

再生骨材コンクリートの品質および再生微粉の有効活用に関する研究

桜井 邦 昭 近 松 竜 一
入 矢 桂 史 郎

Study on Properties of Recycled Aggregate Concrete and Application of Recycled Powder

Kuniaki Sakurai Ryuichi Chikamatsu
Keishiro Iriya

Abstract

This paper examines the properties of recycled coarse aggregate, recycled fine aggregate and recycled powder manufactured from crushed concrete. It is shown that the properties of concrete using recycled aggregate-class H were comparable to those of concrete using natural aggregate, and that recycled powder is suitable as an admixture for shotcrete and backfill grout.

概 要

コンクリート塊を粉砕して製造される再生粗骨材、再生細骨材および再生微粉の全量を再利用することを目的とし、再生骨材コンクリートの品質および再生微粉の活用方法について検討した。その結果、再生骨材Hを用いた再生骨材コンクリートは一般的な骨材を用いたコンクリートとほぼ同等の品質が確保されること、再生微粉はトンネル吹付けコンクリートのリバウンド低減対策や裏込注入材料として適用できる可能性が高いことが明らかになった。

1. はじめに

近年、既設建造物の解体や更新需要が増大しており、環境負荷低減の観点から建設廃棄物の再利用が必須の工事要件となっている。コンクリート塊の再利用に関しては、現状では路盤材として使用する場合が多いが、著者らは構造部材への適用を想定し、型枠中にコンクリート塊を詰め込みモルタルで間隙を充填して一体化させる“ガラバクトコンクリート工法”を開発してきた^{1), 2)}。

一方で、再生骨材コンクリートの普及に向け、各種規格類の整備が進められている。とりわけJIS規格としては、再生骨材の品質のランクに応じて、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。しかし、再生骨材コンクリートを実際に普及させるには再生骨材の製造に併せて多量に発生する微粉末(以下、再生微粉と呼称)の有効な活用方法を確立する必要がある³⁾。また、再生骨材コンクリートの事業化に対しては、製造と運搬コスト、需要と供給のバランスに配慮したビジネスモデルが求められている。

本論文では、まず、実験に用いた再生骨材の製造方法の概要を示し、製造された再生骨材と再生微粉の発生量ならびに品質について考察した。次に、これら再生骨材および再生微粉を用いたコンクリートの基礎的性質を検討した結果について考察した。更に、再生微粉のトンネルの一次吹付けコンクリートおよび裏込注入材への適用性を検討した結果についても考察を加えた。

2. 再生骨材の製造方法、発生割合および品質

2.1 再生骨材製造システムの概要

本研究において採用した再生骨材製造システムの概要をまとめてFig. 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⁴⁾。

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、ブローを用いて高圧空気を吹き付けるため、骨材粒子の表面に付着した微粉分を強制的に分離させ、所定の粒径毎に骨材を分級することができる。さらに、本システムは再生骨材の製造工程において水処理を実施しない乾式タイプであるため、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メリットもある。

2.2 再生骨材および再生微粉の発生割合

コンクリート塊の破砕前後における各材料の構成割合をFig. 2に示す。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%の割合であるが、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いる。製造過程において骨材の一部も破砕されていると考えられる。元の骨材に近い

