

論文 骨材全量に再生細・粗骨材 L を用いたコンクリートの硬化性状に関する基礎的研究

江口 正晃^{*1}・NHAR HENG^{*2}・渡辺 健^{*3}・橋本 親典^{*4}

要旨：低度処理再生骨材を全量用いたコンクリートは、再生骨材の表面に付着する微粉末や旧セメントペーストの残分の影響のため、コンクリート強度、凍結融解抵抗性や乾燥収縮特性が著しく低下する。本研究は、低度処理再生細・粗骨材を全量用いた再生骨材コンクリートの強度と耐久性向上を図るために、低水セメント比の配合条件を実験的に検討した。また、振動付与練混ぜ工法による低度処理再生骨材コンクリートの品質向上を検討した。その結果、単位水量を 155kg/m³以下、水セメント比を 30%未満にすることにより、普通骨材コンクリートと同等の強度と耐久性を確保することができることが明らかになった。

キーワード：再生骨材, 低度処理, 振動付与ミキサ, 軽量骨材, 吸水率, 微細構造

1. はじめに

近年、日本において廃棄物量が増大し、関連する問題は深刻化している。建設廃棄物は、最終処分量の約 2 割、不法投棄量の約 6 割を占め、さらに 1970 年代の高度経済成長期に製造された大量のコンクリート構造物が更新期を迎え、排出量の増大が予測される。また、平成 12 年に循環型社会形成推進基本法が制定され、リサイクルに関する動向が活発化している。特に、産業廃棄物のうち 40%以上の廃棄物であるコンクリート塊の再生骨材用としての有効利用は不可欠である。

このような状況を鑑み、加熱すりもみ処理方法の開発が提案され、高品質な再生骨材 H が 2005 年 3 月に JIS 化された。

しかし、高品質な再生骨材を製造するためには、コスト・エネルギーの増加や製造の際に発生する微粉等の問題がある。また、2006 年 3 月に再生骨材 L を用いたコンクリートが JIS 化された¹⁾。再生骨材の用途範囲の拡大を促進させるために高品質な再生骨材でなくて、低品質な再生骨材であっても適材適所に有効利用し、その要求性能に応じた改善方法を考慮するべきである。

Nhar ら²⁾は、低度処理再生細・粗骨材を用いたコンクリートの練混ぜ途中で棒バイブレーターを挿入すること（振動付与練混ぜ工法）によって、骨材の界面が改善され、20%の圧縮強度の増進が図れることを見出した。この結果を踏まえ、新たに振動付与 2 軸強制ミキサ（60 リットル）を開発し、低度処理再生骨材コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状について実験的に検討した³⁾。その結果、振動付与練混ぜ効果は圧縮強度の増進は図れる一方、凍結融解抵抗性の向上には寄与するま

では至らなかった。

本研究では、60 リットルの振動付与 2 軸強制練混ぜミキサを用いて、再生細・粗骨材ともに低度処理再生骨材を使用したコンクリートの強度ならびに耐久性の向上を図ることを目的とし、これまでの再生骨材コンクリートの配合では実施していない範囲である、低水セメント比および低単位水量の配合条件に関して実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3430cm²/g）を使用した。

(2) 骨材

本研究で使用した再生骨材は、再生細骨材 L・再生粗骨材 L（以降、低度処理再生骨材と称す）で、東京都内で再生骨材を一般に製造・販売している企業から通常の販売方法で購入した。よって、原コンクリートは昭和 40 年代の京都内の土木系 RC のコンクリートという情報以外は不明であり、AE コンクリートあるいは Non-AE コンクリートの種別はわからない。使用した低度処理再生骨材と普通骨材の物理特性を表-1 に示す。また、低度処

