

論文 実機ミキサおよび室内試験練りミキサで製造した全量再生骨材コンクリートのフレッシュ性状と強度特性の比較

山口 輝幸^{*1}・牛尾 仁^{*2}・橋本 親典^{*3}・石井 光裕^{*4}

要旨: 60 リットルの振動付与 2 軸強制練混ぜミキサおよび実用化に向けて開発した 1000 リットルの振動付与 2 軸強制練混ぜミキサを使用して, 低品質な再生骨材を全量骨材としたコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度特性を検討した。その結果, フレッシュ性状に関しては, スランブは実機練りと試験練りで大きな差が生じた。空気量は実機練りと試験練りでほぼ同程度の値となった。一方, ミキサの違いによる圧縮強度の差はほとんど見られなかった。また, セメントの一部を FA に置換した場合, 材齢 28 日程度で FA 無混入の低度処理再生骨材コンクリートの圧縮強度と同等以上になる。

キーワード: 再生骨材, 実機練りミキサ, 試験練りミキサ, フライアッシュ, フレッシュ性状, 強度特性

1. はじめに

近年, コンクリート塊から骨材を再生し, それを用いたコンクリートとして, コンクリート用再生骨材 H, 再生コンクリート M・L がそれぞれ JIS に制定され, 平成 21 年には, コンクリート用再生骨材 H がレディーミクストコンクリート (JIS A 5028) 付属書 1 に規定された。しかし, コンクリート用再生骨材 H は, 再生に多大のエネルギーが必要となり, 歩留りは 50% 程度であり, 副産される微粉の処理が問題として残る。再生骨材 M・L は低コストで製造できるが, 低品質で用途に制限があり普及には至っていない。

これらの現状を踏まえ, Heng ら¹⁾は, 低度処理再生骨材コンクリートの練混ぜ途中に棒バイブレーターで振動を加える (振動付与練混ぜ工法) ことにより, 圧縮強度の増進が図れることを見出した。そこで江口ら²⁾は全量低品質の再生骨材を使用した再生骨材コンクリートの品質向上を目的に, 新たに開発した 60 リットルの振動付与 2 軸強制練混ぜミキサ³⁾ (このミキサは室内試験練りミキサであり, 以後, 試験練りミキサと称す) を用いて研究を行った。その結果, 単位水量 155kg/m^3 以下, 水セメント比を 30% 以下にすることにより, 普通骨材コンクリートと同等の強度を確保することができることを明らかにした。Heng ら⁴⁾は 60 リットルの振動付与 2 軸強制練混ぜミキサおよび実用化に向けて開発した 1000 リットルの振動付与 2 軸強制練混ぜミキサ (以後, 実機練りミキサと称す) を用いた低水セメント比および低単位水量での再生細・粗骨材コンクリートのフレッシュ性状と硬化特性の比較を行い, 実機練りミキサは空気量を確保することが難しいが, 実機練りの圧縮強度は試

験練りの場合と同等以上の強度が得られることを明らかにした。また, 廃棄コンクリート柱を再生骨材として用いる研究としては, 田中ら⁵⁾の研究で, 骨材の一部を再生骨材置換し, フライアッシュ (以後, FA と称す) とともに用いることによって, 再生骨材無置換よりも同等以上の圧縮強度発現が期待できることを明らかにした。このような現状を踏まえ, 江口ら⁶⁾はコンクリートボールを原コンクリートとした再生骨材を対象に FA と骨材全量を再生骨材としたときの FA コンクリートの硬化特性を実験的に検討し, 単位水量 155kg/m^3 以下, 水セメント比を 30% 以下, FA を細骨材容積置換 20% 混入することによって, 材齢 91 日強度が 80N/mm^2 近くまで増進し, 材齢 7 日の早期材齢からポズラン反応が期待できることを明らかにした。

本研究では, 江口ら^{2,6)}が行ってきた研究の高強度コンクリートの考え方をもとに, FA を用いることで単位セメント量を減少できると考え, FA をセメント代替として用いた全量再生 FA コンクリートの実用化の可能性を検討した。

