

論文 ハイボリュームフライアッシュ再生骨材コンクリートの硬化性状に関する実験的検討

青江匡剛*1・平田大希*2・橋本親典*3・渡辺健*4

要旨: 本研究では再生骨材(本論文では廃品コンクリートボールを破砕・分級した低度処理再生骨材)とフライアッシュ(以降 FA と称す)の用途の拡大, 使用量増加を目指し, FA を多量置換した低度処理再生骨材コンクリートの硬化性状の検討を行った。その結果, FA を多量に混入した場合, 全量再生骨材コンクリートは, FA を多量に混入した普通骨材コンクリートとの強度の差は, FA 無混和のものと比べ小さくなった。再生骨材を用いることにより, 吸水率の大きい普通骨材コンクリートの乾収縮抑制効果があること, さらに, 良質な普通細骨材と再生粗骨材 100%使用の場合は, 凍結融解抵抗性の向上が認められること, 等が明らかになった。

キーワード: フライアッシュ, 再生骨材, 圧縮強度, 凍結融解, 乾燥収縮

1. はじめに

高度経済成長期に建設された構造物が供用期間を終え, 解体・廃棄の時期を迎えており, 解体の際に大量のコンクリート塊が発生している。そこで, コンクリート塊から生成されるコンクリート用再生骨材としての利用用途拡大が必要である。しかし, 高度処理された再生骨材について使用用途が多いものの, 再生に多大なエネルギーが必要となる上, 製造時に発生する多量の微粒の処理方法が十分に確立されていない問題がある。また, 低度処理された再生骨材は低コストで製造できるが, 普通骨材と比べ, 高い吸水率, 骨材界面とセメントペーストとの付着が脆弱なため, 使用用途に制限があり, 普及には至っていない。

一方石炭火力発電所では, 増設や電力需要の増加に伴い発電の際に生じる石炭灰の発生量は年々増加傾向にあり, 平成 24 年度の石炭灰発生量は全体で 1,266 万トンである¹⁾。そこで, コンクリートの混和材料である FA として利用することが有望とされているが, 混入することで初期強度の低下の懸念からコンクリートに使用する量に制限がある。FA を用いたコンクリートの施工指針(案)²⁾では, FA II 種を質量で内割置換する場合は 30%と使用限界がある。

これらの現状を踏まえ田中ら³⁾の研究では, 骨材の一部を再生骨材に置換し, FA とともに用いることで, 再生骨材無置換よりも同等以上の強度発現が期待出来ることを明らかにした。また, 橋本ら⁴⁾の研究では, 再生骨材モルタルが, 普通骨材モルタルに比べ, FA の外割混入したことによる材齢 7 日での初期強度の増進率が大きいことを明らかにした。

本論文では, FA と再生骨材の相性の良さを期待し, FA を質量内割で 1m³当たり 100kg 以上混入したハイボリューム FA 低度処理再生骨材コンクリートについて, 圧縮強度試験, 凍結融解試験, 乾燥収縮試験の結果から, 強度, 耐久性の検討を行った。

本研究は 2 つのシリーズから構成される。シリーズ 1 では, FA の混和, 無混和や全量再生骨材コンクリートと普通骨材コンクリートを比較した。シリーズ 2 では多量に FA を混和した状態で全量再生骨材に細骨材と粗骨材に普通骨材を部分混入することによって比較したシリーズ 2 を作製した。

