

論文 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

澤村 秀治^{*1}・丸山 久一^{*2}・永島 裕二^{*3}

要旨：これまでの研究で、若材齢コンクリートの弾性係数の推定にも超音波伝播速度が有効であることを示してきた。しかしながら、若材齢コンクリートに超音波計測を適用した研究例は少なく、配合条件、特に骨材が若材齢コンクリートの超音波伝播速度に及ぼす影響は十分に整理されていない。そこで本研究では、これらの要因の定量化を目指し、若材齢コンクリート、石灰石粉末を添加した疑似若材齢コンクリートを用い、超音波伝播速度に対する骨材の影響を検討した。その結果、骨材の存在の影響は若材齢時ほど大きいこと、細骨材率は超音波伝播速度に影響するものの、その程度はあまり大きくないことが明らかになった。

キーワード：若材齢コンクリート、疑似若材齢コンクリート、超音波伝播速度、動弾性係数、細骨材率

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を示しているが¹⁾、このためにはコンクリートの超音波伝播速度と静弾性係数あるいは動弾性係数を結ぶデータ・関係式が必要である。

若材齢コンクリートの超音波伝播速度は、配合設計条件、特に骨材条件の影響を強く受けると考えられ、超音波伝播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、コンクリートの配合設計条件が超音波伝播速度にどのように影響するかを把握しなければならない。

コンクリートの硬化挙動を超音波によって評価しようとする研究には内田ら²⁾のものがあるが、これらはセメントペーストを対象にしたものであり、骨材の影響が考慮されていない。また、粗骨材率が超音波伝播速度に及ぼす影響を扱ったものには谷川ら³⁾の研究があるが、これらは硬化コンクリートを対象にしたものである。このように、既往の研究の多くは十分に材齢が進んだ硬化コンクリートを対象にしたものであり、打設直後からの若材齢コンクリートを対象にした研究事例は少ない。

そこで本研究では、若材齢コンクリートの超音波伝播速度にコンクリートの配合設計条件が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、①さまざまな配合設計条件を与えた若材齢コンクリート、②セメ

ントに対する石灰石粉末置換率の増加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コンクリート（以下、疑似若材齢コンクリート）を用い、細骨材・粗骨材の存在、あるいは骨材の構成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実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

実験の要因と水準を表-1に示す。実験の要因は、通常の若材齢コンクリートでは、コンクリートの強度水準（wc シリーズ：水セメント比）、骨材の構成（sa シリーズ：細骨材率）、疑似若材齢コンクリートでは、骨材の存在（PMC シリーズ）、骨材の構成（sa シリーズ：細骨材率）とし、セメントペーストの強度を7水準の石灰石粉末（以下、LSP）置換率で調整した。

本実験で使用した材料の一覧を表-2に、全てのケースのコンクリートの配合を表-3に示す。円柱供試体によって動弾性係数を測定した配合については、供試体密度の実測値を併せて示した。

(1) 通常の若材齢コンクリート

通常の若材齢コンクリートの wc シリーズは、強度水準が超音波伝播速度と動弾性係数の関係に及ぼす影響を調べることを目的としており、単位水量を 168kg/m³、細骨材率を 42%と一定に保ちながら、水セメント比を

表-1 実験の要因と水準

種別	実験の要因	実験の水準
若材齢コンクリート	水セメント比 W/C	4水準 30%, 42.5%, 55%, 70%
	細骨材率 s/a	4水準 30%, 42%, 50%, 60%
LSP混入疑似若材齢コンクリート	LSP質量置換率	7水準 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90%
	骨材の有無	3水準 P:ペースト, M:モルタル, C:コンクリート
	細骨材率 s/a	5水準 20%, 30%, 40%, 50%, 60%

*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 長岡技術科学大学 環境・建設系教授 Ph.D.（正会員）

*3 アイレック技建(株) 営業開発本部営業開発部長

30%～70%の範囲で変えている。ここでは W/C=30%の配合 (wc300) のみ、練混ぜが困難であったため高性能減水剤を使用した。sa シリーズは、骨材の構成が超音波伝播速度と動弾性係数の関係に及ぼす影響を調べることを目的とし、単位水量を 168kg/m³、水セメント比を 55% に保ち、s/a を 30%～60%の範囲で変えたものである。