振動付与 2 軸強制練混ぜミキサを用いた試験練りミキサと実機練りミキサを用いて再生骨材 FA コンクリートの振動付与の効果, フレッシュ性状および圧縮強度の比較を行い, 試験練りの結果から実機練りの結果を予測が可能であるか検討することが目的である。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメントおよびフライアッシュ

セメントは, 普通ポルトランドセメント (密度

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 1 年 (正会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 3 年 (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教授 工博 (正会員)

*4 (株)四国総合研究所 土木技術部 博 (工) (正会員)

表-1 低度処理再生骨材の物理的性質

項目	低度処理再生骨材		再生骨材の JIS 規格			
			再生骨材 M		再生骨材 L	
粒度 (mm)	0~5	5~20	0~5	5~20	0~5	5~20
表乾密度 (g/cm ³)	2.30	2.45	---	---	---	---
絶乾密度 (g/cm ³)	2.14	2.34	2.2以上	2.3以上	---	---
微粒分量 (%)	6.7	1.6	7.0以下	1.5以下	10以下	2.0以下
吸水率 (%)	7.74	4.49	7.0以下	5.0以下	13以下	7.0以下
粗粒率	3.33	6.56	---			---

3.16g/cm³, 比表面積 3380cm²/g) を使用した。FA は, II 種相当 (密度 2.24g/cm³, 比表面積 3878cm²/g, 強熱減量 2.3%) を使用した。

(2) 骨材

本研究で使用した再生骨材は, 廃品コンクリートポール (以降, 低度処理再生骨材と称す) を破碎・洗浄・乾燥・分級したものを使用した。廃品コンクリートポールのもとの配合は水セメント比 29%, 単位水量 144 kg/m³, 細骨材率 37.4% であり, このコンクリートポールが使用した骨材の細骨材および粗骨材の密度は, それぞれ 2.57g/cm³, 2.64g/cm³ であり, 細骨材および粗骨材の吸水率は, それぞれ 1.75%, 1.60% である。

表-1 に, 使用した骨材の物理的性質と再生骨材 M および再生骨材 L を用いたコンクリート (JIS A 5022, JIS A 5023) の再生骨材 M と L の品質規格を比較して示す。

本研究で使用した再生骨材は再生骨材 M に近い品質の再生骨材 L である。

(3) 配合条件

本研究に用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。配合名の記号は, R が低度処理再生骨材振動無で FA 混入無を意味し, RV が低度処理再生骨材振動有で FA 混入

無を意味し, RF が低度処理再生骨材振動無で FA 混入有を意味し, RFV が低度処理再生骨材振動有で FA 混入有を意味する。その後の数字は W/P を意味し, 数字の後の L は実機練りを意味し, S は試験練りを意味する。

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, 混和剤を使用し, スランプと空気量を実験的に検討した。RF40-L および RF40-S の配合に用いた混和剤の種類は, AE 減水剤 (主成分は, リグニンスルホル酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体) であり, 添加量はセメント質量に対して 0.7% である。RF40-L および RF40-S 以外の配合に用いた混和剤の種類は, 高性能 AE 減水剤 (主成分は, ポリカルボン酸エーテル系化合物) (以後, SP 剤と称す) であり, 添加量はセメント質量に対して 0.9 ~ 1.2% である。混和剤の添加量は予備実験により決定した。

FA は未燃のカーボンの影響で, AE 剤の空気連行性を抑制し, 空気量を確保するのが困難であり, FA 専用の AE 剤を使用することが多い。しかしながら, 本研究では, FA 用の AE 剤を使用しなかった。江口ら⁶⁾の研究によって, 低度処理再生骨材は, SP 剤を使用すると空気量が増加し, SP 剤の空気連行性の効果が強く作用することが明らかになった。そのため, 消泡剤を使用することが多い。本研究では, AE 剤を用いるのではなく SP 剤とともに消泡剤を用いて空気量の調整を行った。

Heng ら⁴⁾の研究で, 試験練りミキサを用いた場合に比べ, 実機練りミキサを用いた場合の方が, 空気量が小さくなったため, 本研究の実機練りミキサを用いた場合の消泡剤の添加量は, 試験練りよりも少なくした。