2. 実験概要

2.1 実験目的

シリーズ 1 はハイボリューム FA 全量再生骨材コンクリートと, 普通コンクリートと比較を行った。

表-1 使用材料の物性値

材料	種類	品質
フライアッシュ	フライアッシュ II 種	密度 2.25g/cm ³ 比表面積 2910cm ² /g
シリーズ 1		
細骨材	低度処理再生砕砂	密度 2.31g/cm ³ 吸水率 9.96% 実積率 62.4%
	鳴門市撫養町産砕砂	密度 2.59g/cm ³ 吸水率 2.66% 実積率 55.1%
粗骨材	低度処理再生砕石	密度 2.52g/cm ³ 吸水率 4.21% 実積率 59.5%
	鳴門市撫養町産砕石	密度 2.58g/cm ³ 吸水率 1.65% 実積率 60.04%
シリーズ 2		
細骨材	低度処理再生砕砂	密度 2.32g/cm ³ 吸水率 9.59% 実積率 66.0%
	君津産砕砂	密度 2.67g/cm ³ 吸水率 1.06% 実積率 68.6%
粗骨材	低度処理再生砕石	密度 2.54g/cm ³ 吸水率 3.67% 実積率 57.8%
	青梅産 5号砕石	密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.51% 実積率 62.2%
	青梅産 6号砕石	密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.34% 実積率 61.7%

密度は, 表乾密度を意味する。

*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 (学生会員)

*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 博士前期課程 (学生会員)

*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 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 准教授 博(工) (正会員)

表-2 配合表

配合名	W/P (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)										目標 Slump (cm)	目標 Air (%)	Slump (cm)	Air (%)
				W	C	FA	細骨材		粗骨材		SP (P×%)	AE (P×%)	消泡剤 (P×%)				
							RS	NS	RG	NG							
シリーズ1																	
RFA0	50.0	50.0	45.0	175	350	0	690	0	921	0	0.5	0.12	0	13±2	7.5±1.5	14	6.0
RFA35		77.1			227	123	674	0	898	0	0.5	0.32		20±2		19.5	7.5
RFA40		83.3			210	140	672	0	895	0	0.3	0.16		13±2		19	6.0
NFA0		50.0			350	0	768	0	932	0.6	0.04	20±2		12		6.0	
NFA40	83	210	140	747	0	906	0.7	0.32	20±2	20.5	7.0						
シリーズ2																	
RG100 RS100	35.0	58.3	45.0	155	266	177	650	0	871	0	0.8	0.002	20±2	7.5±1.5	19.5	9.0	
RG50NG50 RS100									435	455					0.6	21.5	8.5
NG100 RS100									0	908					0.6	21.5	9.0
RG100 NS100									0	748					871	0	0.6

シリーズ 2 は多量にフライアッシュを混入した状態を前提とし、全量再生骨材コンクリートから普通骨材に部分置換することで硬化性状の改善効果を期待した。そのため、普通骨材は、シリーズ 1 とは異なり、吸水率が低く、粒径が良好なものを選択した。

2.2 使用材料

使用材料の物性値を表-1 に示す。

2.2.1 セメント及びFA

セメントは、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³, 比表面積 3340cm²/g)を使用した。FA は、II 種(強熱減量 1.6%)を使用した。

2.2.2 骨材

シリーズ 1 で使用した普通骨材に関して、細骨材は阿南市市場町産砕砂、粗骨材は徳島市板野町大坂産砕石を使用した。再生骨材は、廃品コンクリートポールを破碎・洗浄・乾燥・分級した低度処理したものを使用した。シリーズ 2 では、普通骨材を再生骨材の吸水率や粒径の差を比較するために、同じ砕石・砕砂ではあるが、吸水率が低く実積率の大きいものとし、細骨材は君津産砕砂を、粗骨材は青梅産砕石を使用した。再生骨材はシリーズ 1 と同様のものを使用した。シリーズ 1 とシリーズ 2 の物性値が異なるのは、再生骨材を入手した年度が異なるためである。

2.3 配合

表-2 に配合及びフレッシュ性状を示す。シリーズ 1 は普通コンクリートと全量再生骨材コンクリートの FA の混入による比較をした。配合条件としては、W/P を 50%, s/a を 45%, 単体量を 175kg/m³ と一定とした。R は全量再生骨材コンクリート, N は普通骨材コンクリート, FA は FA を示した。FA に続く数字は FA の質量内割の置換率を示す。シリーズ 2 は FA の量を一定とし、全量再生骨材コンクリートから普通骨材による置換の比較を行った。配合条件としては、FA を質量内割 40% で置換し、W/P を 35%, 単体量を 155kg/m³, を一定とした。