(2) 疑似若材齢コンクリート

疑似若材齢コンクリートの PMC シリーズは、水セメント比 55%、細骨材率 42%の基本となるコンクリートの配合 C を基準に、M は C から粗骨材を除きモルタル分を

表-2 使用材料一覧

名称	仕様等	密度 (g/cm ³)
セメント	C:普通ポルトランドセメント	3.16
フィラー	LSP:北斗市義朗産石灰石粉末	2.73
細骨材	S:函館市豊原産天然砂	2.65
粗骨材	G:北斗市義朗産砕石2005	2.70
混和剤	AE減水剤標準型	1.07
	高性能AE減水剤(wc300のみ)	1.05
助剤	AE剤	1.00
	空気量調整剤(消泡剤)	1.00

表-3 コンクリートの配合・供試体密度

Name	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)						密度 (g/cm ³)	
			W	C	LSP	S	G	混和剤		助剤
wc300	30.0		560			665	955	8.4	3.9	2.43
wc425	42.5	42	395			722	1038	5.9	2.8	2.39
wc550	55.0		306			754	1083	4.6	2.1	2.35
wc700	70.0		240			777	1115	3.6	1.7	2.32
sa30		30				545	1295			2.37
sa42		42				754	1083			2.35
sa50		50	306			908	925	4.6	2.1	2.30
sa60		60				1090	740			2.36
00C			168	305		818	1152	4.6		2.44
00M			293	533		1427				2.24
00P			635	1154						1.86
15C			168	260	46	816	1148	4.6		
15M			292	452	80	1419				
15P			629	973	172					
30C			168	214	92	813	1144	4.6		2.42
30M			292	371	159	1412				2.20
30P			624	794	340					1.83
45C			168	168	137	811	1141	4.6		
45M			291	291	238	1404				
45P			619	619	506					
60C			168	122	183	808	1137	4.6		2.41
60M			290	211	317	1396				2.17
60P			614	446	669					1.78
75C			168	76	229	806	1134	4.6		
75M			289	132	395	1389				
75P			609	277	830					
90C			168	31	275	803	1130	4.6		2.38
90M			289	53	473	1381				2.15
90P			604	110	988					1.74
sa0020		20				390	1588			
sa0030		30				585	1390			
sa0040		40				779	1191			
sa0050		50				974	993			
sa0060		60				1169	794			
sa3020		20				387	1578			
sa3030		30				581	1381			
sa3040		40				775	1184			
sa3050		50				968	987			
sa3060		60				1162	789			
sa6020		20				385	1569			
sa6030		30				577	1373			
sa6040		40				770	1176			
sa6050		50				962	980			
sa6060		60				1155	784			
sa9020		20				382	1559			
sa9030		30				574	1364			
sa9040		40				765	1169			
sa9050		50				956	974			
sa9060		60				1147	779			

取り出した配合、P はさらに細骨材も除きセメントペーストのみを取り出した配合である。これらに対して LSP 置換率を 0% から 90% の範囲で 15% 刻みで 7 水準与え、ペースト強度をコントロールした。P、M、C ではペースト分の組成が統一されているので、それぞれの強度水準において、超音波伝播速度に対する骨材の存在の影響を検討することができる。sa シリーズは PMC シリーズと同様の配合をベースに、細骨材率を 20% から 60% の範囲で 10% 刻みに 5 水準設定し、これらに対して LSP 置換率を 0% から 90% の範囲で 30% 刻みで 4 水準与え、ペースト強度をコントロールした。これらによって、骨材の構成の影響を検討する。s/a=20% のコンクリートは明らかにモルタル分が不足し、また s/a=60% のコンクリートはセメントペーストが不足した状態であった。なお、疑似若材齢コンクリートでは、ペースト P、モルタル M で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、極力空気を入れない状態で比較することとした。また、ペースト P の供試体では打設後の分離が避けられず、円柱供試体の上部と下部で超音波伝播速度に 5% 程度の差が認められた。このため、供試体上部と下部のそれぞれで直交する 2 方向、および供試体軸方向で超音波伝播速度を測定し、5 個の測定値の平均を Vp 値として用いた。

2.2 実験・計測方法

(1) 通常の若材齢コンクリート

それぞれの配合に対して、円柱供試体を 3 本作成した。打設後 12 時間程度経過し供試体が自立できる強度が得られた段階で、ジェットセメントペーストでキャッピングして直ちに脱型し、供試体の超音波伝播速度と動弾性係数の測定を開始した。計測のインターバルは、最初の数時間は 30 分とし、その後は測定値の変化を見ながら適宜インターバルを調整した。また、脱型後の供試体は、20℃±1℃の水槽で水中養生を継続した。