表-1 低度処理再生骨材と普通骨材の物理特性

粉形(mm)	低度処理再生骨材			普通骨材		
	0~5	5~10 (G ₁₀)	10~20 (G ₂₀)	0~5	5~15	15~20
粗粒率	3.14	5.86	6.75	3.11	6.49	7.00
表乾密度(g/cm ³)	2.23	2.48	2.43	2.62	2.56	2.56
絶対密度(g/cm ³)	2.00	2.34	2.30	2.54	2.50	2.50
吸水率(%)	11.64	5.76	5.44	1.30	2.34	2.23

*1 徳島大学 工学部建設工学科 4 年 (正会員)

*2 清水建設(株) シンガポール支店 博(工) (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門助教 博(工) (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エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)



写真-1 低度処理再生細・粗骨材

理再生細・粗骨材の状態を写真-1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。低度処理再生骨材は、原コンクリート塊を粉碎・洗浄・乾燥・分級工程のみで製造しているため、骨材表面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、セメント硬化体自体が骨材になっている。

(3) 配合条件

配合条件は、単位水量が155kg/m³に対して、水セメント比W/Cを30%、50%の2種類とした。目標スランブは、18.0±2.5cm、目標空気量を4.5±1.5%とした。ただし、本研究では、振動付与練混ぜ工法が再生骨材コンクリートのフレッシュ性状に与える影響を検討するため、高性能AE減水剤（以後、SPと称す）の添加量はセメント質量に対して0.9%～1.3%を使用し、スランブと空気量の変動を実験的に検討した。

W/C30%の条件のコンクリートは、合計5配合である。SP量1.1%と1.3%添加した配合は、振動ありとなしの2種類である。SP量0.9%添加した配合は振動ありのみである。W/C50%のコンクリートは、SP量1.2%添加した配合は振動なしのみであり、SP量1.0%添加した配合は振動ありのみである。本実験に用いたコンクリートの示方配合を表-2に示す。配合名の記号は、Rが再生骨材振動なし、RVが低度処理再生骨材振動ありを意味し、その後の数字が水セメント比とSP添加量を意味する。また、低度処理再生粗骨材大(G_大)と低度処理再生粗

骨材小(G_小)の比率は7:3で一定にした。

2.2 振動付与2軸強制練混ぜミキサ

振動付与2軸強制練混ぜミキサは、2軸強制練混ぜミキサに振動機を取り付け改良したものである。練混ぜ中に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。コンクリートの練混ぜは、2軸強制練混ぜミキサを使用した。練混ぜ順序等は、セメントと細骨材を30秒間の空練り、水と混和剤を投入して振動をかける、30秒間の練混ぜを行った後、粗骨材を投入して90秒間の練り混ぜを行い、計150秒間の練混ぜ時間とした。

本研究で使用した振動付与2軸強制練混ぜミキサを写真-2に示し、振動付与2軸強制練混ぜミキサの性能諸元を表-3に示す。

2.3 試験項目及び方法

(1) スランブ試験

スランブ試験はJIS A 1101に準じて行った。

(2) 空気量試験

空気量試験はJIS A 1128に準じて行った。

(3) 圧縮強度試験

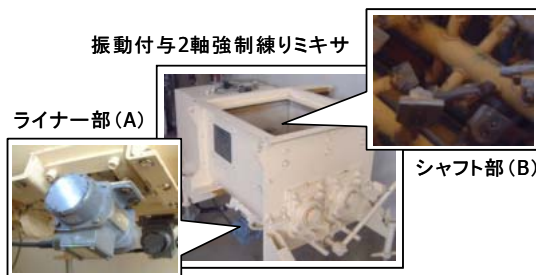


写真-2 振動付与2軸強制練混ぜミキサ

表-3 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

表-2 実験に供した示方配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							振動条件
			W	C	S	G _小	G _大	SP剤	AE剤	
R30-1.1	30	45	155	517	633	253	590	C×1.1%	C×0.005	なし
RV30-1.1				517	633	253	590	C×1.1%	C×0.005	120秒
RV30-0.9				517	633	253	590	C×0.9%	C×0.005	120秒
R30-1.3				517	633	253	590	C×1.3%	C×0.005	なし
RV30-1.3				517	633	253	590	C×1.3%	C×0.005	120秒
R50-1.2	50	48	155	310	746	264	616	C×1.2%	C×0.005	なし
RV50-1.0				310	746	264	616	C×1.0%	C×0.005	120秒