FA の多量混入を考慮し、凍結融解抵抗性の向上を目的として目標空気量を 7.5±2% に設定した。

P はセメントと FA の和を表している。配合名は NG を普通骨材, NS を普通細骨材, RG は再生骨材, RS は再生細骨材を示し、そのあとに続く数字は再生骨材の置換率を表している。FA の置換率は統一しているため、FA は省略する。再生骨材を用いた RG100RS100 を基本とし、骨材を置換した配合を検討した。

2.4. 試験方法

2.4.1 圧縮強度及び静弾性係数試験

それぞれ JIS A 1108, JIS A 1149 に順じて行った。圧縮強度試験, 静弾性係数試験材齢は, 7, 14, 28 及び 91 日の 4 材齢とした。

2.4.2 乾燥炉を用いた長さ変化試験(迅速法)

長さ変化試験(迅速法)は、乾燥収縮の抑制対策の評価を早く判定する方法として、長期の乾燥収縮を約 1/3 の材齢で得るための試験であり、井上ら^{5,6)}が考案したものである。JISA1129 と比較を行った際、結果に影響がなく、収縮の結果に対して安全側に評価出来るため、本研究では短期間で結果が得られることから、この試験方法で行った。

収縮量の値は、JIS A1129 の長さ変化試験法と比較して、少し大きめの値になる。評価値としては安全側となる試験方法⁵⁾である。

供試体は、角柱供試体(100×100×400mm)とした。図-1 に示すように、表面と裏面に、中央部分と左右 100mm の間隔でコンタクトチップを 3 枚ずつ貼り付け、測定のための標点とし、1 供試体につき表面 2 箇所、裏面 2 箇所の合計 4 箇所の 2 点間の長さ変化を測定した。最小目盛 1000 分の 1 まで読み取り、4 箇所の乾燥収縮ひずみの平均を求めることで、精度向上を図った。

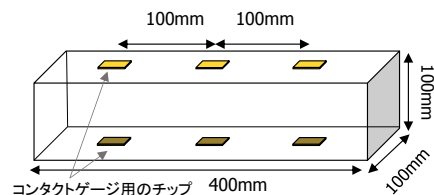


図-1 長さ変化試験で用いた供試体

脱型後2週間を水中養生したものを材齢0日とし、材齢56日まで測定を実施した。迅速法による長さ変化試験では乾燥炉を用いて、40℃で低温炉乾燥を行った。炉乾燥温度40℃は、エトリンガイトの結晶水が消失する温度以下ということから決定した。なお、相対湿度は15±5%とする。乾燥炉から供試体を取り出した直後は熱膨張を起こしているため、取り出した後24時間20℃の環境で放置し、常温に戻したものを測定することとした。材齢の一週間の6日間乾燥炉で乾燥させ、取り出した後1日経ったものを測定する。これを1サイクルとし、サイクル数が8サイクル(測定日数56日)を経過、或いは前回の収縮ひずみと今回の収縮ひずみの差が5%以下になった時、収縮は収束したものとみなし、測定を終了する。

2.4.3 液体窒素を用いた簡易凍結融解試験(急速法)

この試験は凍結融解抵抗性の評価を早く判定する方法として、約2カ月間かけて行う凍結融解試験 JIS A 1148 を1日で得るための試験であり、湯北ら⁷⁾が考案したものである。JISA1148と比較を行った結果⁸⁾より、耐凍害性を安全側に評価できるため、本研究では短時間で結果が得られることからこの試験方法で行った。