供試体の超音波伝播速度の計測には、計測装置本体とコンピュータで構成された計測システムを使用した。この計測システムは、超音波周波数を 500kHz とし、透過法によりコンピュータに記録された受信波形から伝播時間を自動的に読み取り、超音波伝播速度を求めている。動弾性係数は、円柱供試体の縦方向の 1 次共鳴振動数から JIS A 1127 に示された式を用いて求めた。

(2) 疑似若材齢コンクリート

疑似若材齢コンクリートの超音波伝播速度を計測するために、表-3 に示した全ての配合について、それぞれ 100mm の立方体供試体を 3 個作成し、20℃±1℃の水槽で材齢 28 日を超えるまで水中養生を行った。超音波伝播速度 Vp の計測は、立方体供試体の打設上面に平行な 2 方向について行い、それらの平均値を Vp 値として用いることとした。LSP 置換率 0%、30%、60%、90% の

PMC 配合については円柱供試体（φ100×200）も3本ずつ作成し、28日間の養生の後、超音波伝播速度、動弾性係数、圧縮強度、およびJIS A 1149による静弾性係数の測定を行った。

3. 通常の若材齢コンクリートに対する実験結果・考察

3.1 コンクリートの強度水準の影響

図-1に水セメント比によって強度水準を変えたwcシリーズの動弾性係数 E_d 、および超音波伝播速度 V_p と材齢の関係を示す。 E_d 、 V_p とも材齢の進行に伴って滑らかな増加が測定されており、それぞれ水セメント比が小さくコンクリート強度が高いほど大きな値を示している。 E_d の値はコンクリート強度の違いによる差が顕著であるが、これに比べて V_p の値は強度による差が小さくなっている。

図-2にwcシリーズの動弾性係数 E_d と超音波伝播速度 V_p の関係を示す。これによると、コンクリートの水セメント比が大きく異なり強度に差があっても、 E_d と V_p の関係は、概ね同一曲線上にあり、若材齢時においてもコンクリートの E_d - V_p 関係はコンクリートの強度水準の影響を受けないこと確認した。これらの結果を回帰して、 E_d - V_p 関係式として式(1)を示す。

$$E_d = e^{-5.83 \times 10^{-8} V_p^2 + 1.26 \times 10^{-3} V_p - 0.99} \quad (1)$$

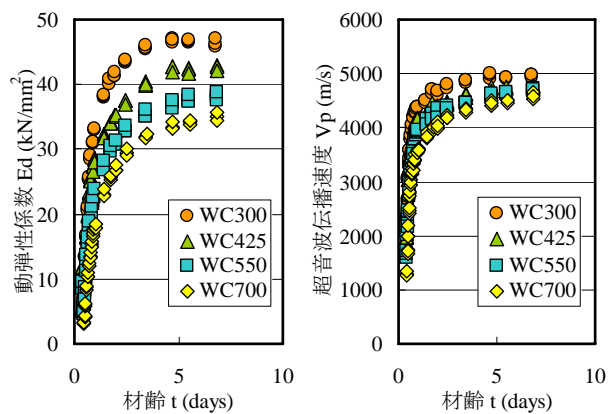


図-1 E_d ・ V_p と材齢の関係(wcシリーズ)

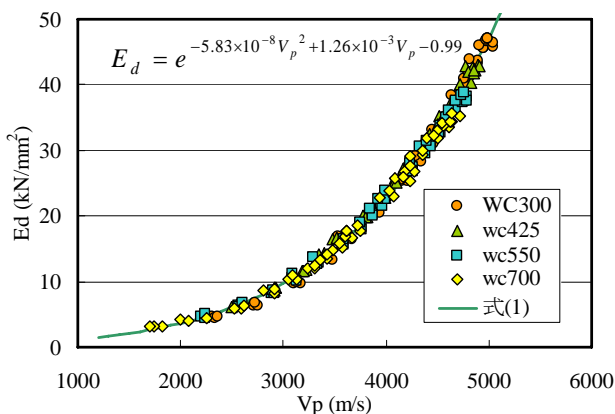


図-2 E_d と V_p の関係(wcシリーズ)