圧縮強度試験は材齢 7 日, 28 日, 91 日において, JIS A 1108 に準拠して行った。供試体は, $\phi 100 \times h200\text{mm}$ の円柱供試体を作製し, 所定の試験材齢まで 20°C で水中養生を行った。

(4) 乾燥収縮試験

$100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を使用し, JIS A 1129-2 に準拠して行った。試験を行う乾燥材齢は 7 日間の水中養生を行ったのちに 1, 7, 14, 28, 42, 56, 70 及び 91 日とした。なお, ゲージブラグの間隔は 100mm 間隔の 2 つとし, 供試体の中央になるように配置した。

(5) 急速凍結融解試験

湯北ら⁴⁾が提案した液体窒素ガスを用いた急速凍結融解試験方法を用いて, 急速凍結融解に対する抵抗性を評価した。 $\phi 100 \times h200\text{mm}$ の円柱供試体を使用し, 28 日間の水中養生終了後に試験を行った。

(6) JIS 法凍結融解試験

JIS 法凍結融解試験は, $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を使用し, JIS A 1148 の A 法に準拠して行った。

(7) SEM 観察による低度処理再生骨材界面の微細構造

SEM 観察用の試験体として, 圧縮強度試験を行った後の破壊片を用いた。破壊片の試験体から大きい粗骨材を取り除いた部分を骨材界面とし SEM 観察を行った。SEM 観察用の試験体を写真-3 に示す。



写真-3 SEM 観察用の試験体

3. 実験結果及び考察

3.1 再生骨材コンクリートのフレッシュ性状

低度処理再生骨材コンクリートの振動有無および SP 添加量が, スランプおよび空気量に与える影響について, 図-1 と図-2 に示す。なお, 空気量は, 空気量試験で得られた見かけ空気量から骨材補正係数の 0.7% を差し引いた値を用いた。

全ての低度処理再生骨材コンクリートは, SP 添加量が増えるにしたがって, スランプが増加した。W/C30% のコンクリートのスランプは, 同一 SP 添加量において, 振動あり (RV30-1.1, RV30-1.3) は, 振動なし (R30-1.1, R30-1.3) と比較して, それぞれ約 3cm スランプの増加が見られた。SP 添加量を 1.1% 以下に添加した低度処理再生骨材コンクリート (R30-1.1, RV30-1.1 と RV30-0.9) は, 振動有無に関係なく, スランプ値が約 15cm 以下と

なった。振動有無に関係なく, SP 添加量とスランプは右上がりの直線関係になるが, 振動有の方が, わずかながら振動無よりも同一 SP 添加量において, スランプが大きい。

一方, W/C50% のコンクリートでは, 振動ありのもの (RV50-1.0) は振動なしのもの (R50-1.2) と比較して, SP 添加量が 0.2% 少なかったにもかかわらず, スランプ値はほぼ同じ値を示した。

以上の結果から, 練混ぜ途中で振動を付与することによって, 低度処理再生骨材コンクリートのフレッシュ性状を向上させる効果があると考えられる。この理由に関しては, 著者らの想像の域ではあるが, 練混ぜ時の振動付与は, 再生骨材の内部に吸水された水量を骨材表面外部であるセメントマトリックス内に排出させる物理的な効果があると考えられる。つまり, 振動付与によって, 単位水量が一時的に増加し, 同一 SP 添加量でスランプが大きくなったと思われる。これは, 振動付与することによって, 同一スランプに対して SP 添加量を減少させることを示唆するものである。W/C が大きい方がこの振動による再生骨材内部の水量の排出効果が大きい理由としては, W/C が大きい方が, セメントに吸着しない自由な水量が多いためである。