2.2 振動付与 2 軸強制練混ぜミキサ

本研究で使用した振動付与 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

表-2 コンクリートの配合

配合名	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/P (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
						W	C	FA	S	G	AE 減水剤 (C×%)	SP 剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	
RF40-L	18 ± 2.5	5 ± 1.5	40.0	48.7	49	165	339	74	687	847	0.7%	-	0.001%	
RF40-S														
R50-L			50.0	50.0	49		330	-	767	850	-	1.2%	-	0.004%
RV50-L														
RF50-L			50.0	66.3	51		249	81	746	848	-	1.2%	-	0.002%
RFV50-L														
RF50-S			60.0	87.3	53		189	86	796	835	-	0.9%	-	0.006%
RFV50-S														
RF60-L			-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
RF60-S														



写真-1 振動付与2軸強制練ミキサ(1000リットル)

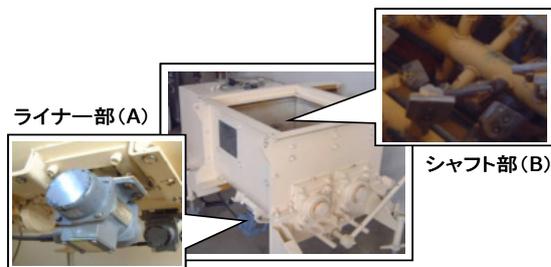


写真-2 振動付与2軸強制練混ぜミキサ(60リットル)

表-3 60リットルミキサの性能諸元

ミキサ諸元		
機種	N社製 60リットル2軸強制ミキサ	
動力	200V, 3.7kw	
軸回転数	45rpm	
振動機構諸元		
部位	シャフト部振動(A)	ライナー部振動(B)
加振力	2.5kN	2kN
振動数	116Hz	56Hz

である。練混ぜ途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。

本研究の実機練りで使用した振動付与2軸強制練混ぜミキサを写真-1に示し、試験練り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、試験練りで使用したミキサの性能諸元を表-3に示す。

2.3 練混ぜ方法

本研究での練混ぜ方法は、セメント→FA (FAを混入する場合) →細骨材→粗骨材の順にミキサに投入し、30秒間練混ぜ後、水・混和剤を投入して90秒間練混ぜを行った。振動付与練混ぜの場合は、水・混和剤を投入した90秒間の練混ぜ時に振動付与を行った。

実機練りは1バッチ500リットルとし、試験練りは1バッチ60リットルとして練混ぜた。

2.4 試験項目及び方法

(1) スランプ試験

スランプ試験はJIS A 1101:2005に準じて行った。

(2) 空気量試験

空気量試験はJIS A 1128:2005に準じて行った。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は材齢7, 14, 28および56日において、

表-4 フレッシュ性状

配合名	RF 40-L	R 50-L	RV 50-L	RF 50-L	RFV 50-L	RF 60-L
スランプ (cm)	12	10	7.5	11.5	10	14
空気量(%)	5.2	8.4	5.3	5.3	4.7	8.4

JIS A 1108:2006に準じて行った。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で水中養生した。

(4) 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験は材齢28日において、JIS A 1113:2006に準じて行った。供試体の形状および養生方法は、圧縮強度試験に用いたものと同様である。

(5) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は、材齢28日において、JIS A 1149:2001に準じて行った。供試体の形状および養生方法は、圧縮強度試験に用いたものと同様である。

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

空気量は空気量試験で得られた見かけ空気量から骨材修正係数の0.7%を差し引いた値を用いている。

(1) 実機練りコンクリートのフレッシュ性状

実機練りミキサを用いた再生骨材コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す。実機練りミキサの振動有(RV50-L, RFV50-L)のスランプは、実機練りミキサの振動無(R50-L, RF50-L)よりも小さくなった。

空気量に関しては、目標空気量 $5 \pm 1.5\%$ の範囲内にするために消泡剤で調整したため、R50-LおよびRF60-Lを除いた配合は、目標空気量の範囲に収まった。R50-LおよびRF60-Lは消泡剤を混入しなかったため、目標空気量 $5 \pm 1.5\%$ の範囲内に入らなかった。