3.2 骨材の構成の影響

図-3に、水セメント比、単位水量を一定とし、細骨材率を変えたsaシリーズの動弾性係数 E_d 、および超音波伝播速度 V_p と材齢の関係を示す。細骨材率が30%から50%の範囲では、同一材齢で比較すると、細骨材率が小さく粗骨材量が多いほど動弾性係数の値が大きくなる。ただし、細骨材率60%の場合には逆転が生じており、細骨材率50%の場合より動弾性係数が大きくなっている。この原因は明らかではなく更なる検討が必要であるが、若材齢コンクリートの動弾性係数は骨材の構成の影響を受けるようである。一方、超音波伝播速度は動弾性係数に比べて細骨材率の変化の影響が小さく、また、細骨材率60%の場合の逆転も生じていない。この傾向の違いは、若材齢コンクリートの E_d - V_p 関係が、骨材の構成の影響を受けることを示唆している。

図-4にsaシリーズの動弾性係数 E_d と超音波伝播速度 V_p の関係を示す。図中には、式(1)による E_d - V_p 関係を併せて示した。saシリーズの E_d - V_p 関係も、ほぼ式(1)の曲線上をたどるが、超音波伝播速度が3,500m/s以上になると、式(1)の曲線から徐々にそれ始め、細骨材率の変化、すなわち骨材の構成の影響が認められるようになる。

図-5に骨材の構成が動弾性係数 E_d に及ぼす影響を示す。この図は、横軸を超音波伝播速度 V_p とし、縦軸を動弾性係数 E_d の実測値を式(1)に示した回帰式による

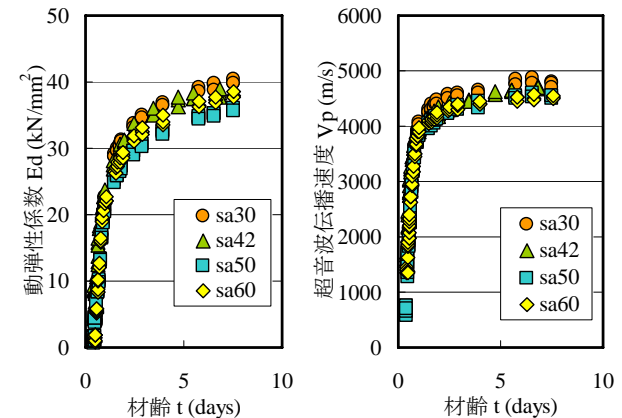


図-3 E_d ・ V_p と材齢の関係(saシリーズ)

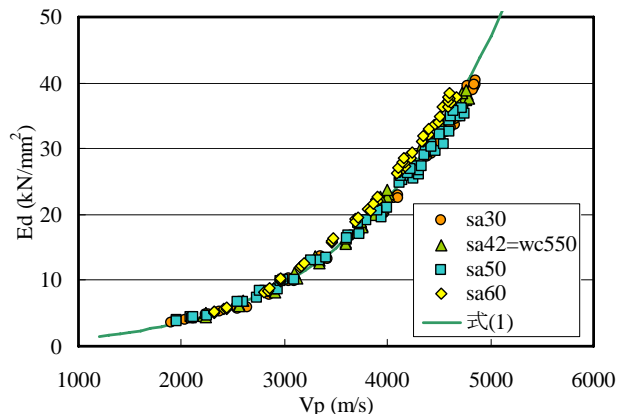


図-4 E_d と V_p の関係(saシリーズ)

計算値で除した値としている。データにはある程度のばらつきがあるものの、細骨材率を42%とした式(1)を基準に考えると、同一の超音波伝播速度に対して細骨材率が60%の場合には動弾性係数が式(1)を上回り、30%の場合は式(1)を下回ることがわかる。よって、式(1)は細骨材率が42%より大きい場合は動弾性係数を低めに評価し、42%より小さい場合には高めに評価することになり、若材齢コンクリートの超音波伝播速度から動弾性係数の値を推定するためには、細骨材率などコンクリートの骨材構成の影響を考慮しなければならない。しかしながら、今回の実験結果では、細骨材率が30%から60%の範囲で、式(1)を基準として考えた動弾性係数の変動幅は10%程度である。また、一般的なコンクリートの細骨材率は40%から50%の範囲内にあることから、常識的な細骨材率の範囲であれば骨材の構成に多少の差があっても、 E_d - V_p 関係が受ける影響は小さいとみなすこともできる。

