

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

Influence by Mix Conditions on Ultrasonic Wave Velocity and Dynamic Young's Modulus of Early Age Concrete

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 ○学生員 門野 寛(KADONO Hiroshi)
 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)
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正 員 橋本紳一郎(HASHIMOTO Shinichiro)
 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、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¹⁾。しかし、供試体の取り扱いが困難なほどの若材齢コンクリートの静弾性係数、動弾性係数を測定することは極めて困難であり、また正確な値も得られにくい。

筆者らは、若材齢コンクリートの超音波伝播速度の変化を連続自動的に計測し、これらの結果に別途実験により求めたコンクリートの超音波伝播速度と弾性係数の関係式を適用し、若材齢コンクリートの弾性係数変化を求める方法を示している²⁾。この方法によれば、間接的ではあるものの、コンクリートの弾性係数の変化について連続した実測値を得ることができる。

しかし、これまでの実験データは、水セメント比を W/C=55%、細骨材率を s/a=42% に設定した一種類の配合に対して得られたものであり、その結果の汎用性や適用範囲については明確になっていない¹⁾。また、コンクリートの超音波伝播速度や動弾性係数は、特に若材齢時において骨材の影響を強く受けると考えられることから、超音波伝播速度を応用した若材齢コンクリートの弾性係数推定法を汎用的なものとするためには、さまざまな配合設計条件によるコンクリートの超音波伝播速度と弾性係数の関係のデータを蓄積することが必要である。

そこで、本研究では、①骨材の存在、②水セメント比でコントロールするコンクリートの強度水準、③細骨材率でコントロールする粗骨材量、を要因とした実験を行い、これらの要因が材齢7日程度までの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を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験では、打設後12時間程度から材齢7日程度までの若材齢コンクリートに対して、超音波伝播速度と動弾性係数を測定し、これらの関係にコンクリートの配合設計条件が及ぼす影響を検討することとした。

実験の要因と水準を表-1に示す。実験の要因は、骨材の存在(PMCシリーズ:骨材の有無)、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)とし、それぞれ3～4水準の配合に対して実験を行った。

実験で使用した材料の一覧を表-2に、コンクリートの配合

表-1 実験の要因と水準

実験の要因	実験の水準	
骨材の有無	3水準	ペースト, モルタル, コンクリート
水セメント比	4水準	30%, 42.5%, 55%, 70%
細骨材率	4水準	30%, 42%, 50%, 60%

表-2 使用材料の一覧

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
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	1.07
助 剤	micro-air 404(100倍希釈)	1.00
	micro-air 101(100倍希釈)	1.00

表-3 コンクリートの配合

Name	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)							
			W	C	S	G	減水剤	高性能減水剤	消泡剤	AE剤
00P	55.0	42.0	628	1154					6.9	
00M			290	532	1427				3.2	
00C			162	305	818	1152	4.6		1.8	
wc300	30.0	42.0	168	560	665	955		8.4		3.9
wc425	42.5			395	722	1038	5.9			2.8
wc550	55.0			306	754	1083	4.6			2.1
wc700	70.0			240	777	1115	3.6			1.7
sa30	55.0	30.0	168	306	545	1295	4.6			2.1
sa42(wc550)		42.0			754	1083				
sa50		50.0			908	925				
sa60		60.0			1090	740				

を表-3に示す。骨材の存在の影響を調べることを目的としたPMCシリーズでは、水セメント比55.0%、細骨材率42%の基本となるコンクリートの配合00Cを基準に、00Mは00Cから粗骨材を除きモルタル分を取り出した配合、00Pはさらに細骨材も除きセメントペーストのみとした配合であり、それぞれでセメントペーストの組成は一定としてある。また、セメントペーストでは空気量の管理が難しいことから、このシリーズの配合には消泡剤を用い、それぞれで空気量のばらつきが少なくなるようにした。

wcシリーズは、コンクリートの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たもので、単位水量を168kg/m³、水セメント比を55%に保ち、細骨材率を30%～60%の範囲で変えたものである。

2.2 実験・計測方法

それぞれのコンクリートの配合に対して、鋼製型枠を用いて円柱供試体を3本作成した。コンクリート打設後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、 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ の水槽で水中養生を行った。