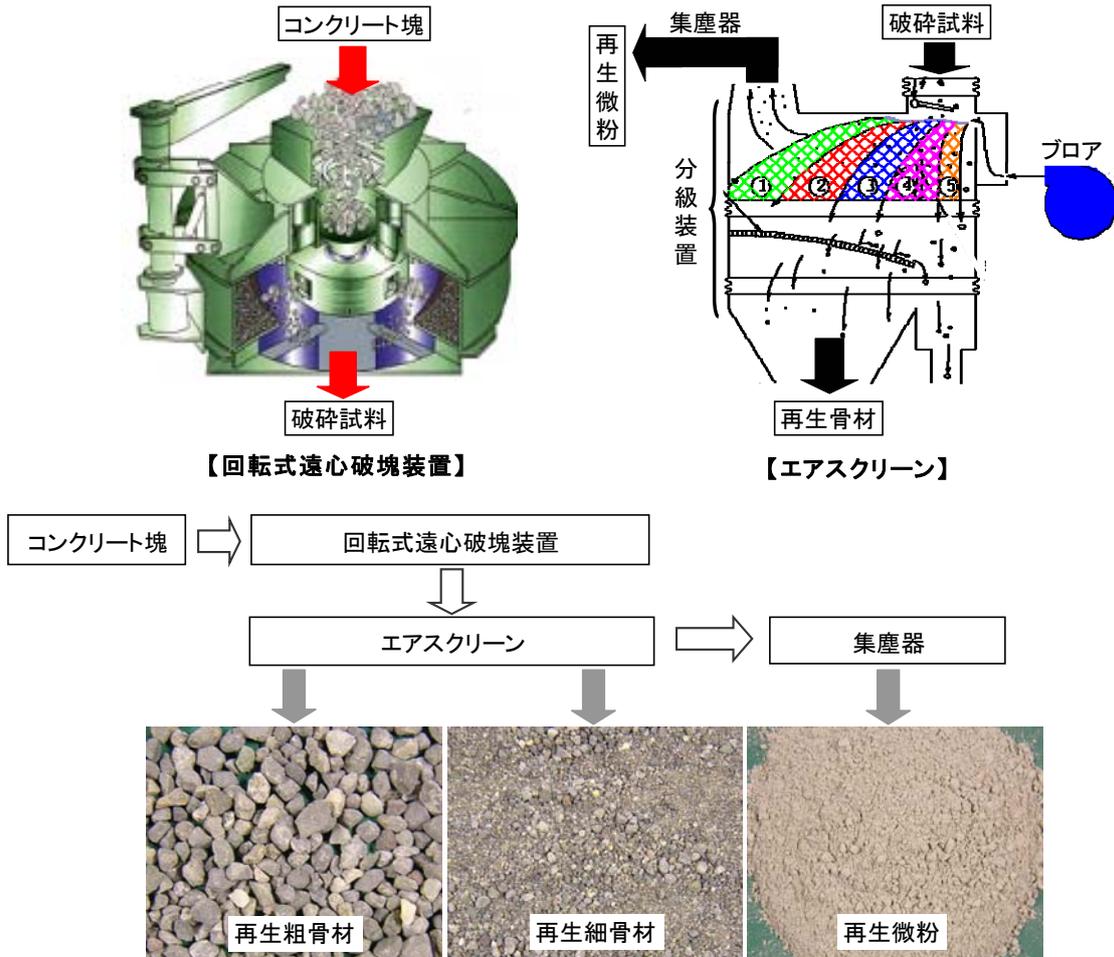


Fig. 1 乾式再生骨材製造システムの概要と再生骨材および再生微粉の外観
Production flow of Recycled aggregate by Dry Method

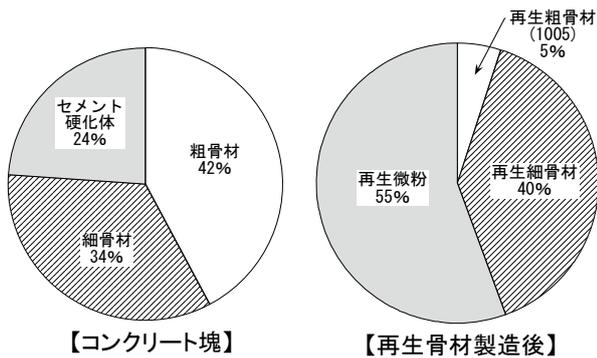


Fig. 2 再生骨材と再生骨材の発生割合
Production ratio of
Recycled aggregate and Recycled powder

品質の再生骨材を製造しようとするほど微粉量が増加する傾向がある。破碎処理の工程や稼働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であるが、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、再生微粉をいかに活用するかが重要な課題といえる。

