frac{G_c}{v_g} \quad (\text{式3})$$

- 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

$$G_c : \text{粗骨材容積率}, V_g = G_c \cdot V_c$$

式3では、モルタルおよび粗骨材の超音波速度はコンクリート体積におけるそれぞれの絶対容積 V_m, V_g によって寄与すると考えることができる。この式に異なった粗骨材容積率(G_{c1}, G_{c2})を組み合わせ、同一LSP置換率における擬似若材齢コンクリート超音波速度(v_{c1}, v_{c2})を用いて、式4の連立方程式を解く。この手順により、コンクリート中のモルタルの超音波速度と粗骨材の超音波速度を分離推定することができる。

$$\begin{cases} 1/v_{c1} = (1-G_{c1})/v_m + G_{c1}/v_g \\ 1/v_{c2} = (1-G_{c2})/v_m + G_{c2}/v_g \end{cases} \quad (\text{式4})$$

図-8, 図-9は、異なった粗骨材容積率をもつデータを二つ組み合わせ、式4の連立方程式を解いて求めた粗骨材の超音波速度 v_g と、モルタルの超音波速度 v_m である。これらの図は横軸のLSP置換率を反転して表示しているので、実際の材齢進行による強度発現と超音波速度の関係と同様なイメージとなっている。図-8では、粗骨材の超音波速度の計算値は、一部大きくばらつく傾向を示すが、全ての分離推定結果の平均値は 5650m/s となり、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 よりやや小さい値となる。しかしLSP置換率80%時に見られる様な、極端に計算値が