空気量に関しては, 同一水セメント比において, SP 添加量が多くなると空気量が増大した。高性能 AE 減水剤自体に空気連行性があるためと考えられる。W/C30% の配合では, 振動有の R30-1.1 を除いて, 振動有無に関係なく目標空気量の範囲内に満足した。一方, W/C50% の 2 配合は, とともに目標空気量の $4.5 \pm 1.5\%$ より大きくなった。低度処理再生骨材は吸水率が非常に大きいため, 空気量の調整は, 通常コンクリートと比較して十分に検討する必要がある。

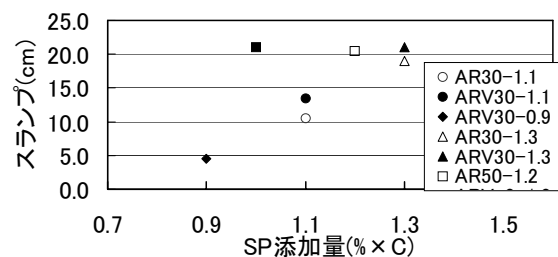


図-1 SP 添加量とスランプの関係

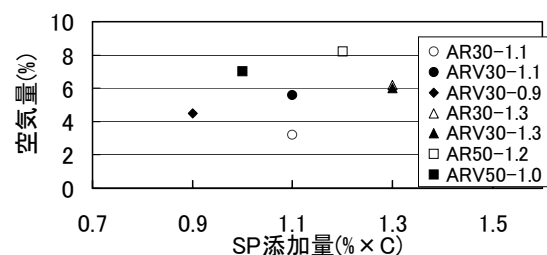


図-2 SP 添加量と空気量の関係

空気量は、スランプほど振動付与の効果は明確ではないが、振動付与した4配合のうち、RV50-1.0を除いて、すべて目標空気量の範囲内にある。振動なしのR30-1.1とR50-1.2は、目標空気量の範囲から上下に大きく外れている。よって、振動付与することによって、吸水率の大きい低度処理再生骨材コンクリートの空気量を制御しやすくさせることができる可能性がある。

3.2 再生骨材コンクリートの圧縮強度特性

再生骨材コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を図-3に示す。

全てのコンクリートにおいて水セメント比が小さいほど圧縮強度は大きくなった。一般に、低度処理再生骨材コンクリートは低度処理再生骨材周辺の微粉末や骨材表面の空隙等の影響でセメントペーストとの付着強度が小さく、水セメント比に対する圧縮強度の発現には限界があり、あまり期待できないと言われている。しかしながら、本研究では、W/Cを30%配合した再生骨材コンクリートの圧縮強度が材齢91日で50N/mm²程度まで発現しており、W/C50%のコンクリートと比較して、約2倍の圧縮強度に達する。W/Cを30%まで小さくすることによって、50N/mm²程度の高強度レベルの再生骨材コンクリートを製造する可能性が明らかになった。

また、材齢7日から28日までの強度発現が普通コンクリートにおいて約40%以上の伸びがあると一般に言われるが、低度処理再生骨材コンクリートにおいては、15%以下の強度伸びしかなかった。低度処理再生骨材の表面に多くの微粉や旧モルタルが付着するために、セメントの水和反応を阻害すると考えられる。これは低度処理再生骨材の強度特性の一つであり、長期強度の増加を期待することができない。したがって、普通骨材コンクリートと比較して、材齢28日の配合強度に対するW/Cは相当に低く設定しておく必要がある。

振動有無の影響に関しては、W/C50%の2配合を比較すると、材齢91日の圧縮強度において、振動有りの方が15%程度の増加がある。しかしながら、W/C30%の5配合を比較すると、振動有無に関係なくほぼ同等である。

W/Cが大きい場合、振動を与えることにより低度処理再生骨材の表面に付着する微粉や旧モルタルを剥離させ、その微粉や旧モルタルが水と吸着し、見かけのW/Cが小さくなり、