Table 1 再生骨材および再生微粉と比較用骨材の物理的性質
Physical properties of
Recycled aggregate and Recycled powder

種類	記号	物理的性質				
		表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 F.M.	実積率 (%)
細骨材	陸砂 S1	2.63	2.59	1.55	2.60	68.6
	砕砂 S2	2.65	2.61	1.39	2.72	63.1
再生細骨材	RS	2.61	2.55 >2.5* ¹	2.45 <3.5* ¹	2.68	67.4
粗骨材	碎石2015 G1	2.66	2.64	0.69	7.00	-
	碎石1510 G2	2.66	2.63	0.87	7.00	-
	碎石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%, プレーン値2700cm ² /g フロー値比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

Table 2 コンクリートの配合
Mix proportion of Concrete with Recycled aggregate and powder

No.	コンクリート種類	記号	スランブ (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	
1	比較用 コンクリート	S1	12.0	4.5	55.0	47.0	165	300	0	855	-	-	195	488	292	-	0.25	-	-	0.0015	
2		S2				49.0	175	318	0	-	877	-	180	458	275	-	-	1.50	-	-	0.0040
3	再生骨材 コンクリート	RS50%				49.0	165	300	0	457	-	430	188	469	281	-	-	1.00	-	-	0.0120
4		RS100%				49.0	175	318	0	-	-	864	180	458	275	-	0.25	-	-	-	0.0520
5		RP				42.6	165	300	200	680	-	-	185	463	278	-	-	-	-	0.70	0.0220
6		RP+RS50%				44.6	165	300	200	365	-	344	179	447	269	-	-	-	0.60	0.0220	
7		RP+RS50%+RG100%				44.6	165	300	200	365	-	344	180	447	-	268	-	-	0.60	0.0270	

2.3 再生骨材および再生微粉の品質

乾式システムにより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Table 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でセメントより比表面積が若干小さい。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ー値比は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。

3. 再生骨材コンクリートの品質検証実験

3.1 実験概要

再生骨材コンクリートの組合せおよび配合をTable 2に示す。再生骨材および再生微粉をできるだけ多量に使用するために，細骨材として再生細骨材を50%または100%使用した場合，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の合計7ケースについて検討した。また，配合条件については一般的な土木用コンクリート構造物への適用を対象とし，水セメント比55%，目標スランブ12cm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ブ，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。

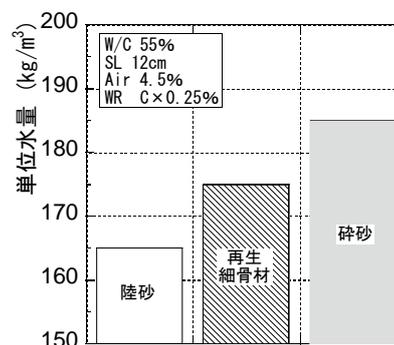


Fig. 4 各種細骨材を用いたコンクリートの単位水量
Unit water content of Concrete using various fine aggregate

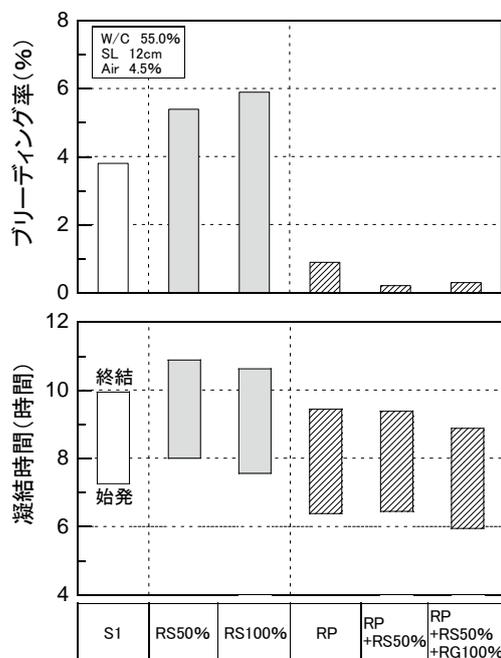


Fig. 5 ブリーディングおよび凝結試験結果
Bleeding ratio and setting time of Concrete with Recycled aggregate and powder