(2) 実機練りと試験練りのスランプに関する比較

実機練りミキサおよび試験練りミキサを用いたコンクリートのスランプの比較を図-1に示し、Hengら⁴⁾の実験結果を図-2に示す。

Hengら⁴⁾の研究で使用した再生骨材は、一般に流通している市販の再生骨材である。細骨材の表乾密度は 2.3g/cm^3 以下であり、吸水率は12%前後である。粗骨材の表乾密度は 2.5g/cm^3 以下であり、吸水率は6%以下である。(詳細は、参考文献であるHengら⁴⁾の研究を参照されたい)したがって、本研究で用いた廃品コンクリートボールを原コンクリートとする再生骨材よりも低品質である。

実機練りミキサと試験練りミキサを用いたコンクリートのスランプの差は、RFV50を除いて、2.5cm以下となり、RF50の実機練りと試験練りのスランプの差が最も小さくなった。江口ら⁶⁾は、振動付与練混ぜは再生骨材

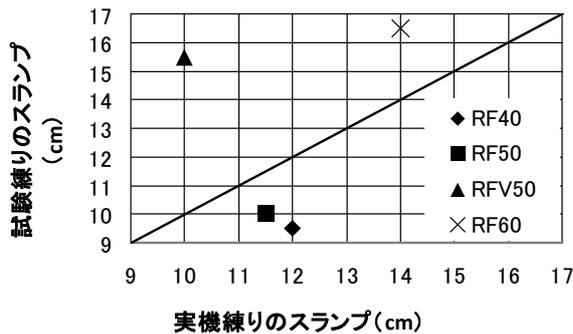


図-1 実機練りと試験練りのスランプの比較

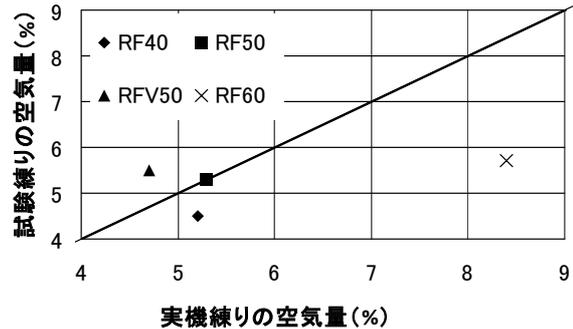


図-3 実機練りと試験練りの空気量の比較

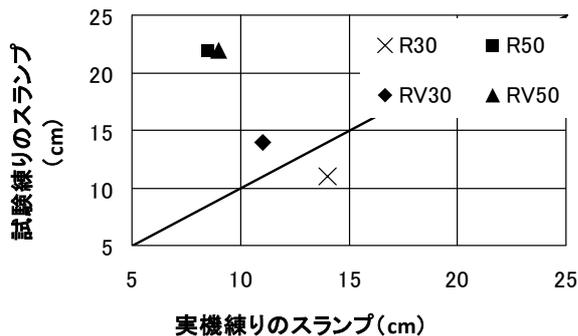


図-2 既往の研究の実機練りと試験練りのスランプの比較 (Heng⁴⁾ の実験結果)

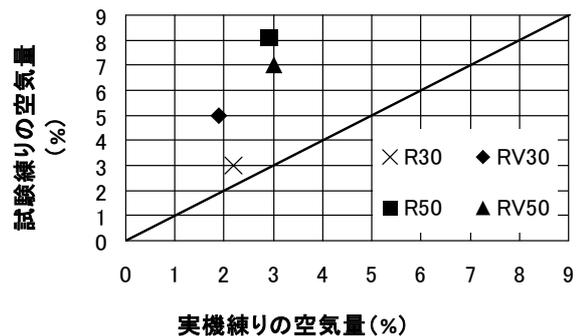


図-4 既往の研究の実機練りと試験練りの空気量の比較 (Heng⁴⁾ の実験結果)

の表面の旧セメントモルタルなどに吸水された水量を再生骨材表面外部であるセメントマトリクス内に移動させる物理的な効果があると考えている。本研究において、振動無のスランプに比べ、振動有のスランプが小さくなった原因は、振動付与によって再生骨材内から放出された水分⁶⁾が振動停止後、再度吸水したことによって、スランプロスしたためと考えた。振動による水分の放出、吸水現象は実機練りミキサで顕著になると思われる。

