

論文 振動付与 2 軸強制練りミキサを用いた低度処理再生骨材コンクリートに関する基礎的研究

小野寺 誠司^{*1}・牛尾 仁^{*2}・吉田 元昭^{*3}・橋本 親典^{*4}

要旨：実用的に改良した振動付与 2 軸強制練りミキサを用い、振動条件および骨材投入順序等の条件を変化させ低度処理再生骨材コンクリートの品質改善効果について実験的に検討した。その結果、ミキサの負荷電力量とスランプとは相関関係にあり、練混ぜ時に振動付与することで低度処理再生骨材コンクリートのコンシステンシーを向上できる。また、振動条件および骨材投入順序を変化させることで骨材界面の品質が改善され圧縮および割裂引張強度は改善されるが、液体窒素ガスによる簡易急速凍結融解試験では、普通骨材の場合と比較すると半分以下の繰返し回数で相対動弾性係数が 60%以下に低下した。

キーワード：再生骨材，低度処理，振動付与 2 軸強制練りミキサ，振動条件，練混ぜ方法

1. はじめに

コンクリート塊を粉砕・洗浄・乾燥・分級工程のみによって製造された再生細・粗骨材（以後、低度処理再生骨材と称す）は、骨材界面とセメントペーストとの付着が脆弱、普通骨材と比較して高吸水率という低品質な骨材であるが、低コスト、低エネルギーで製造可能である。コンクリート用骨材として利用可能となれば、環境負荷の小さなコンクリートが製造可能となる。しかし、低度処理再生骨材をコンクリート用骨材として用いる場合、強度低下や乾燥収縮が大きい等の問題が発生する。改善方法として、既往の研究¹⁾²⁾より、コンクリートの練混ぜ途中に振動機で振動付与（以後、振動付与練混ぜ工法と称す）することで、強度改善が図られることが確認されている。しかし、実機では練混ぜ途中に振動機で振動付与することは現実的にほとんど不可能であり実用的ではない。

本研究では、2 軸強制練りミキサ自体に 2 基の振動機を取り付けた振動付与 2 軸強制練りミキサを用いて、振動箇所および振動のタイミング、骨材投入順序等の条件を変化させることにより、

低度処理再生骨材コンクリートのフレッシュおよび硬化コンクリートの品質改善効果について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 振動付与 2 軸強制練りミキサ

振動付与 2 軸強制練りミキサは、2 軸強制練り

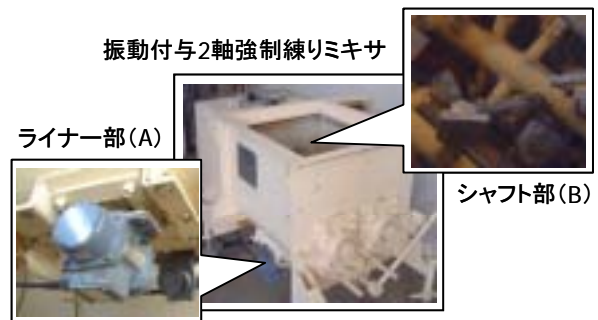


写真 - 1 振動付与 2 軸強制練りミキサ

表 - 1 ミキサの性能諸元

ミキサ 緒 元		
機種	N社製60リットル試験室用2軸強制ミキサ	
動力	3.7kW	
通常練混ぜ時軸回転数	45rpm	
振 動 機 構 諸 元		
部位	シャフト部振動	ライナー部振動
加振力	2.5kN	2kN
振動数	116Hz	56Hz

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 (株)セイア 企画開発室 (正会員)

*3 日工 (株) 開発技術センター (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授 工博 (正会員)

ミキサに振動機を取り付け改良したものである。練混ぜ途中で振動付与することにより練混ぜ性能を向上させることを目的として改良されている。振動機はライナー部とシャフト部の2箇所に取り付けている。本研究で使用した振動付与2軸強制練りミキサを写真-1に示し、振動付与2軸強制練りミキサの性能諸元を表-1に示す。

2.2 使用材料

本研究で使用した使用材料を表-2、骨材の物理特性を表-3に示す。普通骨材と比較して、低度処理再生骨材のほうが密度は小さく、吸水率は大きい。低度処理再生細骨材の吸水率は10%以上であり低品質な骨材である。その要因として、コンクリート塊を粉砕・洗浄・乾燥・分級工程のみで製造しているため、骨材表面に原コンクリートの微粉末やセメント硬化体等の付着物が完全に除去されていないこと、セメント硬化体自体が骨材になっているためと考えられる。