コンクリートの試験は、スランプ、空気量、ブリーディング、凝結時間、圧縮強度、静弾性係数、長さ変化率、自己収縮および凍結融解抵抗性の各種試験を実施した。これらの試験はそれぞれJIS規格に従い、自己収縮試験については文献⁹⁾に準拠して実施した。

3.2 実験結果および考察

3.2.1 コンシステンシー 各種細骨材を用いた場合に所定のスランプを確保するための単位水量をFig. 4に示す。再生細骨材を用いた場合の単位水量は、陸砂と砕砂それぞれを単独で使用した場合の中間的な値となっている。また、高機能型のAE減水剤に変更することで陸砂を単独で使用した場合と同等の単位水量にまで減水することが十分可能である。

再生細骨材は、砕砂より実積率が大きく、角張りが少ない傾向にあり、単位水量を低減するうえで望ましい。しかし、顕微鏡により骨材粒子を観察したところ、0.3mm以下の細かい粒子の中にはペースト塊が認められた。このペースト塊が水を拘束または吸着するため、陸砂と比べ水量が増加したものと考えられる。再生細骨材の使用にあたっては、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といえる。

一方、table 2に示すように、再生微粉を混入した場合、施工性の確保には高性能AE減水剤を使用する必要がある。粉体量が増加し、水粉体比が小さくなるためと考えられる。

3.2.2 ブリーディングおよび凝結時間 ブリーディングおよび凝結試験結果をFig. 5に示す。再生細骨材を使用した場合、陸砂よりブリーディングは増大し、凝結は遅延する結果となった。一方、再生微粉を混入した場合はブリーディングが著しく減少し、凝結は早まる傾向となった。粉体量の少ない貧配合な軟練りコンクリート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。

3.2.3 圧縮強度 圧縮強度試験結果をFig. 6およびFig. 7に示す。再生骨材や再生微粉を用いることにより、比較用コンクリートに比べて圧縮強度が増加する結果が得られた。再生微粉に含まれるセメントの未水と分の反応や微粉末の混入による充填効果などが要因として考えられる。なお、圧縮強度と静弾性係数の関係は、再生骨材、再生微粉の使用の有無による顕著な違いは認められない。

3.2.4 収縮特性 自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの試験結果をFig. 8に示す。再生細骨材を使用したコンクリートの自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみは比較用コンクリートと同等である。一方、再生微粉を混入した場合は自己収縮ひずみが100 μ 程度増加する結果となっている。また、乾燥収縮ひずみの増加量も同様に約100 μ である。再生微粉中の未水とセメントが反応していることを示唆するものと考えられる。