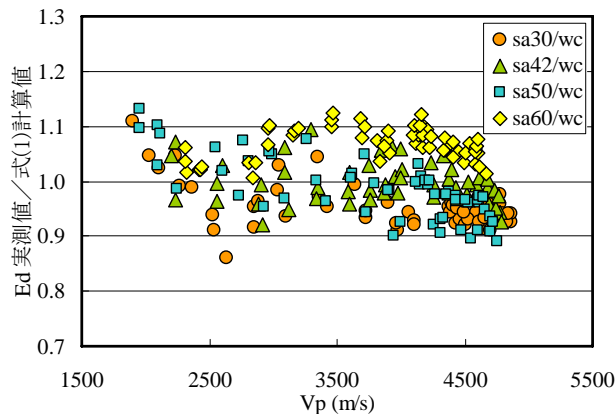


図-5 骨材の構成が V_p - E_d 関係に及ぼす影響

4. 疑似若材齢コンクリートに対する実験結果・考察

4.1 疑似若材齢コンクリートの力学的性質

LSP を混入した PMC 配合の円柱供試体を用いて、疑似若材齢コンクリートの力学特性について検討した。図-6 に、圧縮強度と LSP 置換率の関係を、ペースト P、モルタル M、コンクリート C のそれぞれについて示す。コンクリート C の圧縮強度は LSP 置換率が大きくなるに伴って低下する。LSP 置換率 90% の場合では供試体が脆く、圧縮試験すらできないものもあった。同等の配合を持ったコンクリートの圧縮強度試験結果⁴⁾を参照すると、LSP 置換率 30% の場合は標準養生で材齢 15 日程度の圧縮強度、同 60% の場合は材齢 2.5 日程度の圧縮強度、同 90% の場合は材齢 0.5 日程度の圧縮強度に相当する。モルタル M、ペースト P の圧縮強度は、コンクリート C に比べて大きく低下し、その低下率は LSP 置換率が増加するほど大きくなる。

図-7 に静弾性係数 E_c と LSP 置換率の関係、図-8 に動弾性係数 E_d と LSP 置換率の関係を示す。全体的な

傾向は圧縮強度と同様であるが、コンクリート C を基準としたモルタル M、ペースト P の E_c , E_d の低下は圧縮強度の場合より顕著である。このことより、圧縮強度と

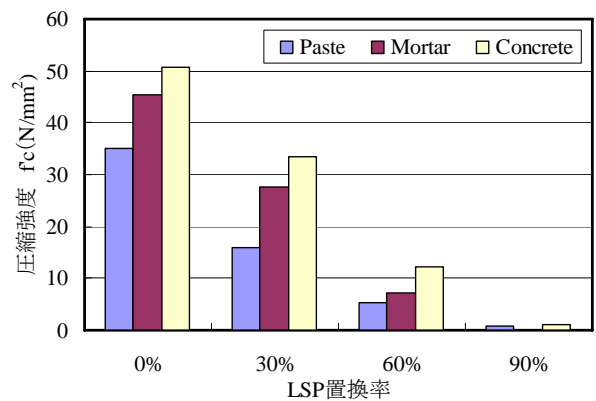


図-6 圧縮強度と LSP 置換率の関係 (PMC)

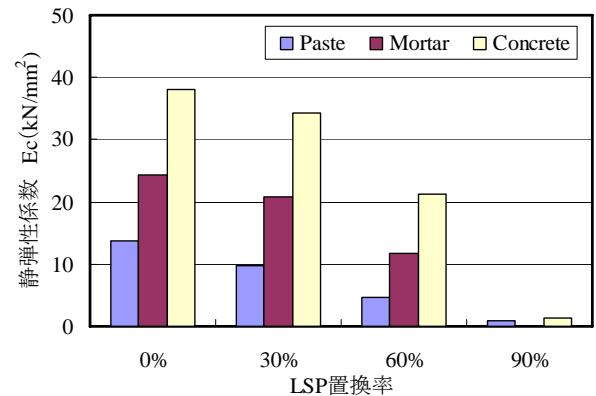


図-7 静弾性係数と LSP 置換率の関係 (PMC)