供試体の超音波伝播速度の計測には、筆者らがこれまでの研究で使用している計測システム¹⁾を用いた。また、動弾性係数は、円柱供試体の縦方向の1次共振振動数を測定し、JIS A 1127³⁾に示された式を用いて動弾性係数を求めた。

材齢7日の計測が終了した供試体は、超音波伝播速度、動弾性係数を測定した後、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験法」に基づく圧縮試験を行い、圧縮強度と静弾性係数を測定した。

3. 実験結果および考察

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シリーズの材齢と動弾性係数 E_d 、および超音波伝播速度 V_p 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。

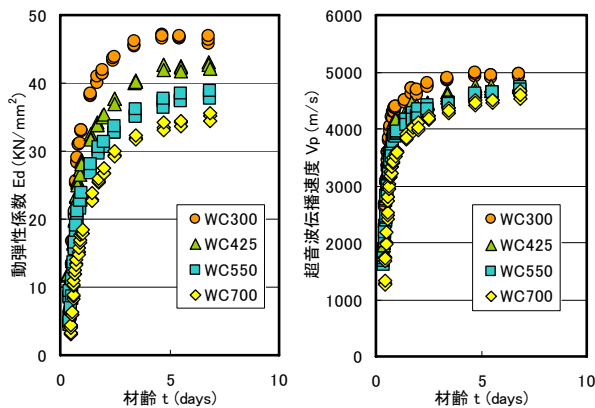


図-1 材齢と E_d および V_p の関係 (wc シリーズ)

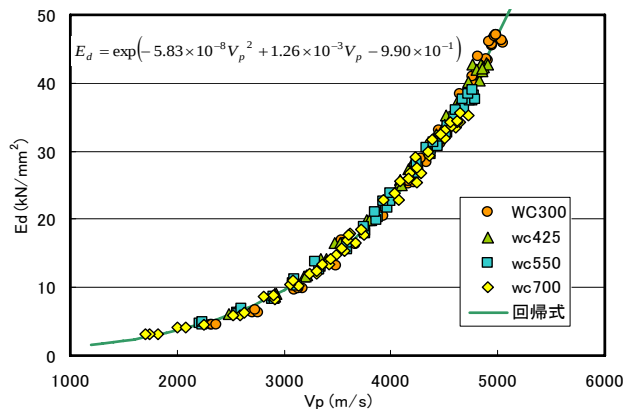


図-2 V_p と E_d の関係 (wc シリーズ)

図-2にwcシリーズの超音波伝播速度 V_p と動弾性係数 E_d 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、 V_p と E_d の関係は、概ね同一曲線上にあり、若材齢コンクリートの V_p - E_d 関係はコンクリートの強度水準の影響を受けないことがわかる。これらの結果を回帰して、 V_p - E_d 関係式として、式1を示す。

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

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シリーズの材齢と動弾性係数 E_d 、および超音波伝播速度 V_p 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。この要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 V_p - E_d 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シリーズの超音波伝播速度 V_p と動弾性係数 E_d の関係を示す。図中には、式1による V_p - E_d 関係を併せて示した。saシリーズの V_p - E_d 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

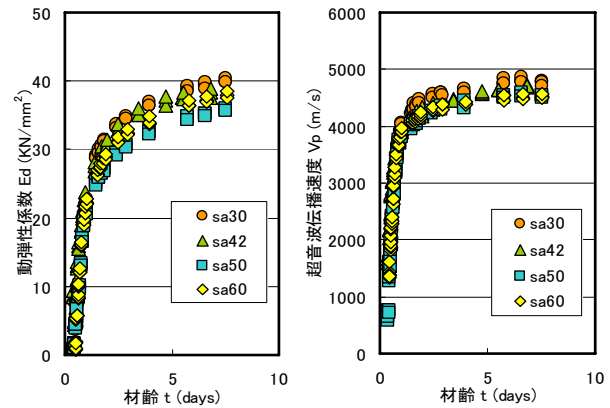


図-3 材齢と E_d および V_p の関係 (sa シリーズ)