写真-1に実験状況を示す。本試験は、JIS法と比較して相当に厳しい試験であり、本試験の凍結融解の繰返し回数10サイクルは、JIS A 1148のコンクリートの凍結融解試験の繰返し回数300サイクルに相当することを弓場上らの研究⁷⁾によって報告されている。つまり、本試験の10サイクルで相対動弾性係数が60%以上であれば、JIS法の300サイクルで相対動弾性係数が60%以上であることと同等であると判断できる。

供試体は、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を使用した。供試体の材齢は28日、91日(シリーズ2のみ)とし、湿潤状態(含水率100%)状態でおこなった。これは、水中養生させた供試体をそれぞれの材齢で取り出し、表面の水分を拭き取った状態である。

液体窒素を用いた簡易凍結融解試験では、まず、写真-2に示した保冷用容器を使用し、容器内に円柱供試体を入れ、30秒間液体窒素を吹き付ける。1分間液体窒素を浸した後、供試体を容器から取り出し、約40℃程度の温水で5分間浸し、融解させる。完全に融解した後、供試体の水分を拭き取り測定を行う。この手順を1サイクルとし、この作業を繰り返し行い、相対動弾性係数60%以下になった時点、またはサイクル数10回で試験終了とした。動弾性係数は、非破壊検査手法に用いられている超音波伝搬時間を超音波測定器により測定し、その値から求めた。測定位置は、供試体を液体窒素に浸すため、最もよく凍結している供試体面底部から15mm離れた側面とした。伝播距離は100mmである。



写真-1 簡易凍結融解試験



写真-2 保冷容器

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = \left(\frac{VL_0^2}{VL_n^2} \right) \times 100$$

VL₀: 試験開始前における超音波伝播速度(km/s)

VL_n: n サイクル後における超音波伝搬速度(km/s)

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

シリーズ1, 2の圧縮強度試験の結果をそれぞれ図-2および図-3に示す。

シリーズ1についてRFA0とRFA40, NFA0とNFA40をそれぞれ比較すると、FAを置換したものは、セメントの質量内割で置換しているため、全量再生骨材コンクリート、普通コンクリートにかかわらず強度は低下した。

シリーズ1でのNFA0に対するNFA40の強度低下とRFA0に対するRFA40の強度低下を比較するために、

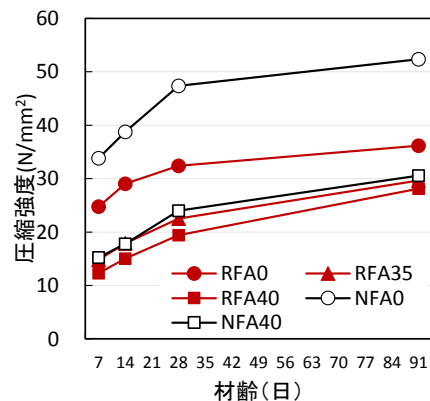


図-2 圧縮強度発現性状 (シリーズ1)

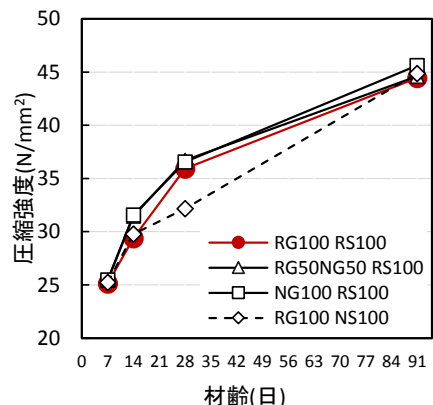


図-3 圧縮強度発現性状 (シリーズ2)

FA40%置換の有無による普通コンクリートと全量再生骨材コンクリートの強度比率を図-4に示す。強度比率は(1)式に示す。

$$\text{強度比率} = \frac{\text{全量再生骨材コンクリートの圧縮強度}}{\text{普通コンクリートの圧縮強度}} \times 100 \cdots (1)\text{式}$$

