

論文 回転式遠心破塊装置により製造した再生骨材, 微粉を混和したコンクリートの品質

桜井 邦昭^{*1}・近松 竜一^{*2}・入矢 桂史郎^{*3}

要旨: 回転式遠心破塊装置により製造した JIS A 5021 の規定を満足する再生骨材 H, および再生骨材の製造過程で発生する再生微粉を混入したコンクリートの諸性質について実験的に検討した。その結果, 再生細骨材 H を用いたコンクリートの品質は従来のコンクリート用骨材を用いた場合と概ね同等であること, 再生骨材に加え再生微粉を混和材料として多量に混入したコンクリートは, 収縮ひずみがやや増加する傾向にあるものの, 圧縮強度の増加や中性化深さの低減が図れること, 適切な空気量の確保により耐凍害性が満足できること, などが明らかとなった。

キーワード: 再生骨材, 再生微粉, 回転式遠心破塊装置, リサイクル, 混和材料

1. はじめに

コンクリート構造物の老朽化に伴う解体・更新需要の増加により, コンクリート塊の発生量は平成 12 年度の 3~4 千万トン/年から, 平成 22 年度には 15 千万トン/年にまで急増すると予測されている¹⁾。現在, コンクリート塊はその大半が路盤の埋戻材として有効活用されているが, 今後の発生量の増加分を補うには新たな活用先の確保が必要である。その方策として, 再生骨材コンクリートの普及に向けた規準類の整備が進められ, 既に再生骨材の品質に応じて, JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」, JIS A 5022「再生骨材コンクリート M」および JIS A 5023「再生骨材コンクリート L」が制定されている。このうち, 再生骨材 H は密度や吸水率といった物理的性質が従来のコンクリート用骨材と同等であり, 耐久性などを要求される構造体コンクリートに適用可能である。

再生骨材の製造方法は, 既に種々の方式が考案されており, 良質な再生骨材を製造することが可能であるが, 設備・運用コストが高いなどの課題も残されている。また, 良質な再生骨材を製造するには骨材表面に付着したセメントペースト分を除去する必要があるが, 多量の微粉末(以下, 再生微粉と呼称)が副産される。この再生微粉の有効活用方法の確立が, 再生骨材コンクリートの実用化において重要な課題となっている²⁾。

そこで, 本研究では, 再生骨材製造装置に濁水処理設備が不要で設備・運用コストを低減できる回転式遠心破塊装置を採用し, 本装置で製造した再生骨材の品質ならびに再生骨材コンクリートの諸性質について検討した。更に, 再生微粉の有効活用先確保の観点から, 再生骨材に加え再生微粉をコンクリート用混和材として多量に混入したコンクリートの品質についても検討した。

2. 再生骨材製造システムの概要と再生骨材の品質

2.1 再生骨材製造システムの概要

本研究で用いた再生骨材製造システムの概要を図-1 に示す。このシステムは, 大別するとコンクリート塊を粉砕し再生骨材を取り出す「回転式遠心破塊装置」と製造した再生骨材を分級する「エアスクリーン」から構成されている³⁾。回転式遠心破塊装置は, 回転による遠心力が作用する装置内でコンクリート塊同士を衝突させ, 骨材の周囲に付着したセメントペーストを除去するメカニズムであり, 骨材の角張りを減らし丸みのある形状に加工して取り出すことができる。また, エアスクリーンは, プロアを用いて高压空気を吹き付けることで, 骨材粒子の表面に付着した微粒分を強制的に分離させるとともに, 所定の粒径毎に骨材を分級することができる。先述のように, 本システムは製造工程において水処理を実施しない乾式タイプであり, 廃水処理のためのプラント設備が不要で設備や運用のコストを大幅に低減できる利点を有している。

2.2 再生骨材の発生割合と品質

再生骨材製造システムによりコンクリート塊から再生骨材を取り出す際の各材料の発生割合を図-2 に示す。なお, 本研究では原コンクリート塊に材齢 1 年程度で圧縮強度 40N/mm²のコンクリートを使用した。破砕処理前のコンクリート塊は, 粗骨材約 40%強, 細骨材約 35%, セメント水和物が約 25%の割合であるのに対し, 処理後は粗骨材 5%, 細骨材 40%, 微粉 55%と全般的に粒径が小さくなっており, 半分以上は再生微粉である。製造過程において骨材の一部が破砕されているためと考えられる。破砕処理の工程や稼動条件を調整することで, 再生骨材の歩留まりを高めることは可能と考えられるが,