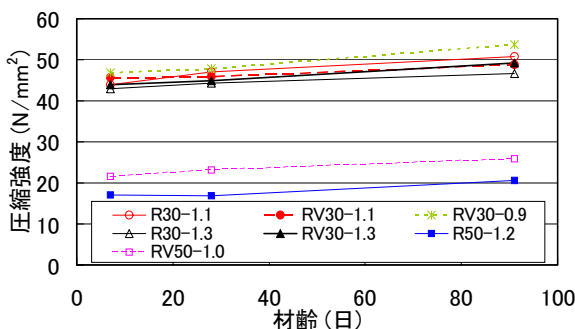


図-3 コンクリートの圧縮強度と材齢の関係

かつ骨材界面の品質が改善され、圧縮強度の増進が図れたものと考えられる。なお、フレッシュ性状における水分の移動過程(排出)と硬化時における水分の移動過程(吸水)が逆になっているのは、時間軸のスケールの違いによるものであると思われる。振動の有無がスランプに及ぼす影響は、練混ぜ時の数分の時間軸であり、振動の有無が圧縮強度に及ぼす影響は、養生期間の日数の時間軸である。

W/Cが小さい場合、コンクリートの粘性が高くなり、セメントマトリックスの強度が十分に発現し、振動有無の違いが顕在化するまでには至らなかったと思われる。

3.3 再生骨材コンクリートの耐久性

(1) 乾燥収縮量

コンクリートの乾燥収縮量及び質量減少率と乾燥材齢の関係を図-4、図-5に示す。W/C50%の再生骨材コンクリートの乾燥収縮量は、振動有無に関係なく乾燥材齢91日で、約1100 μ となり、同条件の普通コンクリートより大きい値を示した。一般的に、低度処理再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮量は、低度処理再生骨材の吸水率が普通骨材と比較して非常に大きいため、乾燥収縮量も大きくなると指摘されている⁵⁾。

一方、W/C30%の再生骨材コンクリートは、振動有無に関係なく、乾燥材齢91日で、乾燥収縮量が800 μ 以下であり、鉄筋コンクリート構造物設計の上限値⁶⁾以下に抑制できる結果となった。

一般に、コンクリートの乾燥収縮量は単位水量のみに依存する。また、水セメント比が小さくなると、セメントマトリックス部分が増加するため、収縮量は増加する。しかしながら、低