Heng⁴⁾の研究でも、実機練りのスランプは試験練りのスランプに比べると小さくなった。今回の実験結果とHeng⁴⁾の実験結果から、試験練りでは実機練りでのスランプの予測は難しいことが確認された。

(3) 実機練りと試験練りの空気量に関する比較

実機練りミキサおよび試験練りミキサを用いたコンクリートの空気量の比較を図-3に示し、Heng⁴⁾の実験結果を図-4に示す。

実機練りと試験練りの比較において、RF40に注目すると、AE減水剤の添加量が同一である場合、試験練りよりも実機練りコンクリートの空気量の方が大きいという結果になった。RF50およびRFV50に関しては、実機練りコンクリートの消泡剤の添加量は、試験練りよりも少ないにもかかわらず、空気量の差は、振動無(RF50-L, RF50-S)では0%、振動有(RFV50-L, RFV50-S)では

0.7%となった。RF60の試験練りと実機練りの空気量の差が2.7%という大きな値となった。原因は、試験練りのRF60-Sには消泡剤を使用し、実機練りのRF60-Lには消泡剤を使用しなかったためと考えられる。

Heng⁴⁾の研究では、実機練りの空気量は消泡剤を使用していないにもかかわらず、試験練りの空気量よりも3~5%程度少なく、実機練りでは再生骨材コンクリートの空気量を確保することが難しいという結果であった。本研究では、実機練りの空気量は、Heng⁴⁾の研究よりも調整することができた。しかし、試験練りで実機練りの空気量を予想することは難しく、空気量の調整は今後の課題である。

3.2 再生骨材コンクリートの圧縮強度特性

(1) 実機練りの圧縮強度

図-5は、W/P50%の実機練りによる圧縮強度と材齢の関係を示したものである。R50-Lの空気量のみが、8.4%と他の配合よりも大きくなり、目標空気量の範囲に入った場合のR50-Lの圧縮強度は本研究の圧縮強度よりも高い値であると予想される。

本研究の結果では、振動無(R50-L, RF50-L)の圧縮強度に比べ、振動有(RV50-L, RFV50-L)の方が大きくなり、振動付与の効果は現れた。

FA混入の有無に関しては、RF50-LおよびRFV50-LはFAをセメント代替として置換しているため、材齢7日で

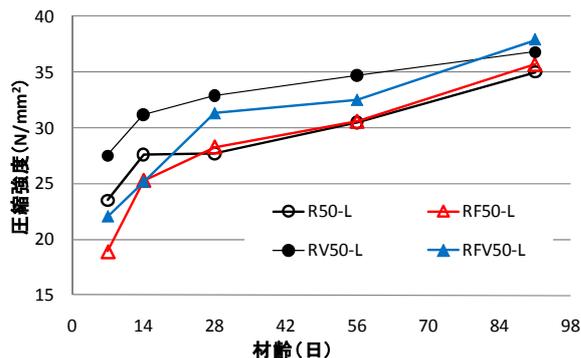


図-5 実機練りの W/P50%の圧縮強度と材齢の関係

は R50-L の圧縮強度よりも低いものの、材齢 28 日を経過すると、R50-L と同等以上の圧縮強度を得ることができた。これはポズラン反応が発現したからであると考えられる。一般的にポズラン反応が発現するのは、材齢 28 日経過後だといわれている。低度処理再生骨材は原骨材のまわりにセメントなどが付着しており、低度処理再生骨材と FA をともに用いた場合、再生骨材に付着している旧セメントペーストから $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が材齢初期の段階から溶出し、FA のポズラン活性に消費されるため、RF50-L および RFV50-L は R50-L と同等以上の圧縮強度を得ることができたと考えられる。

材齢 91 日では、RFV50-L は RV50-L の圧縮強度よりも高くなった。これは材齢 28 日経過後、再生骨材に付着していたセメントではなく、再生骨材コンクリートを作