*1 株式会社大林組 東京本社技術本部技術研究所 土木材料研究室 材料施工グループ 主任 工修 (正会員)

*2 株式会社大林組 東京本社技術本部技術研究所 土木材料研究室 材料施工グループ長 工博 (正会員)

*3 株式会社大林組 東京本社技術本部技術研究所 土木材料研究室 室長 工博 (正会員)

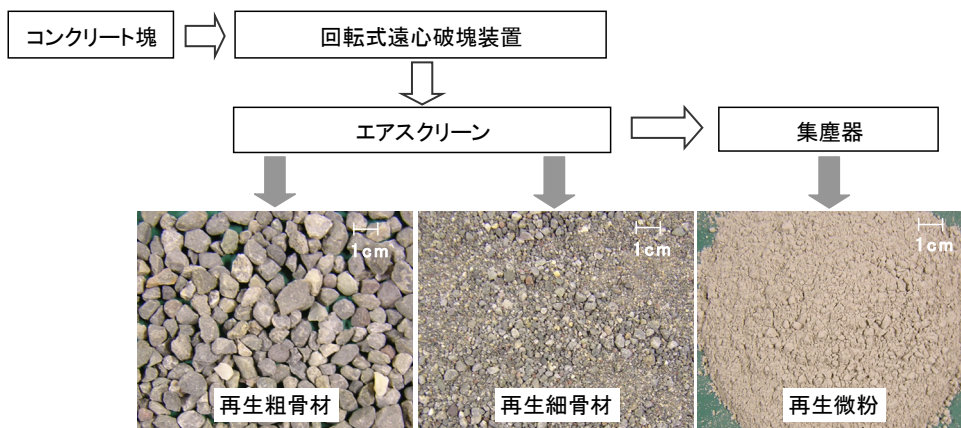
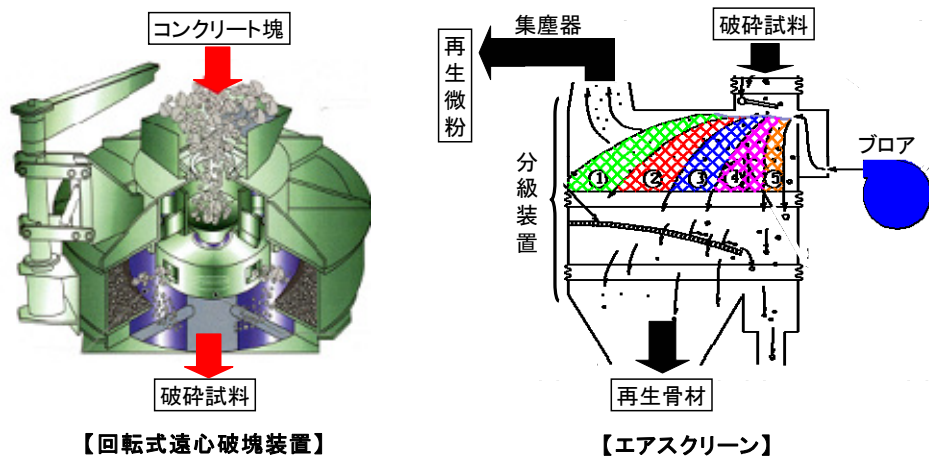


図-1 再生骨材製造システムの概要と再生骨材および再生微粉の外観

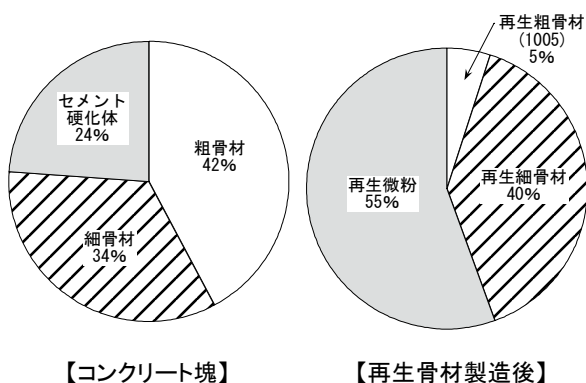


図-2 再生骨材および再生微粉の発生割合

コンクリート塊の約 1/4 はもともとセメント硬化体であり、再生微粉の有効活用先の確保が重要な課題である。

製造した再生骨材および再生微粉、ならびに比較用として実験で使用した天然骨材の物理的性質を表-1 に示す。再生骨材は、JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」の規格である絶対乾密度 2.5g/cm³ 以上、吸水率 3.5%以下（細骨材）および 3.0%以下（粗骨材）を満足する品質が確保されている。再生微粉は、ブレン値 2700cm²/g でセメントに比べやや粗い粉末である。また、JIS A 6201 および JIS A 6206 による高炉スラグ微粉末やフライアッ