2.3 コンクリートの配合と練混ぜ方法

コンクリートの配合に関しては、振動条件変更および骨材投入順序変更について検討した。全配合ともW/C=65%、目標スランプ8±2.5cm、目標空気量5.5±1.0%とした。本研究で使用したコンクリートの示方配合を表-4に示す。配合は、普通骨材を使用したものと低度処理再生骨材を使用した2配合を用いた。配合名のNは普通骨材使用を示し、Rは低度処理再生骨材使用を示し、V-数字は振動付与時間(分)、(A)はライナー部のみを振動、(B)はシャフト

部のみを振動、(A+B)はライナー部およびシャフト部の両方振動を示す。(数字)は、骨材投入順序の違いを表し、(1)は最初にモルタルを作製した後に粗骨材を投入する実際のレディーミクスト

表-2 使用材料

材 料	種 類	備 考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3280cm ² /g
細骨材	普通細骨材	徳島県阿南市下大野町産（川砂）
	低度処理再生細骨材	コンクリート塊を破砕し粒度調整
粗骨材	普通粗骨材	G _{max} =20mm，（碎石） 徳島県鳴門市撫養町産
		G _{max} =15mm，（碎石） 徳島県鳴門市撫養町産
	低度処理再生粗骨材	コンクリート塊を破砕し粒度調整
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

表-3 骨材の物理特性

	低度処理再生骨材		普通骨材		
	0~5	5~20	0~5	5~15	15~20
粒形(mm)	0~5	5~20	0~5	5~15	15~20
粗粒率	3.31	6.65	3.11	6.49	7.00
表乾密度(g/cm ³)	2.28	2.48	2.62	2.56	2.56
絶乾密度(g/cm ³)	2.07	2.37	2.54	2.50	2.50
吸水率(%)	10.57	4.71	1.30	2.34	2.23
実積率(%)	64.6	59.3	58.8	61.7	61.3

表-4 示方配合

配合名	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤 (原液)	AE剤 (100倍希釈)	消泡剤 (100倍希釈)
			W	C	S	G			
N	65	48	171	263	868	919	C×0.4 (%)	C×0.0025 (%)	—
R		50	175	269	780	849	C×0.6 (%)	C×0.00025 (%)	C×0.008 (%)

記号の意味 N：普通骨材 R：再生骨材

表-5 試験項目および試験方法一覧

試 験 項 目	試 験 方 法	
クランプ電力計によるミキサの負荷電力量測定	三相3線3電流<3電力計法>による負荷電力量測定	
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法
	空気量	JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
	引張強度	JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法
	静弾性係数	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法
	長さ変化	JIS A 1129 モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法（コンタクトゲージ方法）
	凍結融解	液体窒素ガスを用いた簡易急速凍結融解試験方法

配合名	練混ぜ方法	フレッシュコンクリートの試験結果		
		スランブ (cm)	空気量(%)	
			見掛け	補正後
N	C+S+G → 30秒 → W → 150秒 → 排出	13	5.1	5.1
NV-3 (A+B)	C+S+G → 30秒 → W → 150秒 → 排出 ←-----振動付与(A+B) 180秒----->	14	4.7	4.7
RV-0 (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 60秒 → 停止 → 60秒 → 練混ぜ → 30秒 → 排出	7.5	4.6	3.6
RV-1 (A) (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 30秒 → 振動付与(A) 60秒 → 排出	11.5	7.2	6.2
RV-1 (B) (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 30秒 → 振動付与(B) 60秒 → 排出	15	9	8
RV-1 (A+B) (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 30秒 → 振動付与(A+B) 60秒 → 排出	13.5	8.5	7.5
RV-1 (A+B) Air調整 (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 30秒 → 振動付与(A+B) 60秒 → 排出	1.2	4	3
RV-3 (A+B) (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 90秒 → 排出 ←-----振動付与(A+B) 180秒----->	3	5.9	4.9
RV-0 (1)	C+S → 30秒 → W → 60秒 → G → 60秒 → 停止 → 60秒 → 練混ぜ → 30秒 → 排出	3	7.2	6.2
RV-0 (2)	C+S+G → 90秒 → W → 60秒 → 停止 → 60秒 → 練混ぜ → 30秒 → 排出	3	4.1	3.1
RV-3 (A+B) (2)	C+S+G → 90秒 → W → 90秒 → 排出 ←-----振動付与(A+B) 180秒----->	2.5	4.4	3.4