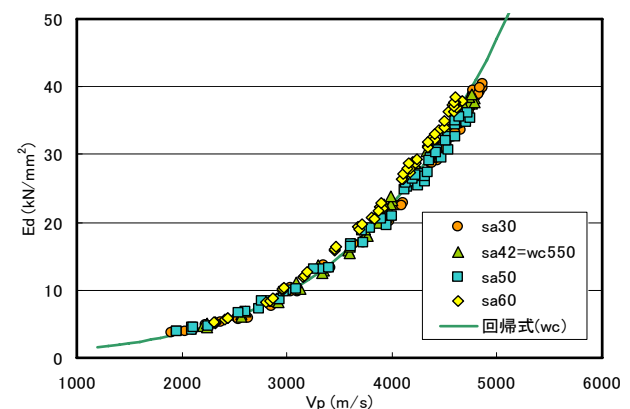


図-4 V_p と E_d の関係 (sa シリーズ)

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、これより、細骨材率を42%とした式1を基準と考えると、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%の場合には式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、 V_p - E_d 関係が受ける影響は小さいとみなすこともできる。

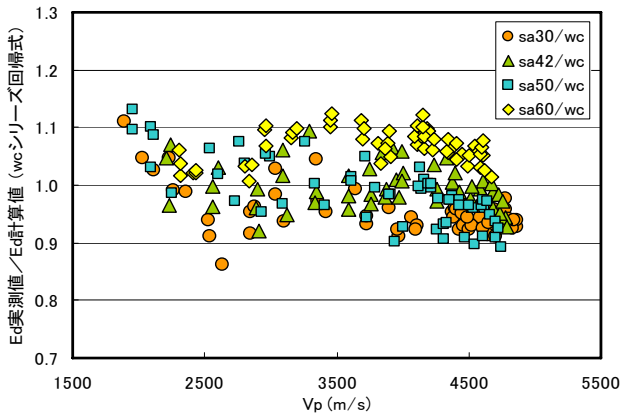


図-5 骨材の構成が E_d に及ぼす影響 (sa シリーズ)

3.3 骨材の存在の影響

若材齢コンクリートの超音波伝播速度、動弾性係数に骨材の存在そのものがどのように影響するかを、コンクリートのマトリックス部分であるセメントペーストの組成を一定として、①基準となるコンクリートの配合、②その中からモルタル分のみを取り出した配合、③さらにその中からセメントペースト分のみを取り出した配合を用いて検討した。これらの配合では、骨材の体積濃度はペーストで0%、モルタルで53.8%、コンクリートで73.5%となっている。また、ペースト分の水セメント比は55%で統一されている。

PMCシリーズの材齢と動弾性係数 E_d 、および超音波伝播速度 V_p の関係を図-6に示す。これによると、動弾性係数と超音波伝播速度はともに骨材の存在の影響を強く受け、骨材体積濃度が大きくなるほど、 E_d 、 V_p の値はともに大きくなる。図-7にPMCシリーズの V_p - E_d 関係を示す。コンクリートの V_p - E_d 関係は、概ね式1による回帰曲線上にあるが、ペーストおよびモルタルの V_p - E_d 関係は超音波伝播速度が2,500m/sを超えると、徐々に式1の線からそれるようになる。このことより、骨材体積濃度が大きく異なるときには、コンクリ

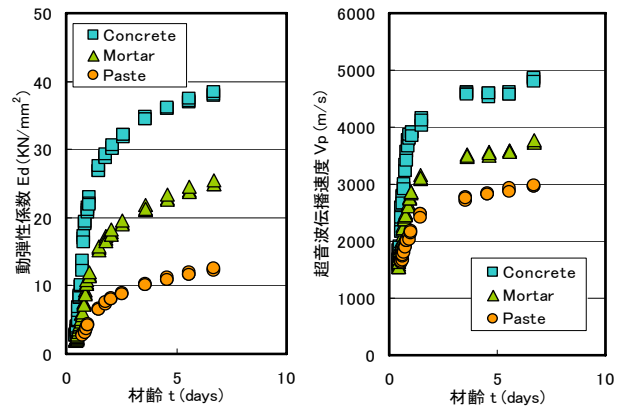


図-6 材齢と E_d および V_p の関係 (PMC シリーズ)