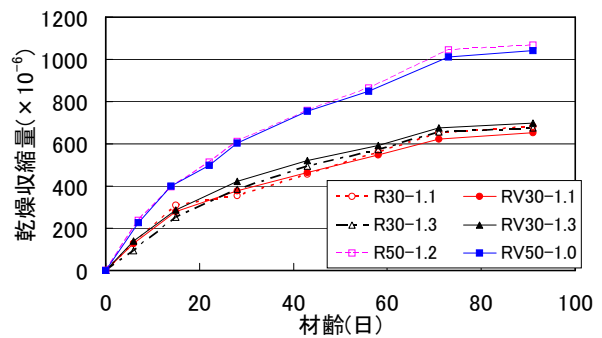


図-4 乾燥収縮量と乾燥開始からの材齢の関係

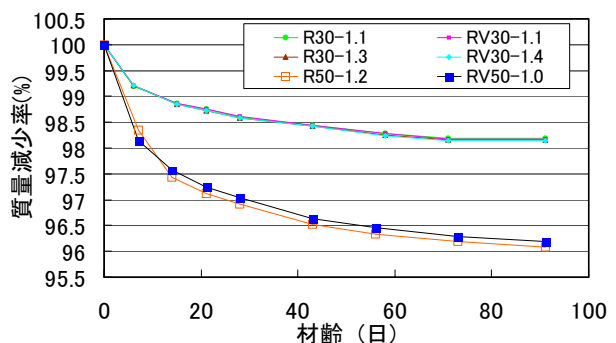


図-5 質量減少率と乾燥開始からの材齢の関係

度処理再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮は、同一単位水量において、水セメント比が小さくなることによって低減する結果となった。この理由に関しては、著者らの想像の域ではあるが、Zhang ら⁷⁾の軽量骨材コンクリートの遷移帯構造の緻密化現象が、低度処理再生骨材コンクリートにも起こったものと思われる。すなわち、表層に空隙やひび割れが存在する多孔質な軽量骨材を用いた場合、軽量骨材の表面とセメントペーストの機械的絡み（インタロッキング）によって、界面の組織が緻密になり、ペーストマトリックスの組織と均一化し、物質移動に対する抵抗性が、普通骨材コンクリートよりも向上するという知見である。特に、低水セメント比のセメントペーストによって、低度処理再生骨材の表面空隙内に形成される遷移帯の構造がより緻密になり、コンクリート全体としての収縮量が小さくなったと考えられる。なお、低度処理再生骨材と軽量骨材の空隙構造の差異および低度処理再生骨材の表面微粉の影響については、今後の検討課題である。

一方、微粉除去の効果を期待した振動の有無による乾燥収縮に関しては、有意な差が見られなかった。

また、質量減少率は、W/C50%より30%の方が、少なくなり、乾燥収縮量の結果と同様の傾向が見られた。低度処理再生骨材コンクリートの場合も通常のコンクリートと同様に、乾燥収縮量と質量減少率には高い相関性がある。

(2) 急速凍結融解試験結果

再生骨材コンクリートの急速凍結融解試験によって得られた相対動弾性係数と繰返し回数関係を図-6に示す。

10サイクル終了時点での相対動弾性係数がW/C30%の場合において、振動有無に関係なくすべて55%前後となり、凍結融解抵抗性の限界線の60%以下に低下した。

これに対して、W/C50%のものでは3サイクル終了時点で相対動弾性係数の60%を大きく下回っており、円柱供試体の表面にひび割れが確認できた。

以上の急速凍結融解試験の結果から、低度処理再生骨材を用いたコンクリートの相対動弾性係数を10サイクル終了時に60%以上に確保するためには、水セメント比を30%未満に下げることが必要である。

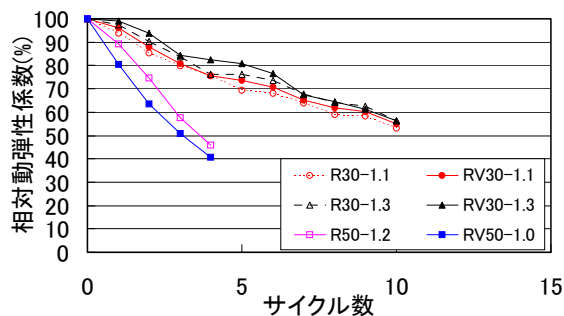


図-6 急速凍結融解によって得られたサイクル数に伴う相対動弾性係数の低下

(3) JIS法凍結融解試験結果

再生骨材コンクリートのJIS法凍結融解試験によって得られたサイクル数に伴う相対動弾性係数及び質量減少率の関係を図-7、図-8に示す。

300サイクル終了時点での相対動弾性係数は、RV30-1.1が69%であり、R30-1.1が67%となった。これに対して、R30-1.3及びRV30-1.3は300サイクル終了時点での相対動弾性係数が60%以下となった。一方、R50-1.2の相対動弾性係数は、急速に低下し210サイクル終了時点では、60%以下まで低下した。前述したように、Zhang ら⁷⁾の軽量骨材コンクリートの遷移帯構造の緻密化現象が、W/C30%の低度処理再生骨材コンクリートに発生し、低水セメント比のセメントマトリックスが低度処理再生骨材の空隙に浸透して、全体のコンクリートの組織が緻密になり凍結融解抵抗性が向上したと考えられる。配合R30-1.3とRV30-1.3の空気量が6%前後であり、R30-1.1とRV30-1.1の空気量より大きく、凍結融解抵抗性が若干低下したものと思われる。通常のコンクリートでは、凍結融解抵抗性に影響を及ぼす空気量の範囲ではないが、骨材全量に低度処理再生骨材を使用したコンクリートでは、空気量の増減が凍結融解抵抗性に及ぼす影響は敏感であると思われる。一方、振動の有無による凍結融解抵抗の向上は見られなかった。