記号の意味 C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 W:水

図 - 1 練混ぜ方法とフレッシュコンクリートの試験結果

コンクリート工場の練混ぜ方法であり、(2)は最初にセメント、細・粗骨材の一括投入でコンクリートを作製する練混ぜ方法である。実際のレディミクストコンクリート工場では、(2)の骨材投入順序は現実的ではないが、今回は実験室レベルでの検討として行った。RV-1(A+B)(1)Air調整の配合は、Rの配合でAE剤を入れずに空気量をRV-0(1)の空気量3.6%程度に調整したものである。RV-0(1)は、2配合あるが、振動条件と骨材投入順序の比較用として日を変えて2回実験を行い、考察はそれぞれの実験データを用いた。

コンクリートの練混ぜは、表-1に示すミキサを用い、練混ぜ量を60リットル、練混ぜ時間を3分で一定とした。練混ぜ方法のフローチャートとフレッシュコンクリートの試験結果を図-1に示す。

2.4 試験方法及び測定項目

本研究における試験方法と測定項目一覧を表-5に示す。耐久性試験として後述する液体窒素ガスを用いた簡易急速凍結融解試験を実施した。

2.4.1 液体窒素ガスを用いた簡易急速凍結融解試験

本試験方法は、円柱供試体のコンクリートの一部を凍結融解させ、相対動弾性係数による耐久性評価を行うものであり、著者らが開発した³⁾。JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方

法」による耐久性の評価を行うには多大な労力と時間が必要であることから、凍結融解のメカニズムは異なるが、簡単に凍結融解抵抗性を相対的に評価する方法として考案したものである。

動弾性係数は、凍結融解作用によって劣化したコンクリート部位の超音波伝播時間の測定から算出する。簡易急速凍結融解試験に用いた供試体の材齢は28日である。

著者らが開発した液体窒素ガスを用いた簡易凍結融解試験方法を以下に記す。

- 1) 0サイクルにおける超音波伝播時間を測定し、超音波伝播時間から動弾性係数を求める。
 - 2) 容器に供試体を入れ、液体窒素ガスを30秒吹き付ける。
 - 3) 蓋を閉めて1分間おく。
 - 4) 1分後、供試体を取り出し融解するまで10分間40℃のお湯に浸す。
 - 5) 完全に融解した供試体表面の水気を拭い、超音波伝播時間を測定する。端子の設置位置は、シリンダー底面から約15mm程度とする。
- 1)~5)の作業を1サイクルとし、5サイクル行った時点で試験終了とした。

伝播時間から動弾性係数を求める式として、既往の研究結果⁴⁾より(1)式を用いた。

$$Ed = 4.0387VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (1)$$

Ed:動弾性係数(GPa)

VL: 超音波伝播速度 (km/s)

超音波伝播時間測定方法を図 - 2 に示す。

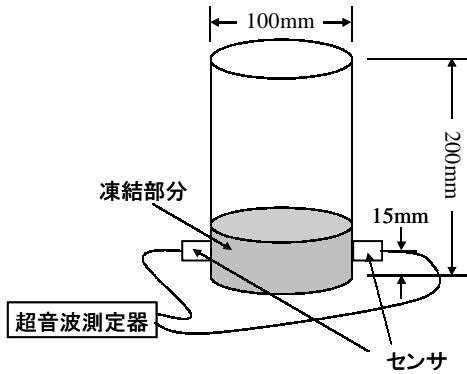


図 - 2 超音波伝播時間測定方法

3. 実験結果及び考察

3.1 ミキサの負荷電力量

ミキサの負荷電力量とスランプの関係を図 - 3 に示す。図の点線は、それぞれの配合のスランプとミキサの負荷電力量とをプロットし近似直

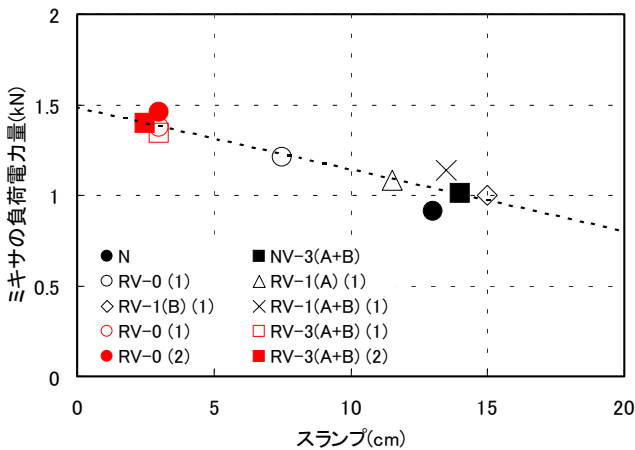


図 - 3 ミキサの負荷電力量とスランプの関係

線を示す。グラフ中のマークの黒色と赤色は製造日の違いを意味する。ミキサの負荷電力量が減少するとスランプが大きくなる。ミキサの負荷電力量とスランプとは相関関係がある。