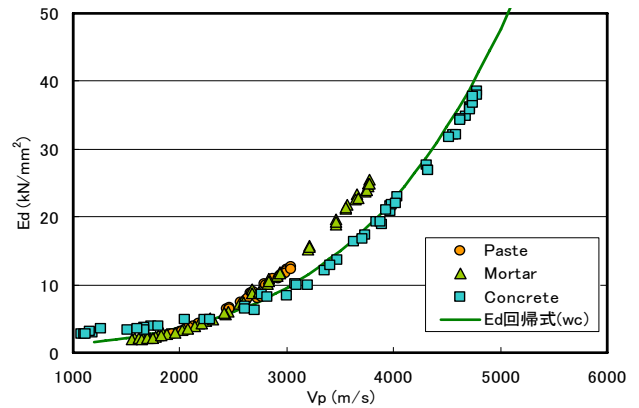


図-7 V_p と E_d の関係 (PMC シリーズ)

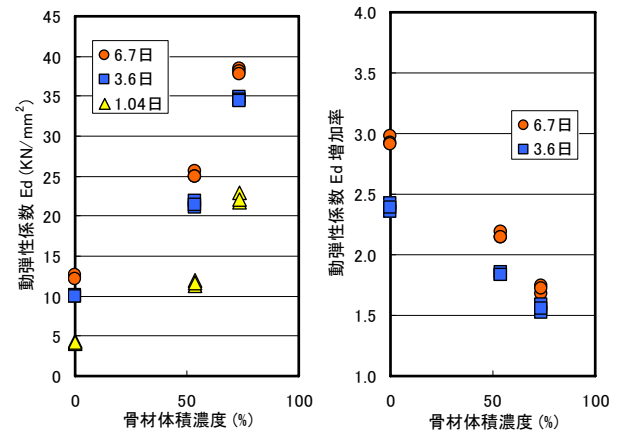


図-8 各材齢における骨材体積濃度と E_d の関係

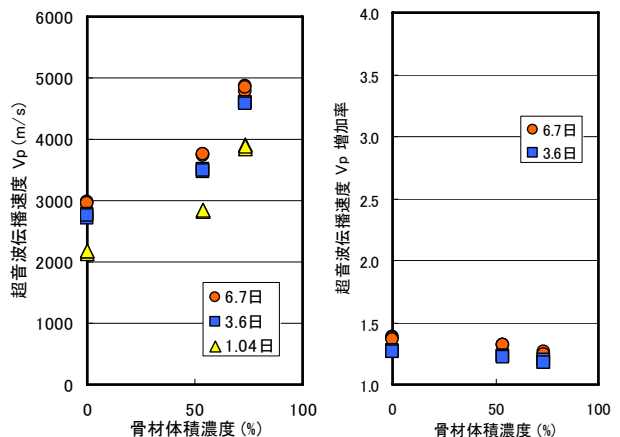


図-9 各材齢における骨材体積濃度と V_p の関係

ートの V_p - E_d 関係を一義的に定義することはできず、何らかの補正を行う必要がある。

図-8 は、材齢 1.04 日、3.6 日、6.7 日における骨材体積濃度と動弾性係数 E_d の関係を示したものである。右側の図は、材齢 1.04 における動弾性係数の値を基準にした増加率を表している。動弾性係数の値は骨材体積濃度が大きくなるにしたがい著しく増大するが、材齢の進行に伴う動弾性係数の増加率は、粗骨材体積濃度が大きいほど減少傾向となる。これは、骨材体積濃度が大きい場合には、骨材による骨格でコンクリートの剛性の大半が決定されており、セメントマトリックス部の強度増加が、コンクリート全体の剛性の増加に及ぼす効果が相対的に小さくなるためである。

図-9 に、骨材体積濃度と超音波伝播速度 V_p の関係を示す。超音波伝播速度は動弾性係数と同様に骨材体積濃度が増加するにしたがい大きくなる。しかし、材齢の進行に伴う超音波速度の増加率は動弾性係数の場合に比べて小さく、さらに骨材体積濃度が大きく変わっても材齢による超音波速度の増加率はあまり変化しない。