再生微粉を混和材料として用いる場合には、単位水量を一定としても収縮ひずみが増加することに配慮する必要がある。

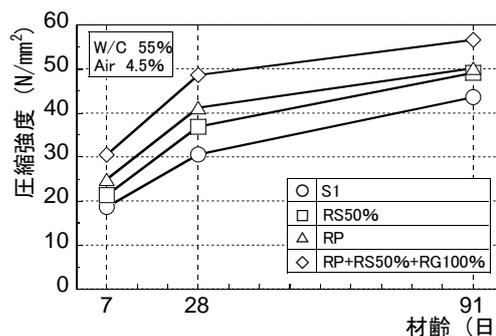


Fig. 6 圧縮強度試験結果

Compressive strength of Recycled Concrete

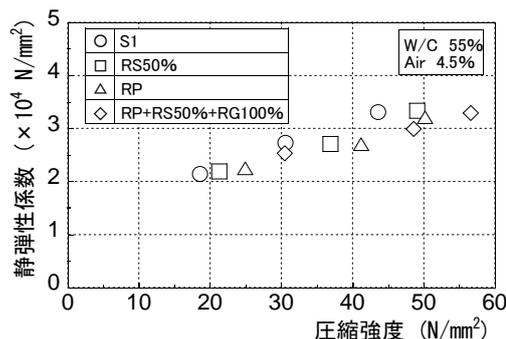


Fig. 7 圧縮強度と静弾性係数の関係

Relationship between Compressive strength and Modulus of elasticity

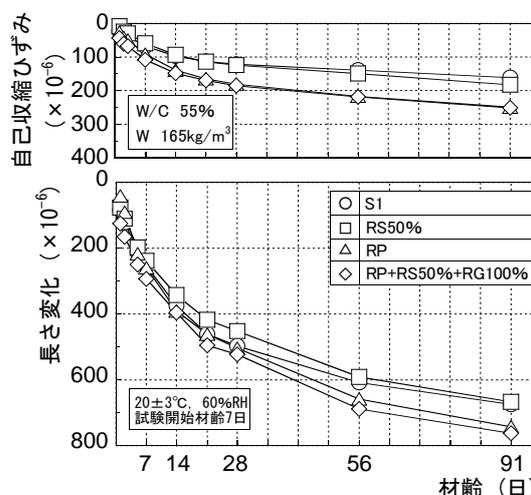


Fig. 8 自己収縮および乾燥収縮ひずみ測定結果

Autogenous shrinkage and dry shrinkage

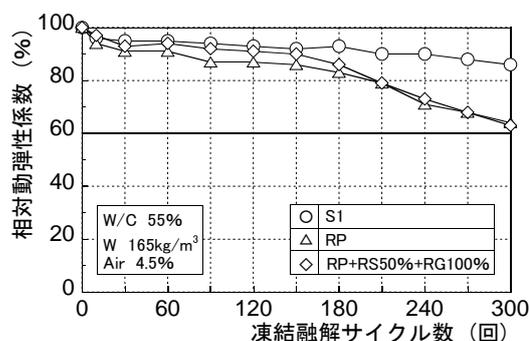


Fig. 9 凍結融解試験結果

Freezing-Thawing resistance of Recycled Concrete

3.2.4 凍結融解抵抗性 凍結融解試験結果をFig. 9に示す。再生骨材および再生微粉を用いた場合においても、水セメント比を小さくし、空気量を適正に確保することにより、十分な耐凍害性が得られることが確認された。

4. 再生微粉の有効活用に関する検討

前節では、一般的なコンクリートへの再生微粉の適用について検討した。本節では再生微粉をより有効に活用することを意図し、吹付けコンクリートや裏込注入材などの特殊用途への適用性を検討した。

4.1 吹付けコンクリートへの適用

吹付けコンクリートは、圧縮空気を用いて地山にコンクリートを吹き付けるため、リバウンドが多く発生する。リバウンドを低減するにはコンクリートの粘性を増加させ、材料分離抵抗性を高めるのが効果的であり、細骨材の一部に石灰石微粉末やフライアッシュを混入し、リバウンドを低減する事例も報告されている^{6), 7)}。そこで、再生微粉を細骨材の一部に適用した場合のリバウンド低減効果について検討した。

配合をTable 3に示す。いずれの配合についてもスランプは12cmとし、単位セメント量および粗骨材量を一定とした。再生微粉の混入量は、50および100kg/m³の2水準とし、比較のために石灰石微粉末LS（密度2.71g/cm³、比表面積5050cm²/g）、フライアッシュFA（密度2.20g/cm³、比表面積4040cm²/g、Ⅱ種相当）を用いた場合も検討した。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材はTable 1に示す細骨材S1および粗骨材G3を使用した。

リバウンド（材料分離抵抗性）の評価は、テーパ型容器（投入側φ150mm、排出側φ100mm、高さ300mm）にコンクリート試料を詰め、高さ1mから円錐状障害物に落下させ、フロー値40cm以上の試料の割合を測定し評価した（Fig. 10参照）。