振動付与無しの RV-0 と振動条件の異なる RV-1(A),(B),(A+B)とを比較すると、振動付与することにより、いずれの振動条件においてもミキサの負荷電力量が小さくなりスランプが大きくなる。振動付与することで練混ぜ性能が向上しフレッシュコンクリートのコンシステンシーが向上している。振動箇所の違いは明確には現れなかった。RV-3(A+B)に関しては、振動付与しているにもかかわらず、負荷電力量が大きくスランプが小さい。この要因として、RV-3(A+B)は製造日が同一ではないため、他の配合で用いた時の骨材状態とは異なっていたのではないかと考えられる。低度処理再生骨材は骨材の表乾

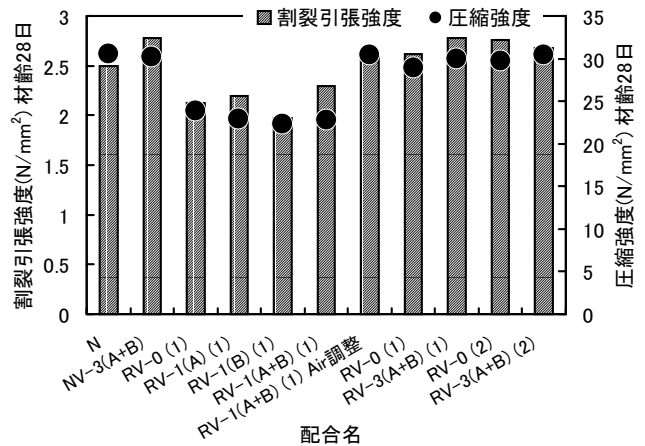


図 - 5 割裂引張強度

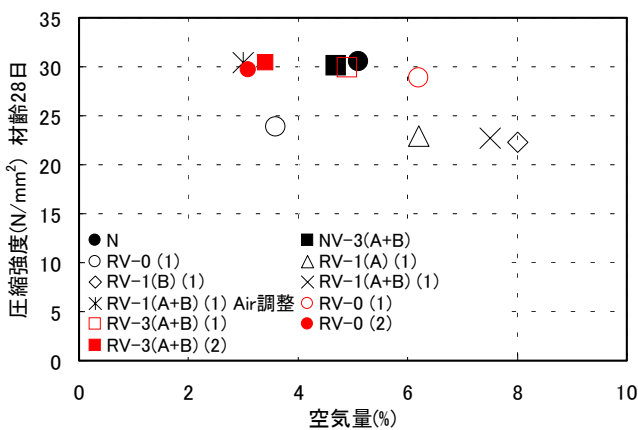


図 - 4 圧縮強度と空気量の関係

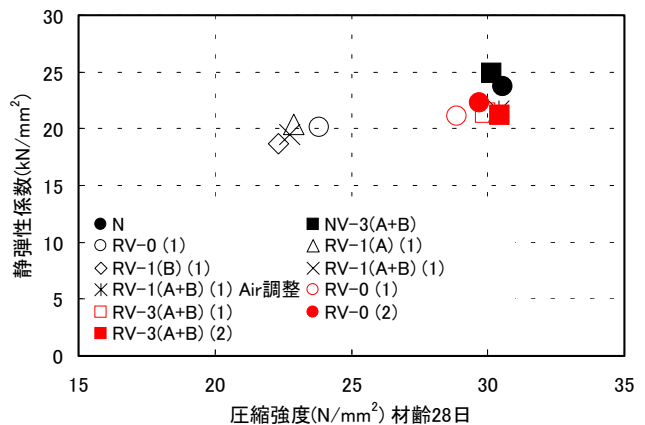


図 - 6 静弾性係数

状態の調整が難しく、フレッシュコンクリートのコンシステンシーに大きく影響するため注意が必要である。

RV-0(1),(2)および RV-3(A+B)(1),(2)を比較すると、骨材投入順序変更および振動付与の有無にかかわらず、ミキサの負荷電力量は同等の値となっており、振動付与の効果がほとんど現れていない。前述と同様に、低度処理再生骨材の表乾状態が大きく影響していると思われる。