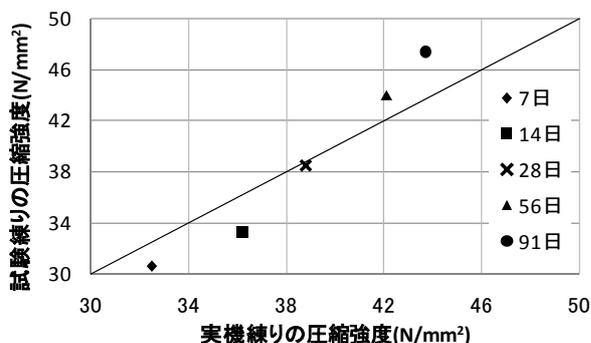


図-6 RF40 についての実機練りと試験練りの比較

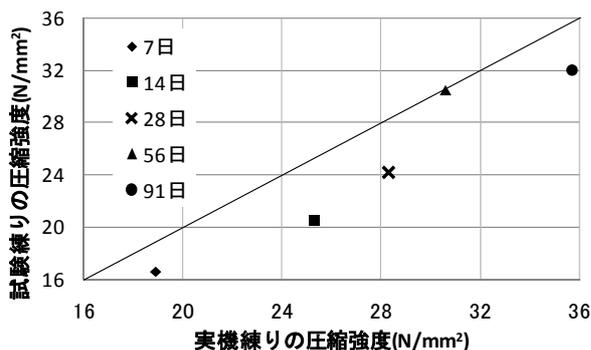


図-7 RF50 についての実機練りと試験練りの比較

製するために混入したセメントペーストから溶出した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と FA がポズラン反応を起こしたためと考えられる。

(2) 実機練りと試験練りの圧縮強度

実機練りと試験練りの圧縮強度による比較を図-6 から図-9 に示す。図-6 は RF40 実機と試験機の比較を示す。図-7 は RF50 の比較、図-8 は RFV50 の比較、図-9 は RF60 の比較を示す。

RF40 は、材齢 28 日から材齢 56 日のあたりで、試験練り(RF40-S)は実機練り (RF40-L) の圧縮強度よりも高くなり、材齢 91 日でもその関係は変わらなかった。RF50 および RFV50 は、材齢が 7, 14 日では実機練りと試験練りの圧縮強度には差があるものの、材齢が 56 日で圧縮強度に大きな差は見られない。しかし、材齢 91 日では試験練り(RF50-S, RFV50-S)の圧縮強度よりも実機練り (RF50-L, RFV50-L) の方が大きくなった。RF60 は、実機練り (RF60-L) の圧縮強度は試験練り(RF60-S)に比べると常に低いが、全ての材齢においても大きな差は見られなかった。

本研究で得られた結果から、実機練りを用いたコンクリートの圧縮強度は試験練りである程度予想できると結果となった。

3.3 圧縮強度、静弾性係数および引張強度の関係

実機練りミキサを用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10 に示し、実機練りミキサを用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係を表-5