試験状況の一例をPhoto 1に、試験結果をFig. 11に示す。再生微粉を混入した場合には、落下フロー40cm以上の試料の割合が減少しており、その低減割合は石灰石微粉末やフライアッシュを等量混入した場合と同程度である。

以上の結果は、再生微粉が吹付けコンクリートのリバウンド低減策として十分に活用できることを示すものと考えられる。

4.2 裏込注入材への適用

トンネル覆工などの背面空洞への裏込注入材として、特殊増粘材スラリーとモルタルを3:1の割合で混合した注入材が開発されている⁸⁾。裏込注入材には、空洞充填のための高い可塑性と圧縮強度（一般に材齢28日で1N/mm²以上）が要求される。本実験では、裏込注入材のうちモルタルの混和材として再生微粉を用いた注入材のモルタルフロー試験および圧縮強度試験を行い、再生微粉の適用性について検討した。

Table 3 コンクリートの配合 (吹付けコンクリート実験)
Mix proportion of Shotcrete

No.	混和材混入量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	C	RP	LS	FA	S1	G3	
1	比較用		55.6	62.0	200			0	0	0	1086	
2	50	12	55.6	60.8	200			50	0	0	1031	671
3			55.6	60.9	200			0	50	0	1038	
4			55.6	60.7	200	360		0	0	50	1026	
5			57.2	59.0	206			100	0	0	959	
6	100		55.6	59.4	200			0	100	0	975	
7			54.7	59.4	197			0	0	100	974	

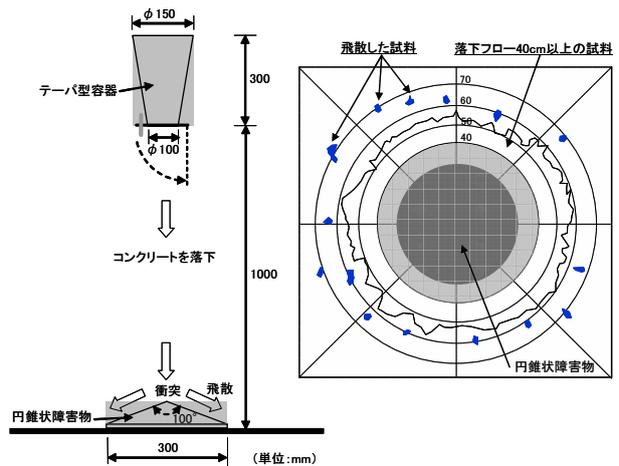


Fig. 10 分離抵抗性試験の概要

Outline of segregation resistance test for Shotcrete



比較用コンクリート 再生微粉100kg/m³混入コンクリート

Photo 1 分離抵抗性試験状況

Situation of segregation resistance test

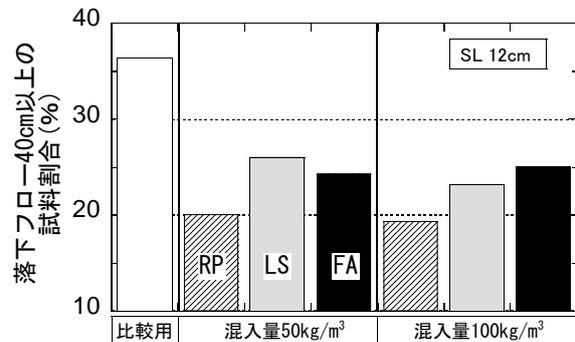


Fig. 11 分離抵抗性試験結果

Results of segregation resistance test

裏込注入材の配合をTable 4に示す。セメントは高炉セメントB種を使用した。再生微粉の混入方法は、セメント置換と細骨材置換の2種類とした。置換率は、セメント置換の場合は質量比で30および50%、細骨材置換の場合は50および100%とした。