表-1 再生骨材および再生微粉と比較用骨材の物理的性質

種類	記号	物理的性質					
		表乾密度 (g/cm ³)	絶対乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 F.M.	実積率 (%)	微粒分量 (%)
細骨材	陸砂 S1	2.63	2.59	1.55	2.60	68.6	1.1
	砕砂 S2	2.65	2.61	1.39	2.72	63.1	4.3
再生細骨材	RS	2.61	2.55 >2.5* ¹	2.45 <3.5* ¹	2.68	67.4	1.3
粗骨材	砕石2015 G1	2.66	2.64	0.69	7.00	-	-
	砕石1510 G2	2.66	2.63	0.87	7.00	-	-
	砕石1005 G3	2.65	2.62	1.05	6.00	-	-
再生粗骨材 1005	RG	2.68	2.65 >2.5* ¹	1.25 <3.0* ¹	6.00	-	-
再生微粉	RP	密度2.37g/cm ³ 、含水率8.3%、ブレン値2700cm ² /g フロ-値比96%* ² 、活性度指数46%(材齢28日)* ³					

*1 JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」の規格

*2 JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」付属書1(規定)に準拠

*3 JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」付属書(規定)に準拠

シュなどの混和材の品質規格に準じて試験した場合のフロ-値比は 96%、材齢 28 日の活性度指数は 46%で、活性度が低い微粉末である。なお、文献⁴⁾の方法に準拠して再生微粉中のセメント分および骨材分の割合を測定したところ、両者が同量程度ずつ含有されていた。

表-2 実験の組合せおよびコンクリートの配合

実験 シリーズ	記号	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)															
						W	C	RP	細骨材			粗骨材				混和剤(C+RP×%)					
									S1	S2	RS	G1	G2	G3	RG	WR	HWR	SP	AE		
比較用	S1	12.0	4.5	55.0	47.0	165	300	0	855	-	-	195	488	292	-	0.25	-	-	0.002		
	S2				49.0	175	318		-	877	-	180	458	275	-	-	1.50	-	0.004		
1	RS50%				49.0	165	300	0	457	-	430	188	469	281	-	-	1.00	-	-	0.012	
	RS100%				49.0	175	318		-	-	864	180	458	275	-	0.25	-	-	-	0.052	
2	RP				42.6	165	300	200	680	-	-	185	463	278	-	-	-	-	-	0.70	0.022
	RP+RS				44.6				365	-	344	179	447	269	-	-	-	-	-	0.60	0.022
	RP+RS+RG	44.6	365	-	344				180	447	-	268	-	-	-	-	0.60	0.027			

3. 実験概要

実験の組合せおよび配合を表-2に示す。実験は大別して2つのシリーズで実施した。シリーズ1では、回転式遠心破塊装置により製造した再生細骨材を用いたコンクリートの諸性質について調べるため、再生細骨材を細骨材の50%および100%使用したケースについて試験した。シリーズ2は、再生微粉のコンクリート用混和材としての適用性について検討することを目的として、再生微粉を200kg/m³混入した場合、および再生骨材と再生微粉の両者を併用した場合について検討した。コンクリートの配合条件は、一般的な土木用コンクリート構造物への適用を想定して、水セメント比55%、目標スランプ12cm、目標空気量4.5%とした。

セメントは高炉セメントB種(密度3.04g/cm³、ブレン値3830cm²/g)を使用した。混和剤は、AE減水剤の標準型(WR)、高機能型(HWR)および高性能AE減水剤(SP)の減水率が異なる3種類を用い、空気量調整用としてAE剤を使用した。コンクリートの種類毎に所定のスランプ、空気量が確保されるようこれら減水剤の種類や添加量およびAE剤の添加量を調整した。