FA 無混和での普通コンクリートに対する全量再生骨材コンクリートの強度比率は材齢 7, 14, 28 日強度および 91 日強度において約 70%程度であるのに対し、FA40%置換での強度比率は材齢 7, 14 および 28 日では 80%程度であり、材齢 91 日では 90%程度であった。これらは、FA を多量に混入した場合、全量再生骨材コンクリートと普通コンクリートの強度の差は FA が無混和の場合に比べて小さくなったことを意味する。

シリーズ 2 について、RG100RS100 を基準とし、骨材を部分置換したことによる強度の増加率を図-5に示す。材齢 28 日での RG100NS100 の強度以外では全配合、全材齢において強度増加率が 10%以下であった。FA40%置換で骨材を部分置換した場合、全量再生骨材コンクリートに普通骨材を置換したとしても強度に差がないことが明らかになった。

一般に低度処理再生骨材コンクリートは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ことから、普通骨材と置換することによって強度を確保している⁹⁾。しかし、FA を多量に置換する際は、再生骨材と普通骨材の併用は全量再生骨材のものと強度の差が小さいことから、環境負荷の低減という点において、再生骨材は全量で用いた方が有効であると考えられる。

全量再生骨材のRG100RS100と強度が最も大きい配合であるNG100RS100の材齢7日における強度はともに25N/mm²と同程度となった。この結果とシリーズ1の材齢91日における強度比率の結果より、強度の観点においてはハイボリュームFAにおける再生骨材の初期による強度発現、長期強度の増進ともに良好であることが明らかとなった。

ハイボリューム FA による再生骨材コンクリートの初期強度の発現が良好な要因として、FA の微粉末の充填効果により、再生骨材の粗大な空隙が減少したことや、橋本らの研究⁴⁾では、普通骨材に比べ、再生骨材では新セメントペーストと骨材の遷移帯の部分が脆弱であるため、FA のフィラー効果(微粉末が遷移帯に充填されることで遷移帯が緻密化する現象)による影響が大きかったと考察している。そのため、再生骨材コンクリートの強度発現が大きかったと推察される。また、長期強度の増進が良好な要因としては、再生骨材に付着している旧セメントペーストに含まれる Ca(OH)₂ により FA のポズラン反

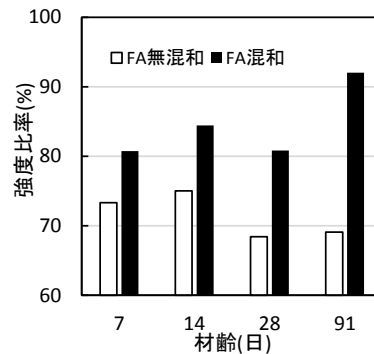


図-4 FA40%置換の有無による普通コンクリートに対する全量再生骨材コンクリートの強度比率

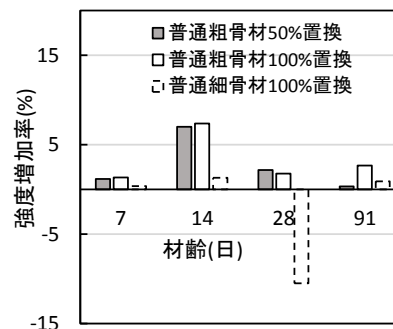


図-5 全量再生骨材 RG100RS100 の普通骨材の一部置換による強度増加率

応が活発なことが考えられる。

3.2 乾燥炉を用いた乾燥収縮試験(迅速法)

シリーズ 1 の材齢に伴う長さ試験の変化、材齢に伴う質量減少率の変化、収縮量と質量減少率の関係を、それぞれ図-6、図-7 および図-8 に示す。図-6 の RFA40 による材齢 56 日の収縮ひずみに関しては前回のひずみとの差が 5%以下になったため、収縮は収束したものとみなし、測定を終了した。また、シリーズ 2 の同様の試験結果を図-9、図-10 および図-11 に示す。