このように、超音波伝播速度の増加率が骨材体積濃度の影響を受けにくいのに対して、動弾性係数の増加率は骨材体積濃度の影響を強く受け、骨材量が少ないほど材齢によって動弾性係数が大きくなるので、このことが、図-7 においてモルタル、ペーストの V_p - E_d 関係が式 1 からそれらの要因になることを説明できる。

若材齢コンクリート中の超音波伝播速度は、①セメントマトリックス部の強度・剛性、②モルタル分の細骨材体積濃度、③コンクリート全体の粗骨材体積濃度と、それに加えて骨材自身の弾性係数が複合して決定される。骨材の構成の影響を取り入れて若材齢コンクリートの V_p - E_d 関係を定量化するためには、これらの要因の相互作用を明らかにしなければならない。

3.4 静弾性係数と動弾性係数の関係

若材齢コンクリートの体積変化を扱う場合のように、弾性係数変化のデータが必要なテーマでは、ひずみレベルによっては動弾性係数よりも静弾性係数のほうが現象を説明するのに適する場合がある。本実験では、全ての供試体について材齢 7 日の超音波伝播速度と動弾性係数の測定が行われた後、圧縮試験を行い、静弾性係数を測定した。

図-10 に全ての供試体の静弾性係数と動弾性係数の関係を示す。これらの配合にはペーストやモルタルなど骨材の

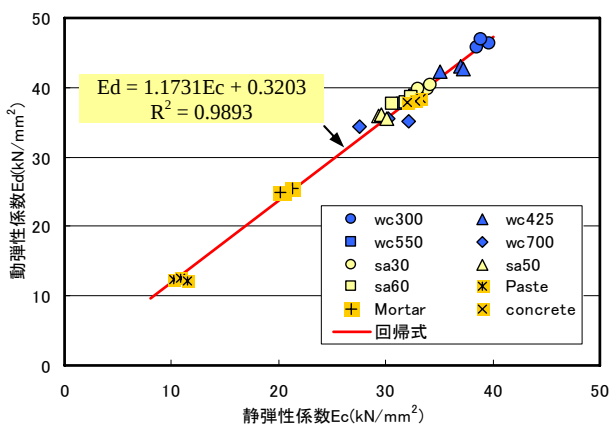


図-10 静弾性係数と動弾性係数の関係(全シリーズ)

構成が大きく異なるものが含まれるが、静弾性係数と動弾性係数の関係は骨材の影響を受けないようであり、それらの中には直線関係が認められる。ただし、このことは材齢7日のコンクリートに対して確認されたものであり、材齢 7 日未満の若材齢コンクリートについては、さらにデータを蓄積して確認する必要がある。

4. まとめ

水セメント比、細骨材率などの配合条件を変えたコンクリートに対して、若材齢時の超音波伝播速度 V_p と動弾性係数 E_d の変化を連続して測定し、配合条件が V_p - E_d 関係に及ぼす影響を検討した。また、細骨材、粗骨材の存在そのものの影響を把握するために、モルタル、セメントペーストについても同様の実験を行い、その結果について検討した。これらの結果、以下のような知見を得た。

- 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は若材齢コンクリートの V_p - E_d 関係に影響を及ぼさない。コンクリートの強度水準に係わらず、 V_p - E_d 関係を式 1 の回帰式で表すことができる。
- ② 細骨材率の変化は、若材齢コンクリートの V_p - E_d 関係に若干の影響を及ぼす。 V_p から E_d を推定する際に細骨材率を 42%として得られた式 1 の回帰式を用いると、細骨材率が大きい場合には E_d 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、 V_p - E_d 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 細骨材、粗骨材の存在は、 V_p と E_d に強い影響を持っている。骨材の影響を取り入れて若材齢コンクリートの V_p - E_d 関係を定量化するためには、セメントマトリックス部の強度・剛性、モルタル分の細骨材体積濃度、コンクリート全体の粗骨材体積濃度が持つ影響について明らかにする必要がある。
- ⑤ 材齢 7 日における静弾性係数 E_c と動弾性係数 E_d の関係は、骨材の構成の影響を受けず、それらの中には直線関係がある。

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, 第29巻, 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) 日本規格協会発行: 共鳴振動法によるコンクリートの動弾性係数, 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法 JIS A 1127, 3-4, 1993