コンクリートの練混ぜは20±3℃の恒温室内で行った。練混ぜには二軸強制練りミキサ(公称容量60L)を使用し、1バッチの練混ぜ量は50Lとした。セメント、粉体および骨材を投入し空練りした後、予め混和剤を溶解させた練混ぜ水を投入し、AE減水剤を用いた場合は60秒間、高性能AE減水剤の場合は120秒間それぞれ練り混ぜた。コンクリートの試験項目および準拠規準を表-3に示す。なお、スプレッド試験は外力を作用させた場合のコンクリートの変形特性を検討するために実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 シリーズ1 回転式遠心破塊装置により製造した再生細骨材を用いたコンクリートの品質

(1) フレッシュコンクリートの性状

各種細骨材を用いた場合に所要のスランプを確保するための単位水量の相違を図-3に示す。再生細骨材を用いた場合の単位水量は、陸砂と砕砂を用いた場合の中

表-3 試験項目および準拠規準

試験項目	試験方法(準拠規準)
スランプ試験	JIS A 1101-2005
空気量試験	JIS A 1128-2005
スプレッド試験	DIN 1048
ブリーディング試験	JIS A 1123-2003
凝結試験	JIS A 1147-2001
圧縮強度	JIS A 1108-2006 試験材齢:7日, 28日, 91日
長さ変化試験	JIS A 1129-3 2001 7日間水中養生後, 測定開始
自己収縮試験	JCI-SQA4 高流動コンクリートの自己収縮試験方法
凍結融解試験	JIS A 1148-2001 A法:水中凍結融解試験 試験開始材齢:28日
中性化深さ	JIS A 1153-2006 CO ₂ 濃度5%, 中性化促進期間6ヶ月
塩分浸透試験	JSCE-G572:2003 塩分濃度10%, 浸漬期間6ヶ月
硬化コンクリートの空気量	画像解析装置により測定(面積比法)

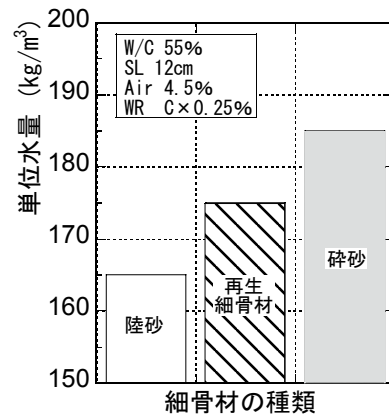


図-3 各種細骨材を用いたコンクリートの単位水量

間的な値となっている。砕砂を用いた場合と比べて単位水量を低減できるのは、回転式遠心破塊装置により角張りが少なく実積率の大きな骨材が製造されているためと考えられる。

陸砂および再生細骨材の顕微鏡観察結果を写真-1に、再生細骨材の粒径別ペースト付着率測定結果を表-4に示す。なお、ペースト付着率は、粒径別にふるい分けた再生骨材を塩酸に3日間浸漬させた際の、浸漬前後の質量変化率から求めた。写真-1から再生細骨材の粒径0.3mm以下の細粒分には白色のセメントペースト塊が認

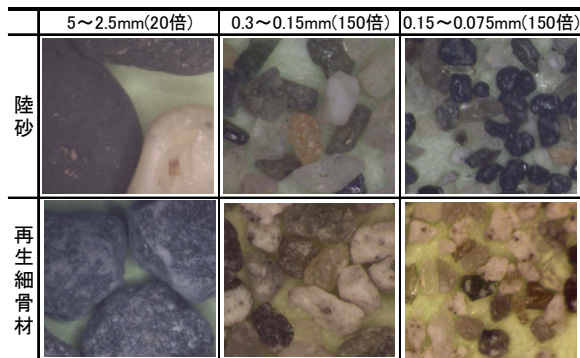


写真-1 再生細骨材の顕微鏡観察結果

表-4 再生細骨材の粒径別ペースト付着率

粒径 (mm)	5~2.5	2.5~1.2	1.2~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15	0.15~0.075
ペースト付着率 (%)	4.8	5.2	4.0	3.9	13.0	16.4