シリーズ 1 の配合を比較すると、収縮量は普通コンクリートより全量再生骨材コンクリートの方が小さくなった。また、収縮が小さくなったのにも関わらず、質量減少率は大きくなった。一般的に再生骨材を用いた場合、吸水率の影響により普通骨材に比べて乾燥による収縮量は大きくなると言われているが、本研究では、低度処理再生骨材を多く使用した方が乾燥による収縮を抑制する傾向が見られた。一つの要因として本研究で使用した再生骨材の原コンクリートの単位セメント量が 483kg, s/a が 41.0%, W/C が 30.0%とセメントリッチで高強度なコンクリートで良質な骨材であったことも考えられる。この結果は既往の研究¹⁰⁾でも類似した結果が得られている。これは次の機構が考えられる。乾燥収縮は骨材中にメニスカスが形成され、乾燥が進むと間隙水表面の曲率半径が小さくなり、毛細管張力が増大し、それにより引張応力が大きくなって体積減少が生じる。しかし、今回

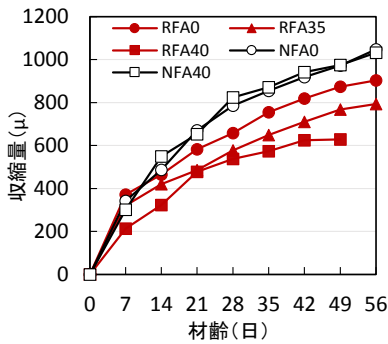


図-6 乾燥収縮量と材齢の関係
(シリーズ1)

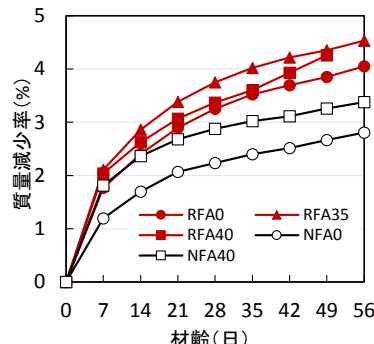


図-7 質量減少率と材齢の関係
(シリーズ1)

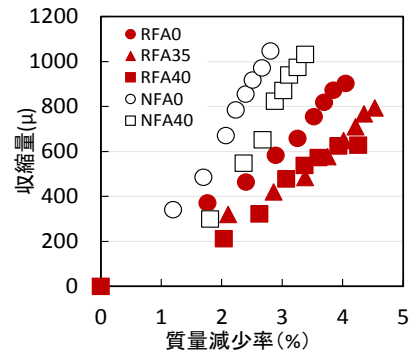


図-8 収縮量と減少率の関係
(シリーズ1)

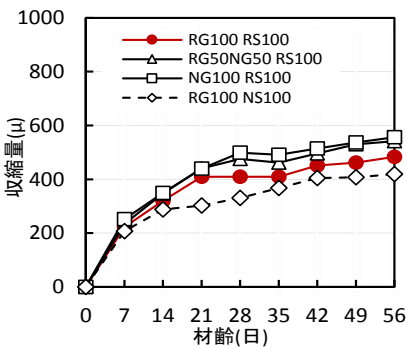


図-9 乾燥収縮量と材齢の関係
(シリーズ2)

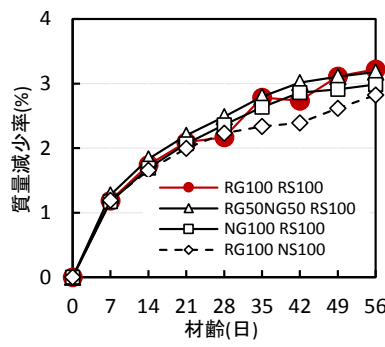


図-10 質量減少率と材齢の関係
(シリーズ2)

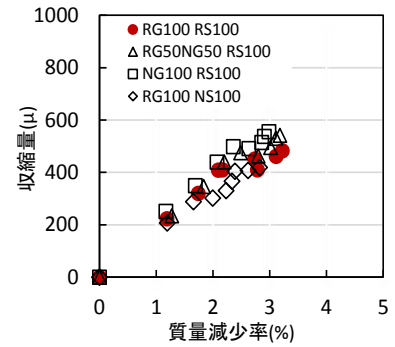


図-11 収縮量と減少率の関係
(シリーズ2)