実験結果をFig. 12に示す。再生微粉をセメント置換、細骨材置換した場合ともに振動を与えない場合（0打フロー）の変形性は低下している。特に細骨材置換した場合に顕著である。再生微粉は細骨材に比べて粒子の径が小さく、水を拘束しやすいと考えられる。一方、振動を与えた後の流動性（15打フロー）は比較用注入材とほぼ同程度である。したがって、再生微粉の混入が裏込注入材の可塑性に及ぼす影響は小さいと考えられる。再生微粉をセメント置換した場合には圧縮強度は低下するが、置換率が30%の場合は目標強度を確保している。一方、細骨材に置換した場合は、再生微粉の混入に伴って増加する結果が得られている。再生微粉中の未水和セメントの反応や微粉末の充填効果などの影響によるものと考えられる。

以上の結果を踏まえると、再生微粉は裏込注入材の混和材として、セメント置換の場合は約80kg/m³、細骨材置換では250kg/m³程度まで適用できる可能性がある。

5. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- 1) 乾式の再生骨材製造システムによれば、再生骨材Hの規格を満足する良質の再生骨材を経済的に製造することが可能である。
- 2) 再生骨材Hを用いた再生骨材コンクリートは一般的な骨材を用いたコンクリートとほぼ同等の品質を確保できる。
- 3) 再生微粉を多量に混入した場合、圧縮強度が増加するとともに、収縮ひずみも増加する傾向にある。
- 4) 再生骨材および再生微粉を用いた場合でも、適切な水セメント比および空気量を確保することにより、十分な耐凍害性が得られる。
- 5) 再生微粉はトンネル吹付けのリバウンド低減対策や裏込注入材料としても有効に活用することができ、大量に適用できる可能性が高い。

参考文献

- 1) 近松竜一他：ガラパクトコンクリート工法の開発，大林組技術研究所報，No. 68，2004
- 2) 川西貴士他：ガラパクトコンクリート工法の開発（その2），大林組技術研究所報，No. 69，2005
- 3) コンクリート再生材高度利用研究会：コンクリートリサイクルシステムの普及に向けた提言，pp. 203-204，2005. 9
- 4) 賀谷隆人他：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，pp. 19-28，2005. 12

Table 4 裏込注入材の配合
Mix proportion of Backfill grout

No.	再生微粉の置換方法	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						
			特殊増粘材スラリー		1:1モルタル				
			W	B	W	C	RP	S	
1	比較用					260	0	250	
2	セメントに内割り置換	30%	295	675	125	92	182	78	250
3	50%	130					130		
4	細骨材に内割り置換	50%					260	125	125
5	100%	250						0	

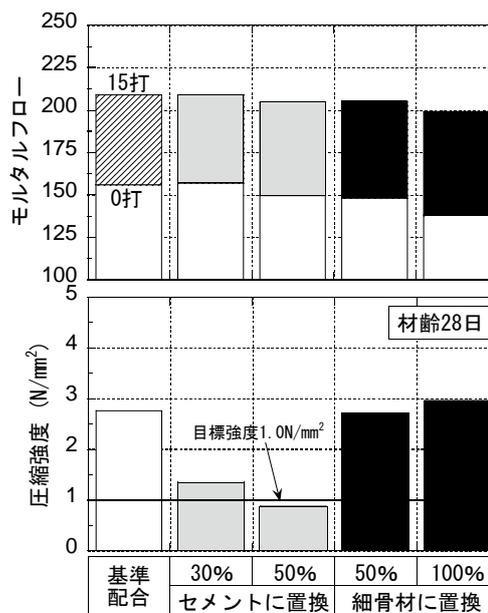


Fig. 12 再生微粉を混入した裏込注入材の試験結果
Mortar flow and compressive strength of Backfill grout



Photo 2 再生微粉を混入した裏込注入材の可塑性
Plasticity of Backfill grout with Recycled powder

- 5) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書，pp. 209-210，1994. 6
- 6) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)，pp. 1-2，1997. 5
- 7) 油野邦弘他：分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの品質改善に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 1，pp. 177-182，2002. 6
- 8) 青木茂他：無機系材料を用いた1液性可塑性のトンネル裏込め注入工法の開発，土木学会第57回年次学術講演会概要集，VI-201，pp. 401-402，2002. 9