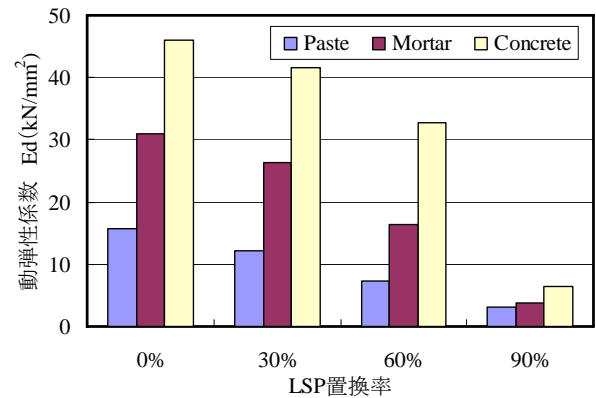


図-8 動弾性係数と LSP 置換率の関係 (PMC)

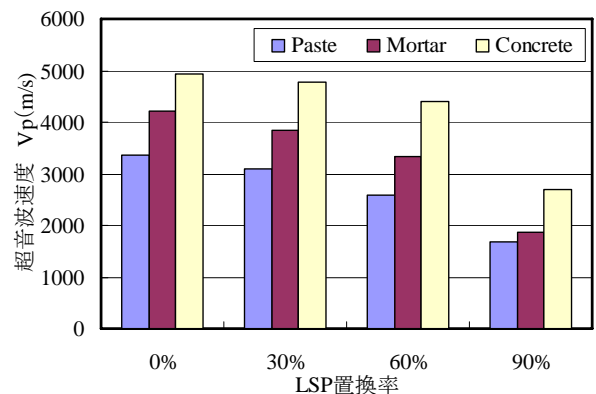


図-9 超音波伝播速度と LSP 置換率の関係 (PMC)

比較してコンクリートの弾性係数は、骨材の存在の影響をより強く受けるといえる。全項に示した通常の若材齢コンクリートの動弾性係数試験結果を参照すると、LSP置換率60%の場合は標準養生で材齢2.5日程度の動弾性係数、同90%の場合は材齢0.5日程度の動弾性係数に相当し、圧縮強度の場合と同様の結果となった。

図-9は、超音波伝播速度 V_p と LSP 置換率の関係である。静弾性係数、動弾性係数の場合と異なり、超音波伝播速度はペースト P でも相当の値を示し、モルタル M、コンクリート C との差も小さい。また、LSP 置換率の増加に伴う超音波伝播速度の減少傾向は、弾性係数の場合ほど顕著ではない。このことより超音波伝播速度は、圧縮強度や弾性係数と比較すると、骨材の構成やセメントマトリックスの強度の影響を受けにくいことがわかる。

図-10に疑似若材齢コンクリートの動弾性係数 E_d と超音波伝播速度 V_p の関係を示す。これらのデータは、ペースト P、モルタル M など骨材の構成が全く異なるもの、LSP 置換率によってセメントマトリックス強度が全く異なるものが含まれているが、全てのデータは概ね同一の曲線上に位置していることがわかる。これらのデータを回帰すると式(2)が得られる。

$$E_d = e^{-7.63 \times 10^{-8} V_p^2 + 1.36 \times 10^{-3} V_p - 0.982} \quad (2)$$

疑似若材齢コンクリートで得られた式(2)の E_d - V_p 関係は、通常の若材齢コンクリートに対して求めた式(1)の E_d - V_p 関係と同様の傾向を示している。圧縮強度試験結果、静・動弾性係数の測定結果、および静・動弾性係数と超音波伝播速度の関係から、疑似若材齢コンクリートは、通常の若材齢コンクリートの力学特性を、適切に再現していると考えられることができる。

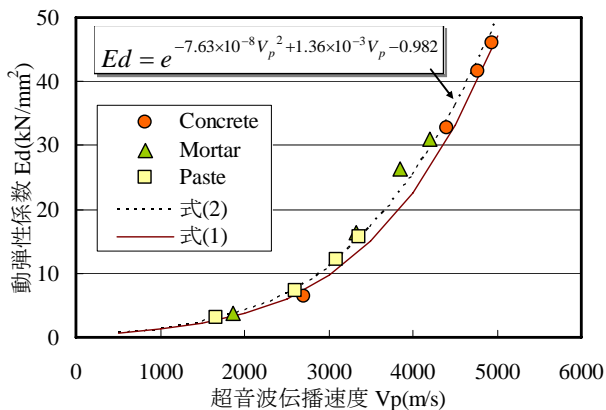


図-10 E_d と V_p の関係 (PMC)