使用した再生骨材の表面が粗大孔に支配されており、乾燥時は粗大孔から水分を蒸発するため、乾燥時の発生する毛細管張力が弱まり、体積減少が小さくなる¹⁴⁾。その結果、普通コンクリートより再生骨材コンクリートは収縮が小さく、質量減少率が大きかったと考えられる。

RFA0 と RFA40 を比較すると FA を混入することで収縮が小さくなった。一般にセメントペースト部分が増えると収縮が大きくなるとされているが、本研究では、FA を内割置換で行い、単位セメント量が小さいため、セメントによる自己収縮を低減したことや、再生骨材に付着している旧セメントペーストに含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と FA がポズラン反応を起こしたことによって、セメントペーストの内部が緻密化し、乾燥収縮の要因となる毛細管現象を引き起こす毛細管の数が低減したことや、乾燥収縮に影響を与える要因の一つとなる骨材の量が容積比で 1.81% 少ないため、収縮が小さくなったと考えられる。

一方、シリーズ2の RG100RS100、RG50NG50NS100、NG100RS100 の比較では、シリーズ1同様、再生粗骨材の置換率が増えるに従い、わずかであるが収縮は小さくなる傾向にあった。ただし、シリーズ1のように収縮量に大きな差がない要因としては、普通粗骨材を産地や岩種の異なる吸水率が小さな砕石を使用したため、シリーズ1の普通骨材を使用したコンクリートの収縮量自体が小さくなったためと考えられる。

しかし、配合名 RG100NS100 は他の配合に比べ収縮は

小さくなった。これは全量再生骨材を普通細骨材に置換すると収縮が小さくなったことを意味する。本研究で使用した再生細骨材は再生粗骨材に比べ、付着モルタルや汚泥などの微粒分が多く含まれ、吸水率が大きい。そのため、吸水率の大きな再生細骨材と吸水率の小さな砕砂の普通細骨材と置換したことにより、収縮率が小さくなったと推察される。

これにより、供試体から乾燥により蒸発する水分の絶対量が他の配合に比べ小さくなり、乾燥による収縮が小さかったと考えられる。質量減少率を他の配合と比較して RG100NS100 が小さくなった点からも水分の蒸発が少なかったと裏づけられる。

3.3 液体窒素を用いた簡易凍結融解試験(急速法)

シリーズ1、2の材齢28日の凍結融解試験の結果を図-12 および図-13 に、材齢91日の凍結融解試験を図-14 に示した。2.4.3 で前述したとおり、繰返し回数10回の時点で相対動弾性係数が60%以上であれば、十分なスケールリングに対する抵抗性があると評価できる。

シリーズ1では、相対動弾性係数60%以上を超えるものはFA無混和の普通コンクリートのNFA0のみであった。全量再生骨材コンクリートはFAの有無に関係なく、耐凍害性は全く確保できなかった。これは、既往の研究⁹⁾と同様な結果であり、ハイボリュームFAにしても耐凍害性は向上しなかった。

シリーズ2では、材齢28日、91日ともに、粗骨材を置

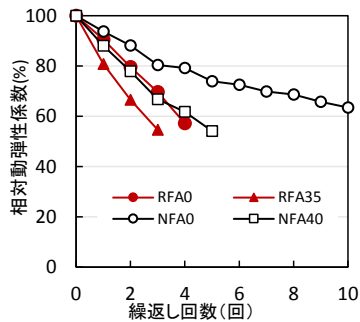


図-12 材齢 28 日における急速法による相対動弾性係数劣化曲線 (シリーズ 1)