められる。また、表-4より、粒径0.3mmを境にそれ以下の粒径ではペースト付着率が急激に増加している。ペースト塊は骨材とは密度や吸水率および表面状態が異なると考えられ、再生細骨材の細粒分にペースト塊が含まれていることが陸砂に比べ水量が増加した一因と考えられる。本システムにより製造した再生細骨材の使用の際には、骨材群としての密度や吸水率だけでなく、細粒分中のペースト塊の混入にも留意する必要があることを示すものと考えられる。

再生細骨材コンクリートのスプレッド試験結果を図-4に示す。再生細骨材コンクリートのスプレッド値は陸砂および砕砂の場合の中間的な値となった。砕砂に比べスプレッド値が大きいのは角張りが少ない形状のためと考えられる。

ブリーディングおよび凝結試験結果を図-5および図-6に示す。再生細骨材を使用した場合、陸砂および砕砂を用いた場合に比べブリーディングは増大し、凝結はやや遅延する結果となった。ブリーディングの抑制には細粒分を増加させる必要があるが、本実験で用いた再生細骨材の細粒分にはペースト塊が多く含まれることから、再生細骨材の粒度分布を変更するのではなく、別途、細粒分の多い細骨材と混合使用することや適切な混和材料を補う、などの対策が必要と考えられる。

(2) 圧縮強度特性

圧縮強度および静弾性係数測定結果を図-7および図-8に示す。再生細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、各材齢において、陸砂を用いた場合に比べやや増加しており、砕砂を用いた場合と同程度である。再生細骨材の細粒分中のペースト分に未水和セメント分が含まれている可能性や、陸砂に比べると表面形状が粗であることなどが要因として考えられる。一方、弾性係数は骨材の種類による顕著な違いは認められない。

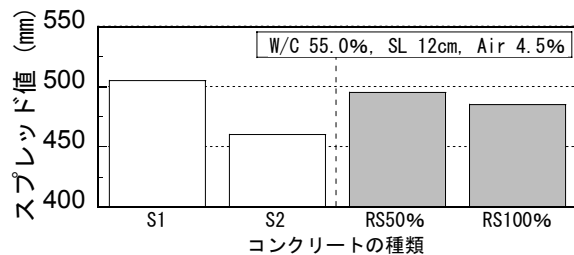


図-4 スプレッド試験結果 (シリーズ1)

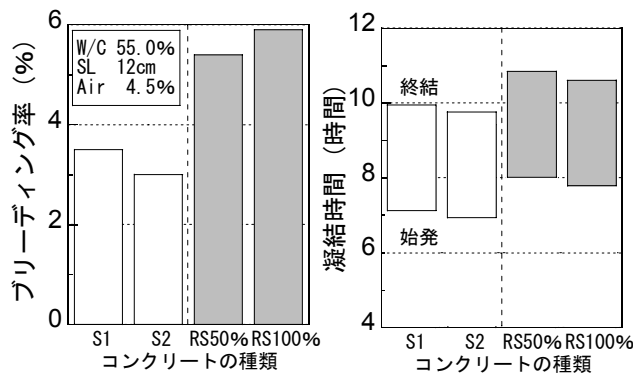


図-5 ブリーディング試験結果 (シリーズ1)

図-6 凝結試験結果 (シリーズ1)

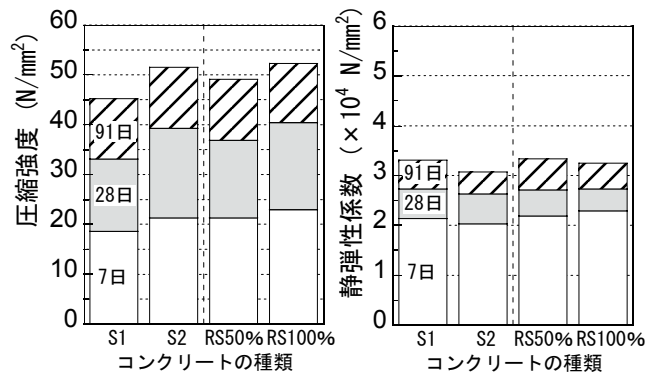


図-7 圧縮強度試験結果 (シリーズ1)

図-8 静弾性係数測定結果 (シリーズ1)

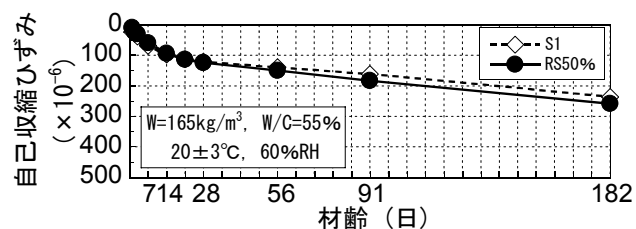


図-9 自己収縮ひずみ測定結果 (シリーズ1)