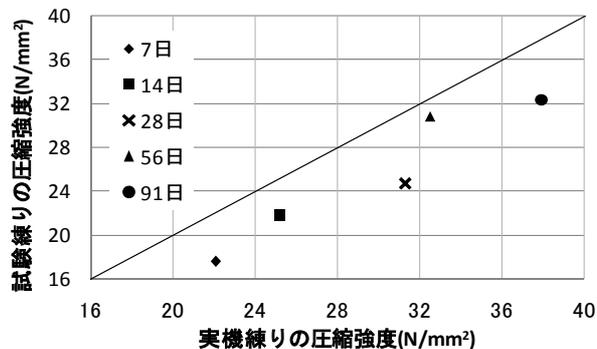


図-8 RFV50 についての実機練りと試験練りの比較

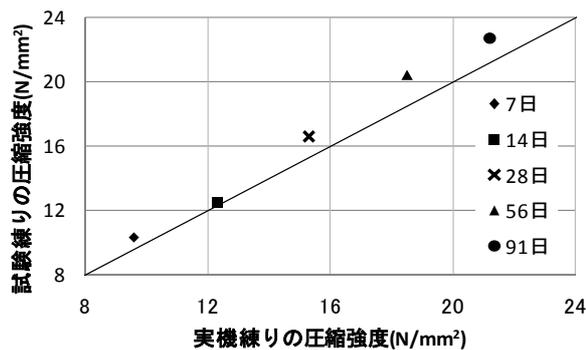


図-9 RF60 についての実機練りと試験練りの比較

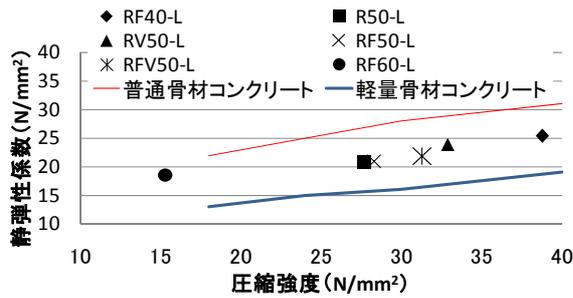


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-5 実機練りの圧縮強度と引張強度の関係

配合名	RF 40-L	R 50-L	RV 50-L	RF 50-L	RFV 50-L	RF 60-L
圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	38.8	27.7	32.9	28.3	31.3	15.3
引張強度 f_t (N/mm ²)	1.85	1.63	1.68	1.64	1.67	1.59
f_t/f'_c	1/21	1/17	1/20	1/17	1/19	1/10

に示す。

図-10の細い赤線は普通骨材コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係⁷⁾を示し、太い青線は軽量骨材コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係⁷⁾を示す。圧縮強度が高くなるとともに、静弾性係数も増加するという結果が得られた。再生骨材コンクリートの静弾性係数は、軽量骨材コンクリートの静弾性係数よりは大きい、普通骨材コンクリートまでには至らなかった。

一般的なコンクリートの引張強度は、圧縮強度の1/10～1/13であるが、本研究で得られた実験結果では、F60-L以外の引張強度が圧縮強度の1/17～1/21と非常に小さい値となった。したがって、脆度係数 (f'_c/f_t) は普通コンクリートよりも大きな値となった。

4. まとめ

廃品コンクリートボールを原コンクリートとする再生骨材Lの再生骨材を全量骨材としたコンクリートを対象として、セメントの一部をFAに置換したコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性を実機練りミキサおよび試験練りミキサの2つを用いて実験的に検討した。本研究の範囲で得られた知見を以下に記す。

1) 低度処理再生骨材は吸水率が高く、そのため、実機練りのスランプと試験練りスランプで相関性が確認できなかった。空気量に関しては、実機練りミキサを用いたフレッシュコンクリートは試験練りミキサに比べ、空気量が増加し、試験練りで実機練りの空気量を予想することは難しく、空気量の調整は今後の課題である。

2) 材齢28日までは、実機練りミキサを用いたコンクリートの圧縮強度の方が試験練りミキサよりも若干大きい、長期材齢になると圧縮強度の大きな差は見られなくなるので、再生骨材を用いた試験練りでも実機練りの予測ができ、試験練りは有効である。

3) FAを低度処理再生骨材とともに用い、セメントの一部をFAに置換した場合、材齢28日でFA無混入の低度処理再生骨材コンクリートの強度と同等以上になる。

参考文献

- 1) Heng Nhar, 渡辺健, 橋本親典, 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, No.58, pp.525-532, 2004
- 2) 江口正晃ほか: 骨材全量を再生細・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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.385-390, 2008
- 3) 小野寺誠司ほか: 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) Heng Nhar ほか: DURABILITY OF CONCRETE USING LOW QUALITY OF FINE AND COARSE RECYCLED AGGREGATE FOR THE WHOLE AGGREGATE, The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA, pp.1014-1019, 2008
- 5) 田中雅章, 大村剛, 岩田数典, 前田直文: 廃棄コンクリート柱から製造される再生骨材を活用した遠心締固めコンクリート柱に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.355-360, 2007
- 6) 江口正晃ほか: 廃品ボールを原コンクリートとする全量再生骨材コンクリートの硬化特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.385-390, 2009
- 7) 土木学会編: 5.2.5 ヤング係数, 2007年制定コンクリート標準示方 [設計編: 本編], pp.44-44, 2007

謝辞: 本研究の一部は日本学術振興会平成21年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号20360193, 研究者代表: 橋本親典)に基づき実施されたものである。また、本研究の一部は、四国電力から四国総研の委託研究において実施したものである。ここに深く感謝の意を表します。