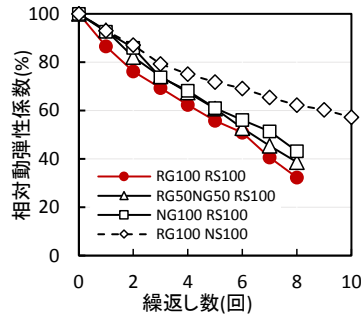


図-13 材齢 28 日における急速法による相対動弾性係数劣化曲線 (シリーズ 2)

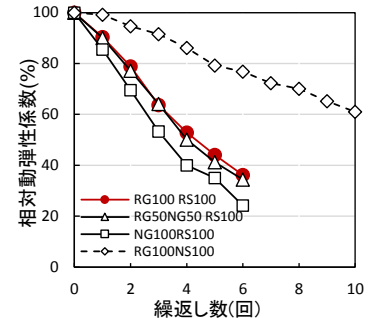


図-14 材齢 91 日における急速法による相対動弾性係数劣化曲線 (シリーズ 2)

換した 3 つの配合を比較すると、RG100RS100 は 4 サイクル、RG50NG50RS100、NGRS100 は 5 サイクルで動弾性係数 60% を下回った。これに対して、細骨材を普通骨材に置換した RG100NS100 は、材齢 28 日では 9 サイクルまで維持し、材齢 91 日では 60% 以上となり、図-12 に示すシリーズ 1 の NFA0 とほぼ同程度の相対動弾性係数劣化曲線になった。これは、FA を多量に混入し、再生粗骨材を使用したコンクリートでも水結合材比や空気量の条件を考慮すると凍結融解抵抗性を確保できる可能性がある。

4. まとめ

本研究では再生骨材と FA の用途の拡大、使用量増加を目指し、FA を多量置換した低度処理再生骨材コンクリートの硬化性状の検討を行った。

- (1) 強度特性に関して、FA を多量に混入することにより、再生骨材コンクリートと普通コンクリートの強度の差は FA が無混和の場合に比べて小さく出来ることが明らかになった。
- (2) 廃品コンクリートポールを低度処理した骨材では、吸水率の大きい普通骨材コンクリートより、乾収縮を抑制できるがあることが分かった。
- (3) これまで凍結融解抵抗性に関して問題があった低度処理再生骨材コンクリートに対して、水結合材比や空気量の条件を考慮し、良質な普通細骨材と併用することで再生粗骨材 100% 使用しても、凍結融解抵抗性の向上が認められた。

参考文献

- 1) 石炭エネルギーセンター：石炭発生量データ(平成 7 年度～24 年度)<http://www.jcoal.or.jp/coaldb/tech/coalash/>
- 2) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針、コンクリートライブラリー94, 1999.4
- 3) 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.223-360, 2007

- 4) 橋本親典, 青井洋視, 渡辺健, 石丸啓輔：(論文)FA の早期強度発現に影響を及ぼす再生骨材に関する実験的検討, 第 40 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.15-20, 2013.11
- 5) 井上裕貴ほか：低温炉乾燥による急速乾燥収縮試験法と長さ変化試験法(JIS A1129)の比較, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, Vol.16, pp.269-270, 2010
- 6) 井上祐貴, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 No.33, pp.473-478, 2011
- 7) 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報告集, Vol.28, No.1, pp.887-892, 2006
- 8) 弓場上有沙, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔：再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A 法)と液体窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.941-946, 2011
- 9) 鶴田浩章, 松下博通, 陶佳宏, 近田孝夫：品質の異なる再生骨材を使用したコンクリートの強度性状, コンクリート工学年次論文集, vol24, No.1, 2002
- 10) 青井洋視, 橋本親典, 渡辺健, 山口輝幸：再生骨材 L 級コンクリートの簡易長さ変化量特性と急速凍結融解特性に影響を及ぼすフライアッシュの効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, pp.1229-1230, 2011.9.
- 11) 後藤正幸, 藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化, 土木学会論文報告集, vol.247, pp.97-1088, 1976