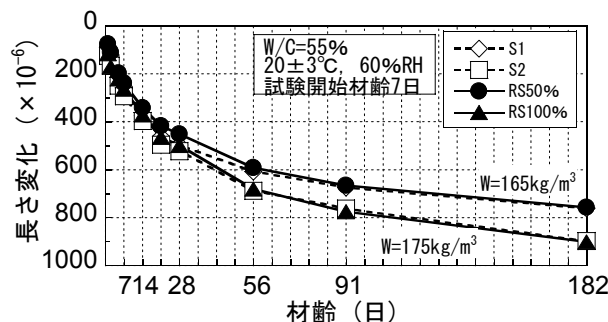


図-10 長さ変化試験結果 (シリーズ1)

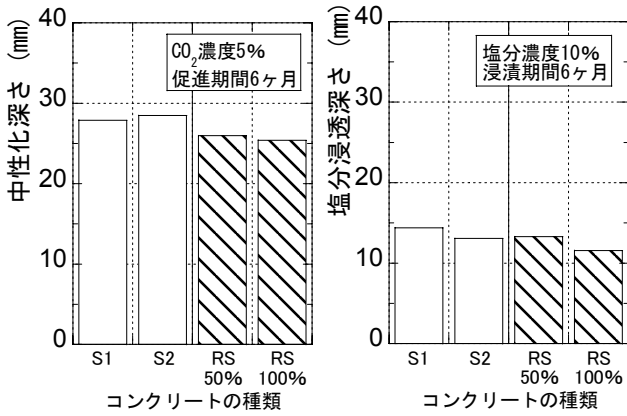


図-11 中性化深さ測定結果 図-12 塩分浸透深さ測定結果 (シリーズ 1)

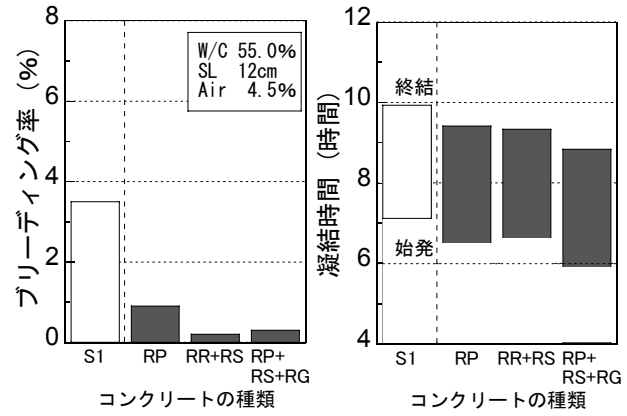


図-13 ブリーディング試験結果 (シリーズ 2) 図-14 凝結試験結果 (シリーズ 2)

(3) 収縮特性

長さ変化および自己収縮ひずみ測定結果を図-9 および図-10 に示す。再生細骨材を細骨材に 50%使用したコンクリートの長さ変化および自己収縮ひずみは、陸砂を用いた同一単位水量のコンクリートと同等である。また、再生細骨材を細骨材の全量に用いたコンクリートの長さ変化は、同一配合で砕砂を用いた場合と同等である。再生細骨材 H の使用が、コンクリートの収縮特性に悪影響を及ぼさないことを示すものと考えられる。

(4) 中性化および塩分浸透に対する抵抗性

中性化促進期間 6 ヶ月 (二酸化炭素濃度 5%) における中性化深さ、および塩分濃度 10%の塩水に 6 ヶ月間浸漬させた際の塩分浸透深さの測定結果を図-11 および図-12 に示す。再生細骨材を用いたコンクリートの中性化深さおよび塩分浸透深さは、陸砂および砕砂を用いた場合と同程度である。本実験で用いた再生細骨材が、従来の骨材と同じように耐久性を要求されるコンクリート構造物へ適用できることを示すものと考えられる。