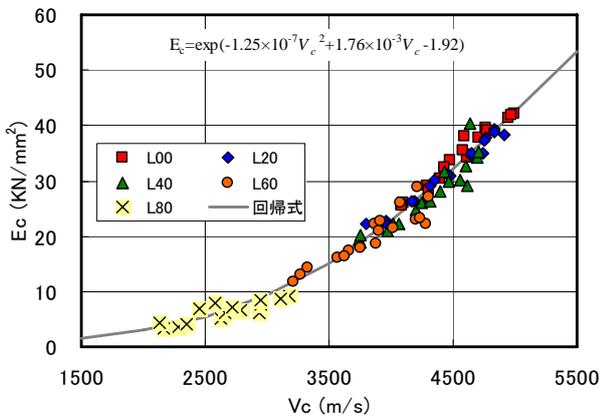


図-4 超音波速度と静弾性係数 E_c の関係

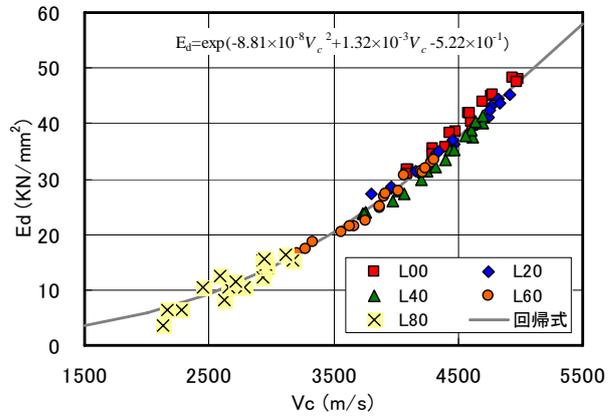


図-5 超音波速度と動弾性係数 E_d の関係

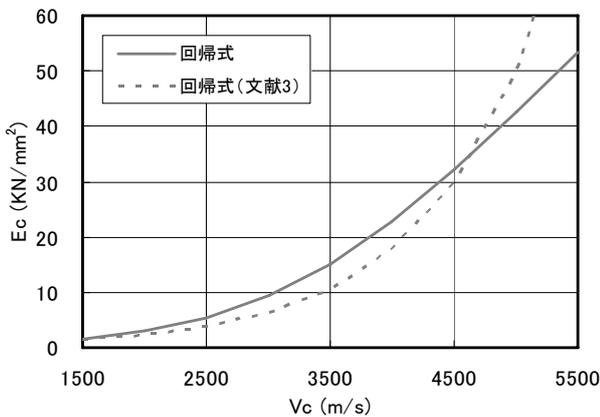


図-6 静弾性係数 E_c の回帰式の比較

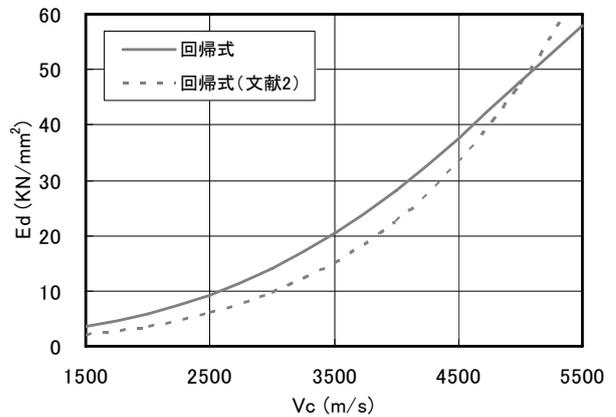


図-7 動弾性係数 E_d の回帰式の比較

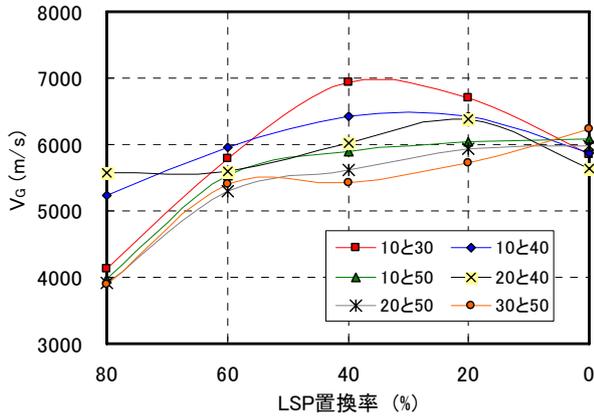


図-8 粗骨材超音波速度 v_g の計算値

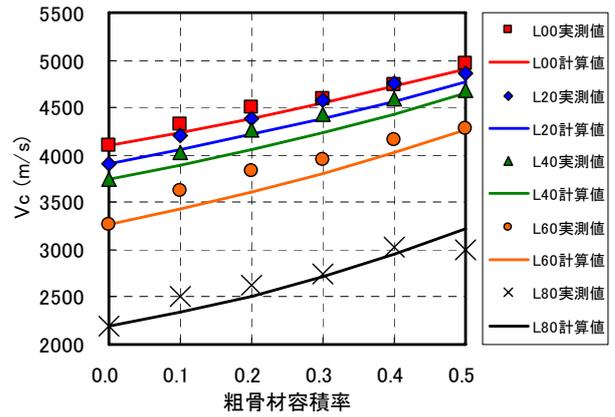


図-10 v_c の実測値と計算値の比較

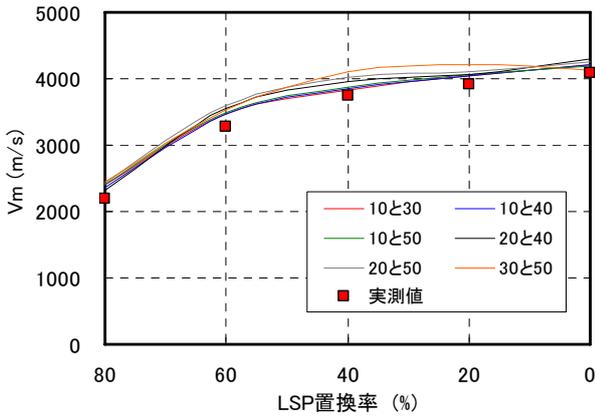


図-9 モルタル超音波速度 v_m の計算値

ばらつく部分については、分離推定結果の精度を低下させる何らかの要因があることを示唆している。図-9に示したモルタルの超音波速度の計算値は、各LSP置換率においてほぼ同じ値を示し、LSP置換率の減少、言い換えれば材齢進行に伴うモルタルの強度発現とともに超音波速度も増加する結果を示した。さらにモルタル供試体 ($G_c=0.0$)の実測値とも概ね一致している。このことより、粗骨材超音波速度の推定精度に課題はあるものの、式4の連立方程式によって、擬似若材齢コンクリートの超音波速度に対する粗骨材とモルタルの寄与を定量化できる。

3.4 超音波速度計算モデルの精度

式3の計算モデルの精度を検証するため、粗骨材超音波速度 v_g をコアの実測値、モルタル超音波速度 v_m を図-9に示す実測値で定義して、コンクリートの超音波速度 v_c を算出した。図-10は算出したコンクリートの超音波速度と実測値を比較したものである。それぞれのLSP置換率において、実測値と計算値は、LSP置換率が0%のL00と80%のL80では精度良く推定できているが、それら以外のLSP置換率においては、実測値が計算値を上回る結果となった。この原因については、今後さらなるデータの蓄積を重ねて検討する必要があるが、今回の計算値と実測値の関係の傾向から、擬似若材齢コンクリートの超音波速度は式3の計算モデルによって推定可能であり、さらに粗骨材容積率の増加に伴う、超音波速度の増加も適切に表現できると考える。

4. まとめ

本研究では、石灰石微粉末の添加で強度をコントロールし、さらに異なる粗骨材容積率を与えた擬似若材齢コンクリートを用いた実験によって、若材齢コンクリートの超音波速度および圧縮強度等の力学特性に対して、粗骨材が与える影響を検討した。これらの結果より、以下の知見を得た。

- ① 石灰石微粉末を混入した擬似若材齢コンクリートは、実際の若材齢コンクリートの力学特性をシミュレートすることができる。
- ② 粗骨材の量は、コンクリートの超音波速度や弾性係数に強く影響を及ぼし、それらは粗骨材量の増加とともに増加する傾向にある。
- ③ 粗骨材量は、 $v_c - E_c(E_d)$ 関係にはあまり影響しない。
- ④ 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、そのモデルから v_m 、 v_g の寄与を分離して推定することができる。

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，705-710，2007.7
- 2) 門野寛・澤村秀治・橋本紳一郎・永島裕二：配合条件が若材齢コンクリートの超音波速度と動弾性係数に及ぼす影響，平成19年度土木学会北海道支部論文報告集第64号，E-10，2008.1
- 3) 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第63号，E-20，2007.2
- 4) Yiching Lin, Chao-Peng Lai, Tsong Yen: "Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete", ACI Materials Journal, V.100, No.1, January 2003, pp.21-28