4.2 骨材の存在の影響

図-11は、ペースト P、モルタル M、コンクリート C の超音波伝播速度を LSP 置換率の水準別に示したものである。これらの配合では、ペースト分の組成を統一しており、モルタル M では細骨材の体積濃度が 53% 程度、コ

ンクリート C では細骨材と粗骨材を合わせた体積濃度が 73% 程度となっている。超音波伝播速度は、どの水準の LSP 置換率においてもモルタル M、コンクリート C の順、すなわち骨材の体積濃度が高くなるにしたがって増大し、超音波伝播速度が骨材量の影響を強く受けていることがわかる。LSP 置換率 90% の場合では、ペースト P とモルタル M の超音波伝播速度の値が同程度であるのに対し、コンクリート C の超音波伝播速度はそれらの 1.7 倍程度の値を示した。このことは、LSP 置換率 90% が相当する材齢 1 日未満の超若材齢時における超音波伝播速度は、粗骨材の影響を特に受けることを示している。

図-12に超音波伝播速度と LSP 置換率の関係を示す。この図は横軸の LSP 置換率を反転して表示しているの、超音波伝播速度と材齢の関係と同様なイメージになっている。コンクリート C の超音波伝播速度の値は、LSP 置換率 90% から 60% までの間に、言い換えれば若材齢時に大きく増大し、それ以降の増加は鈍くなる傾向にある。ペースト P の場合は LSP 置換率の減少 (= 材齢の進行) に伴って超音波伝播速度は概ね単調に増加し、モルタル M の傾向はそれらの中間にある。このことは、骨材量が若材齢時における超音波伝播速度の変化率にも影響を及ぼすことを示している。

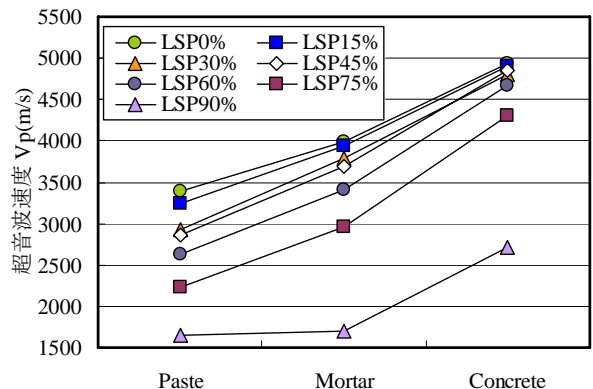


図-11 超音波伝播速度と骨材の存在の関係 (PMC)

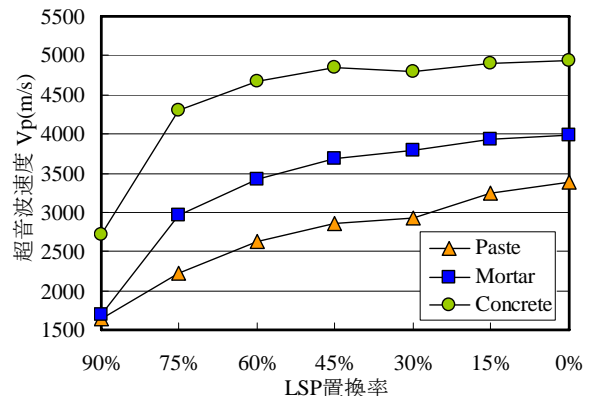


図-12 超音波伝播速度と LSP 置換率の関係 (PMC)

4.3 骨材の構成の影響

図-13に疑似若材齢コンクリートの超音波伝播速度と細骨材率の関係を示す。超若材齢時に相当する LSP 置

換率 90% の場合の超音波伝播速度は細骨材率の影響をあまり受けないが、LSP 置換率が 60% 未満の超音波伝播速度の値には細骨材率の影響が認められ、細骨材率の増加に伴って超音波伝播速度は低下傾向にある。当初は、細骨材率の影響はセメントマトリックスの強度が低いほど強く表れると考えていたが、それとは反する結果となった。コンクリートの超音波伝播速度は粗骨材の体積濃度 Vg/V の影響を受けるとともに、モルタル中の細骨材体積濃度 Vs/Vm の影響も受ける。細骨材率を変えると、例えば細骨材率を大きくすると Vg/V は減少し、 Vs/Vm は増加するので、細骨材率が超音波伝播速度に及ぼす影響は、 Vg/V の効果と Vs/Vm の効果がミックスされたものになっている。