4.2 シリーズ 2 再生微粉のコンクリート用混和材としての適用性に関する検討

(1) フレッシュコンクリートの性状

再生微粉を 200kg/m³ と多量に用いた場合、所要の流動性確保には高性能 AE 減水剤を使用する必要がある (表-2)。再生微粉の混入により水粉体比が小さくなるためと考えられる。再生微粉混入コンクリートのブリーディングおよび凝結時間測定結果を図-13 および図-14 に示す。再生微粉を混入するとブリーディングが著しく減少し、凝結は若干早まる傾向となった。粉体量の少ないコンクリートや、微粒分の不足した細骨材を用いる際のブリーディング対策として再生微粉を用いることも効果的と考えられる。

(2) 圧縮強度特性

圧縮強度および静弾性係数測定結果を図-15 および図-16 に示す。再生微粉を用いた場合、無混入コンクリ

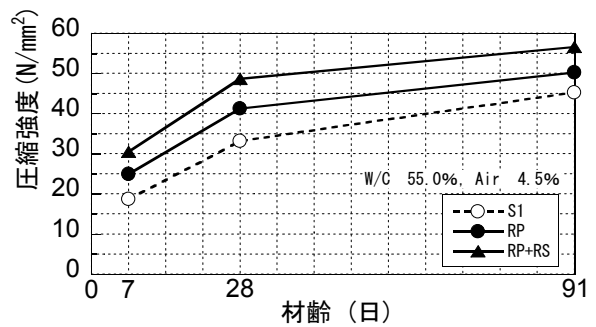


図-15 圧縮強度試験結果 (シリーズ 2)

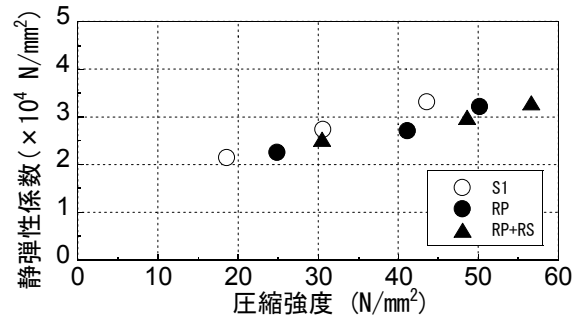


図-16 圧縮強度と静弾性係数の関係 (シリーズ 2)

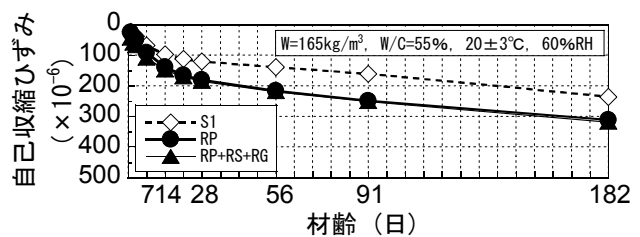


図-17 自己収縮ひずみ測定結果 (シリーズ 2)

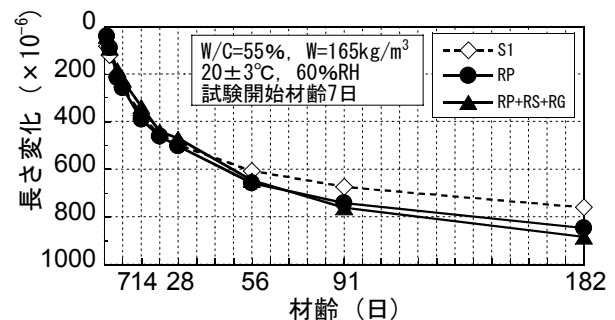


図-18 長さ変化試験結果 (シリーズ 2)

ートに比べ圧縮強度が増大している。再生微粉中に未水和セメント分が含まれている可能性や、微粉末混入によりセメントペーストマトリックスが緻密化したことなどが要因として考えられる。圧縮強度と静弾性係数の関係は、比較用コンクリートと同程度である。再生微粉を多量に混入するとコンクリート中の骨材量が減少するため、同一強度レベルにおける弾性係数が小さくなる可能性も考えられるが、本実験の範囲内では顕著な違いは認められない。

(3) 収縮特性

長さ変化および自己収縮ひずみ測定結果を図-17 および図-18 に示す。再生微粉を用いた場合には、長さ変化および自己収縮ひずみとも陸砂コンクリートに比べ100 μ 程度増大している。再生微粉中の未水和セメント分が水和反応している可能性や再生微粉の混入により粉体量が増大したことなどが要因と考えられる。再生微粉を用いる際は、同一の単位水量の場合にも収縮ひずみが増加することに配慮する必要がある。