3.2 強度および静弾性係数

圧縮強度と空気量の関係を図 - 4 に示す。振動条件の異なる RV-1(A),(B),(A+B)と振動付与無しの RV-0 を比較すると、振動付与した 3 配合は振動付与することで空気量が RV-0 の空気量より 2.5~4.5%ほど増加し、振動付与ミキサで振動付与すると空気量が多くなる傾向となった。しかし、圧縮強度を比較すると、いずれも同等の圧縮強度であり、空気量が多いにもかかわらず、強度低下が見られていない。また、RV-0 の空気量と同等に調整した RV-1(A+B)の圧縮強度と比較すると、材齢 28 日で 20%の強度の伸びが見られた。低度処理再生骨材コンクリートは、空気量調整と振動付与の両条件を満たすことで強度改善は可能である。

一括投入で空練り時間延長した練混ぜ方法でコンクリートを練り混ぜると、振動付与の有無にかかわらず、空気量が減少した。空練り時に十分な混ぜ合わせすることで、フレッシュ状態の練混ぜ時に取り込む空気量が少なくなる。製造日が同じ RV-0 (1)と RV-3(A+B) (2)とを比較すると、投入順序変更による空気量減少と空練り延長による骨材同士の摩擦による骨材界面の改善および振動付与効果によりわずかに強度改善効果が得られた。

材齢 28 日の割裂引張強度試験結果を図 - 5 に示す。割裂引張強度については、圧縮強度と同等の傾向が見られた。圧縮強度が改善されている配合は割裂引張強度も改善されている。このことより、振動付与および投入順序変更は、振動エネルギーおよび骨材同士の摩擦により骨材

界面に付着している粉体を剥離、振動付与による骨材界面の自由水の排出により骨材界面を改善し、骨材とセメントペーストとの付着を向上させると考えられる。

材齢 28 日の圧縮強度試験と静弾性係数試験結果を図 - 6 に示す。振動付与条件および骨材投入順序変更により強度改善は認められたが強度の大小に関係なくほぼ一定の静弾性係数であった。

3.3 長さ変化率

長さ変化試験結果を図 - 7 に示す。低度処理再生骨材コンクリートは、いずれの配合も同等の長さ変化率であり、振動条件および投入順序変更による有意な差は見られなかった。

3.4 凍結融解抵抗性

簡易凍結融解試験結果を図 - 8 に示す。振動付与有りの RV-1(A),(B),(A+B)は、振動付与無しの RV-0 と比較して凍結融解抵抗性が低下している。この要因として、振動付与した 3 配合について