図-14 は細骨材率を変えた場合の超音波伝播速度と LSP 置換率の関係である。これによると、LSP 置換率 90% (≒超若材齢時) のコンクリートの超音波伝播速度は細骨材率の影響をあまり受けないが、LSP 置換率が 60% 以下、言い換えれば材齢の進行によって強度がある程度増加してくると、超音波伝播速度は細骨材率の影響を受けるようになることがわかる。

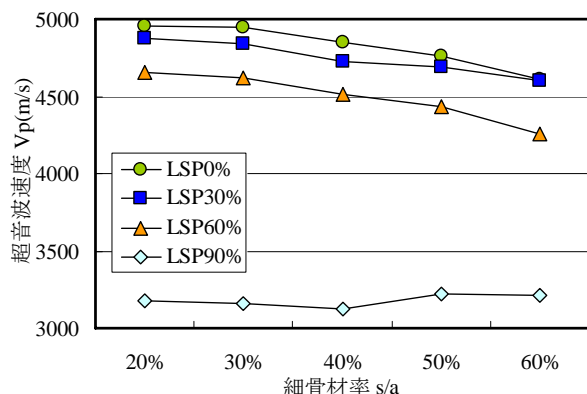


図-13 超音波伝播速度と細骨材率の関係 (sa シリーズ)

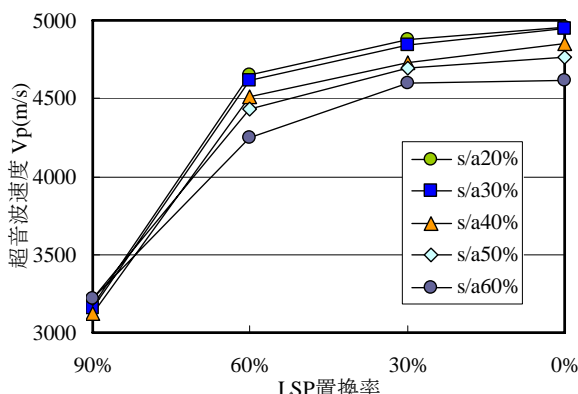


図-14 超音波伝播速度と LSP 置換率の関係 (sa シリーズ)

5. まとめ

通常の若材齢コンクリート、疑似若材齢コンクリートに対して行った実験結果から、以下の知見を得た。

(1) 細骨材率、骨材の構成が同程度であれば、コンクリ

ートの水セメント比(≒強度水準)は若材齢コンクリートの $Ed-Vp$ 関係に影響を及ぼさない。

- (2) 細骨材率の変化は、若材齢コンクリートの $Ed-Vp$ 関係に若干の影響を及ぼす。 Vp から Ed を推定する際に細骨材率を 42% として得られた式(1)を用いると、細骨材率が大きい場合には Ed を過小評価し、小さい場合には過大評価する傾向がある。
- (3) 細骨材率を 30% から 60% と大きく変えても、式(1)からの偏差は ±10% 程度であり、一般的な細骨材率を持つコンクリートでは、 $Ed-Vp$ 関係に式(1)を用いても実用的に十分な精度が得られる。
- (4) 石灰石粉末を混入した疑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適切に表現することができる。
- (5) 骨材の存在や量はコンクリートの超音波伝播速度に強く影響し、若材齢時ほどその傾向が著しい。細骨材率は若材齢時よりむしろ、ある程度強度が得られたコンクリートの超音波伝播速度に影響する。

謝辞：本研究は、平成 18 年度科学研究費補助金 基盤研究(C) 課題番号：18560456 (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, Vol.29, pp.705-710, 2007.7
- 2) 内田慎哉, 川村彰男, 鎌田敏郎, 久田真: 超音波測定に基づくコンクリートの硬化挙動の評価手法に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1569-1574, 2002
- 3) Y.Tanigawa, K.Yamada: Effect of Some Factors on Relationship between Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete, Proceedings of The Japan Congress on Materials Research, Vol.22, Page.383-389, 1979
- 4) 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
- 5) 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伝播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
- 6) 野邊一宏, 澤村秀治, 橋本紳一郎, 永島裕二: 疑似若材齢コンクリートを用いた超音波伝播速度に及ぼす骨材の影響の評価, 平成 19 年度土木学会北海道支部論文報告集第 64 号, E-11, 2008.1