(4) 凍結融解抵抗性

再生骨材および再生微粉を用いたコンクリートの凍結融解試験結果を図-19 に示す。再生微粉を200kg/m³と多量に混入した場合および再生細骨材と再生微粉の両者を混和した場合にも、耐凍害性が確保できる結果が得られている。適切な水セメント比および空気量を確保すれば、耐凍害性を要求されるコンクリートの混和材として再生微粉を適用できる可能性があることを示すものと考えられる。

(5) 中性化および塩分浸透に対する抵抗性

再生微粉を用いたコンクリートの中性化深さおよび塩分浸透深さの測定結果を図-20 および図-21 に示す。再生微粉を混入したコンクリートは、無混入の場合に比べ中性化深さが低減されている。再生微粉に含まれる未水和セメントの反応や微粉末混入による充填効果により、ペースト組織が緻密化されたためと推測される。また、再生微粉コンクリートの塩分浸透深さは無混入の場合と同等である。再生微粉を混入してもペースト組織の塩分浸透性が変化しないことを示すものと考えられる。

5. まとめ

回転式遠心破塊装置により製造した再生骨材および再生微粉を用いたコンクリートの諸性質について検討した。本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 回転式遠心破塊装置により JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」の規格を満足する再生骨材が製造できる。ただし、製造過程において原コンクリート塊の半分程度の再生微粉が副産される。
- (2) 再生細骨材 H を用いたコンクリートの圧縮強度特性、

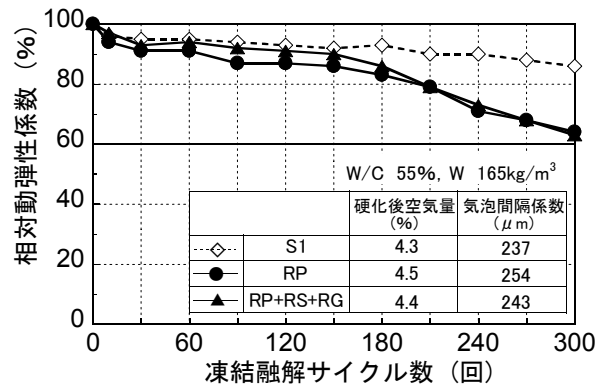


図-19 再生骨材および再生微粉を用いたコンクリートの凍結融解試験結果

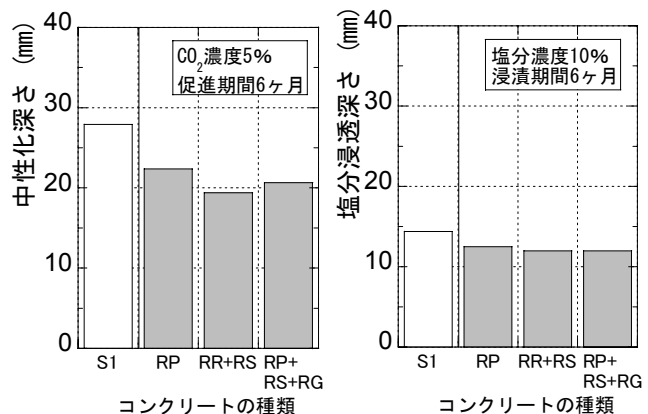


図-20 中性化深さ測定結果 (シリーズ2) 図-21 塩分浸透深さ測定結果 (シリーズ2)

収縮特性、中性化や塩分浸透に対する抵抗性は、従来のコンクリート用骨材を用いた場合の品質と同等である。ただし、ブリーディングが多くなる場合があることに配慮する必要がある。

- (3) 再生微粉を200kg/m³と多量に混入したコンクリートは、収縮ひずみが若干増大するものの、圧縮強度の増加や中性化に対する抵抗性を向上できる利点も有している。また、適切な水セメント比、空気量の確保により耐凍害性を満足できる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：再生骨材コンクリートの現状と将来展望, p.100, 2006.11
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート用再生骨材の普及促進に関するシンポジウム, pp.32-33, 2005.9
- 3) 賀谷隆人, 長原雄一, 橋本勝由：回転式遠心破塊装置による改良骨材の製造とコンクリートの性質, 骨材の品質と有効利用に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.19-28, 2005.12
- 4) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」, 1967.9