以上の結果から、急速凍結融解試験から得られた結果はJIS法凍結融解試験とほぼ同様の結果となり、RV30-1.1とR30-1.1が凍結融解抵抗性の目安とされる相対動弾性係数60%以上を満足し、低度処理再生骨材を用いたコンクリート

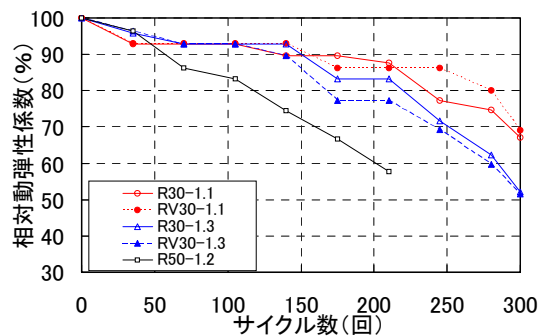


図-7 JIS法凍結融解試験によって得られたサイクル数に伴う相対動弾性係数

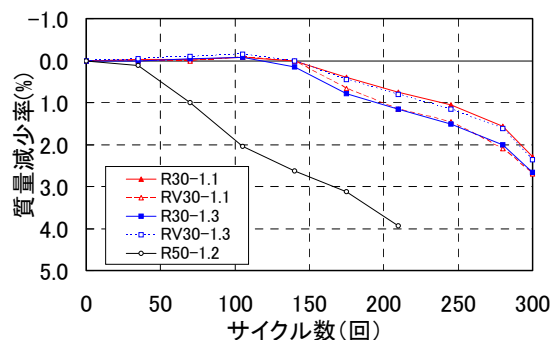


図-8 コンクリートの質量減少率

にもかかわらず、必要最小限の凍結融解抵抗性を有するといえる。このことから低度処理再生骨材を全量用いた再生骨材コンクリートは、所要の空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を確保し、水セメント比を 30%、単位水量を $155\text{kg}/\text{cm}^3$ にすることによって必要最小限の凍結融解抵抗性を確保することができる可能性がある。

3.4 SEM 観察による再生骨材界面の微細構造

写真-4にSEM観察によるW/C50%の低度処理再生骨材コンクリートの骨材界面の微細構造を示す。R50-1.2の骨材界面が500倍と1000倍の写真においても、空隙が多く見られ緻密ではない。

一方、振動を与えたRV50-1.2の骨材界面では、振動なしのR50-1.2と比較して、空隙が少ない。よって、振動付与練混ぜ工法は、低度処理再生骨材の表面に付着する微粉や旧モルタルを剥離させることによって骨材界面の品質を改善する効果があり、15%以上の圧縮強度の増加になったと考えられる。

写真-5はSEM観察によるW/C30%の低度処理再生骨材コンクリートの骨材界面の微細構造である。振動有無に関係なく、W/Cを30%のR30-1.1、RV30-1.1の骨材界

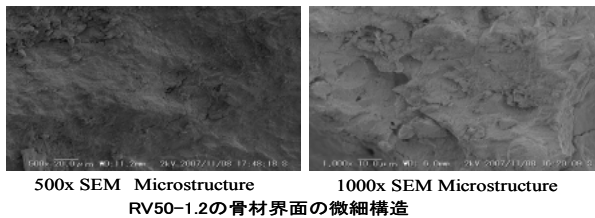
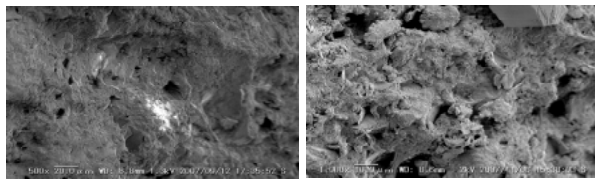