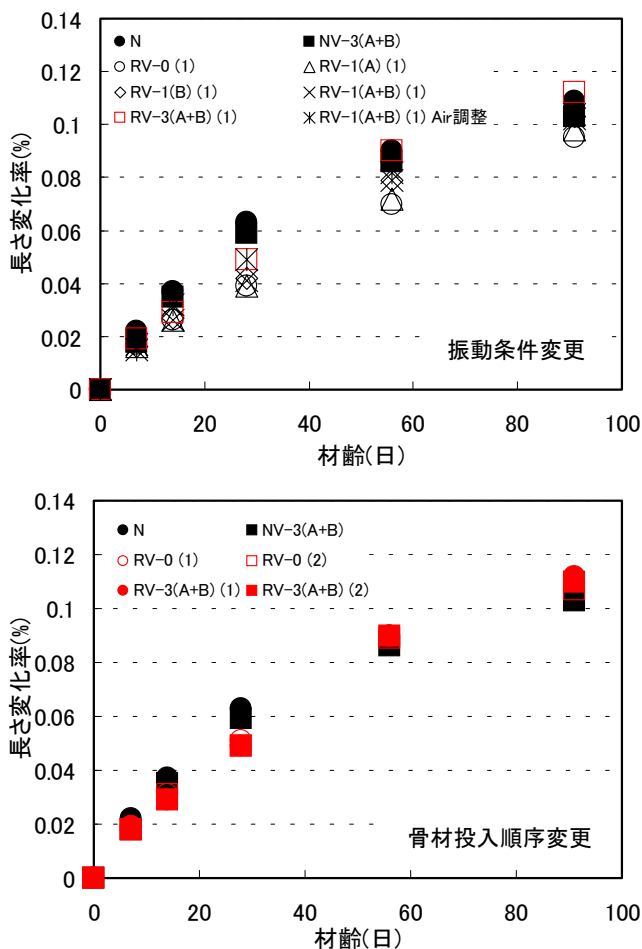


図 - 7 長さ変化率

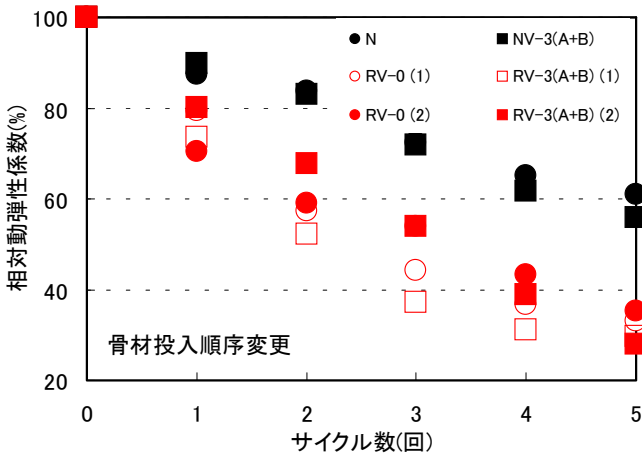
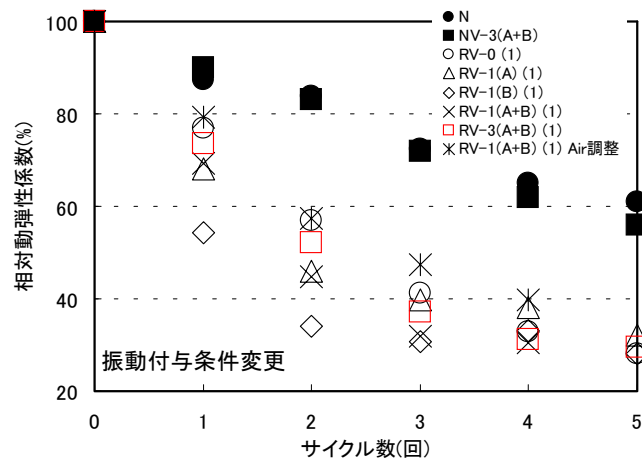


図 - 8 簡易急速凍結融解抵抗性

は、空気量が多く、凍結融解抵抗性を低下させるエントラップトエアが多く含まれていた可能性が考えられる。空気量を調整した RV-1(A+B) と RV-0 を比較すると幾分か凍結融解抵抗性が上昇している。また、骨材投入順序の違いにより比較すると、骨材一括投入の配合の方が凍結融解抵抗性は少し上昇している。振動付与および骨材投入順序変更はわずかに凍結融解抵抗性は向上するものの普通骨材の場合と比較すると、凍結融解抵抗性は低い。その要因として、原コンクリートの品質が凍結融解抵抗性に直接影響しているのではないかと考えられる。

4. 結論

本研究では、振動付与 2 軸強制練りミキサを用いて振動条件および骨材投入順序変更等の練混ぜ方法を変えて低度処理再生骨材コンクリートの品質改善効果について検討した。以下に本

研究で得られた結論を示す。

- (1) ミキサの負荷電力量とスランプとは相関関係があり、振動付与により低度処理再生骨材コンクリートのコンシステンシーを向上できる。
- (2) 低度処理再生骨材コンクリートは、振動付与と空気量調整の両条件を満たすことで圧縮強度および割裂引張強度の改善効果が得られるが、凍結融解抵抗性の改善効果はあまり期待できない。
- (3) 骨材の一括投入方式で低度処理再生骨材コンクリートを作製すると、空気量が減少させることができ強度改善効果があるが、凍結融解抵抗性の改善効果はあまり期待できない。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会平成 17 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2) (課題番号: 17360205, 研究代表: 橋本親典) に基づき実施されたものであることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nhar HENG, 橋本親典, 渡辺健, 上田隆雄: 振動付与練混ぜ工法が低度処理再生骨材コンクリートの品質に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No58, pp.525-532, 2004
- 2) 小野寺誠司, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 振動付与練混ぜ工法と防水剤を使用した低度処理再生骨材コンクリートの諸特性, 土木学会第 60 回学術講演会講演概要集第 5 部門, pp.767-768, 2005
- 3) 原田貴典, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 簡易的な凍結融解試験方法の提案, 土木学会四国支部第 9 回技術研究発表会講演概要集, pp.1251-1252, 2003
- 4) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002