写真-4 SEMの観察によるW/Cを50%用いた再生骨材界面の微細構造

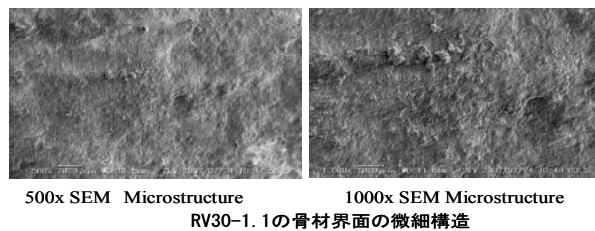
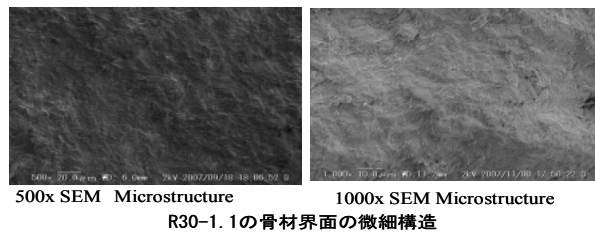


写真-5 SEMの観察によるW/Cを30%用いた再生骨材界面の微細構造

面は、ほとんど空隙がなく緻密な微細構造である。吸水率が非常に大きくかつ骨材表面に付着した微粉末や凸凹をもつ再生骨材をコンクリートに使用する場合、単位セメント量を増やすことによって、セメントマトリックスが再生骨材の空隙に浸透し、骨材の組織が緻密になり、コンクリートの強度及び耐久性が増加したと考えられる。なお、Zhangら⁷⁾の軽量骨材コンクリートの遷移帯構造の緻密化が低度処理再生骨材コンクリートの遷移帯構造にも起こっているか否かは、さらなる微細構造の分析が必要であり、今後の検討課題である。

4.まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に記す。

- (1) 原コンクリートがAEコンクリートあるいはNon-AEコンクリートであるかが不明であっても、水セメント比を30%未満、単位水量を $155\text{kg}/\text{m}^3$ 以下にすることによって、普通骨材コンクリートと同等な強度および耐久性を有する再生骨材コンクリートができる可能性がある。
- (2) 振動付与練混ぜ工法を適用した低度処理再生骨材コンクリートは、振動付与しないものと比較してフレッシュ性が向上し、高いW/Cの場合、15%以上の圧縮強度増加を得ることが明らかになった。

なお、低度処理再生細・粗骨材を全量用いたコンクリートの高性能化を実用化するためには更なるデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 日本工業標準調査会 審議: 日本規格協会, 再生コンクリートLを用いたコンクリートJIS A 5023, 平成18年3月25日, 制定
- 2) NHAR HENG, 渡辺健, 橋本親典, 上田隆雄: 振動付与練り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, No.58, pp.525-532, 2004
- 3) 小野寺誠司, 牛尾仁, 吉田元昭, 橋本親典: 振動付与2軸強制練混ぜ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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1481-1486, 2006
- 4) 湯北記代彦, 橋本紳一郎, 加地貴, 橋本親典: 液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化, コンクリート工学年次論文集 Vol.28, No.1, pp.887-892, 2006.
- 5) 棚野博之ら: 中品質再生骨材を用いた再生骨材コンクリートの性能評価と活用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.165-170, 2007
- 6) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ抑制設計・施工指針(案)・同解説, 2006
- 7) Mino-Hong Zhang and Odd E.Gjorv: MICROSTRUCTURE OF THE INTERFACIAL ZONE BETWEEN LIGHTWIEHGT AGGREGATE AND CEMENT PASTE, CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol.20, pp. 610-618, 1990