

論文 低環境負荷再生骨材コンクリートの強度・弾性係数に及ぼす再生細骨材の改質と微粉の影響

六名 良輔^{*1}・堺 孝司^{*2}・北垣 亮馬^{*3}・名取 正夫^{*4}

要旨: 乾式堅型ロッドすりもみ装置を用いて低環境負荷で再生骨材を製造し、得られた再生粗骨材、再生細骨材、再生微粉を利用して再生骨材コンクリートを製造した。再生細骨材は炭酸化のみによる改質を行い、再生細骨材の改質の有無、再生微粉の混入がコンクリートの強度等に及ぼす影響について検討を行った。その結果、再生粗骨材のみを用いた場合は、普通粗骨材を用いた場合と同等の強度を示した。また、再生細骨材を改質すると、改質しない場合と比べて強度は大きくなり、普通骨材のそれより大きい値を示した。さらに、再生微粉を混入することで強度は大きくなった。弾性係数は再生骨材を用いることで小さくなった。

キーワード: 再生骨材、再生骨材コンクリート、骨材改質、圧縮強度、弾性係数、低環境負荷、微粉

1. はじめに

現在、日本における廃コンクリート塊の排出量は年間3000万t以上で推移しており、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の解体により、その量は今後20年間にわたり増加する見通しである¹⁾。廃コンクリート塊は現在、そのほとんどが道路の路盤材として利用されている。しかし近年、道路建設の縮小により路盤材の需要減少傾向が見られ、今後もその傾向は続くと思われる。このことは、廃コンクリートをコンクリート用材料として再利用することが求められることを意味する。また、2011年3月の東日本大震災により、膨大ながれきの処理が急務となっている。とりわけコンクリート塊の再利用が求められている。

一方、わが国は、地球温暖化対策に関する中長期目標として2050年までに1990年比で自らの排出量を80%削減することを掲げている²⁾。日本全体のCO₂排出量の約10%が建設分野から発生している³⁾ことから、建設分野においてもCO₂排出量の削減に貢献しなければならない。建設分野における主要材料であるコンクリートはそのセメント使用により多くのCO₂を排出するため、様々な削減に向けた検討が行われている。一方、廃コンクリート利用においても、低環境負荷で処理し、コンクリート構造物の建設材料として再利用していくことが強く望まれている。

これまで、再生コンクリートは普通コンクリートに比べて強度が小さくなることや乾燥収縮が大きくなる⁴⁾といった問題点が報告がされている。これらの技術的課題を解決するために、これまでのコンクリート用再生骨材に関する研究は再生粗骨材の高品質化に主眼が置かれ、

それ故に環境負荷大きくなるものであった。また、再生細骨材や製造時に発生する再生微粉の利用についてはほとんど検討されていない。

著者ら⁴⁾は、低環境負荷で再生骨材を製造することができる、乾式堅型ロッドすりもみ装置（以下、すりもみ装置）を使用して再生骨材を製造し、これによって得られる再生粗骨材、再生細骨材、再生微粉を全量コンクリート用材料としてリサイクルする検討を行ってきた。これまでは、物理的処理と化学的処理を組み合わせることで再生骨材を改質し、それらを用いたコンクリートの特性について検討を行ってきた。しかし、物理的処理を行うことにより、再生微粉の発生量が増加することが問題点であった。また、改質によるコンクリート性能への影響についての評価は行われていなかった。

そこで本研究では、著者らで使用してきたすりもみ装置を使用して低環境負荷で再生骨材を製造し、再生細骨材、再生粗骨材、再生微粉を利用して再生骨材コンクリートを製造した。再生細骨材は炭酸化のみによる改質を行い、再生細骨材の改質の有無、再生微粉の混入がコンクリートの強度・弾性係数に及ぼす影響について検討を行った。

2. 再生骨材の製造

2.1 原コンクリート

再生骨材の製造に用いた原コンクリートの使用材料を表-1に示す。

2.2 再生骨材製造フロー⁴⁾

表-2に原コンクリートの配合とコンクリートのフレッシュ性状を示す。原コンクリートはレディーミクスト

*1 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (正会員)

*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻講師 工博 (正会員)

*4 日工株式会社 技術本部技術部 執行役員部長 (正会員)

表-1 原コンクリートの使用材料

材料名(記号)	種類	品質
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度3.16(g/cm ³) 比表面積3200(cm ² /g)
細骨材(S)	安山岩砕砂	表乾密度2.56(g/cm ³) 吸水率2.2(%) 粗粒率2.75
粗骨材(G1,G2)	安山岩碎石	表乾密度2.60(g/cm ³) 吸水率2.1(%) 粗粒率6.70
混和剤	高性能AE減水剤	リグニンスルホン酸塩 オキシカルボン酸塩 ポリカルボン酸系化合物
	AE剤	アニオン系

コンクリートであり、コンクリートブロックの大きさは50cm×100cm×50cmである。図-1に、再生骨材の製造フローを示す。まず、材齢56日に原コンクリートブロックを油圧ブレーカーおよび小割圧砕機を用いて粗破碎した後、インペラブレーカーに投入して中破碎することによりRC30を製造した。表-3にすりもみ装置の処理条件を示す。これは、荻田ら⁵⁾の試験結果から最も低環境負荷で品質の良い骨材を製造できる条件である。

次に、RC30をすりもみ装置に投入してすりもみを行い、粒径5mm以上を分級して再生粗骨材とした。図-2に、再生粗骨材の粒度分布を示す。砕石2005よりはやや細かく、砕石1505の粒度の範囲(JIS A 5005)にあたる。再生粗骨材は、絶乾密度が2.47g/cm³、吸水率が3.81%であり、表-4に示す再生粗骨材M(JIS A 5022)の規格を満足することができた。図-3に粒径5mm以下の粒度分布を示す。再生細骨材は、絶乾密度が2.04g/cm³、吸水率が11.40%であり、表-5に示す再生粗骨材L(JIS A 5022)の規格は満足したが、Mの規格を満足することはできなかった。粒径5mm以下は、更に0.15mm以下を分級して再生微粉とした。

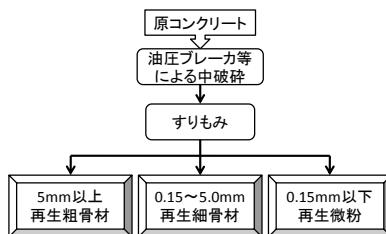


図-1 再生骨材製造フロー

表-3 乾式堅型ロッドすりもみ装置の処理条件

ロッド間隔	26.5mm
処理時間	20分
投入量	50kg

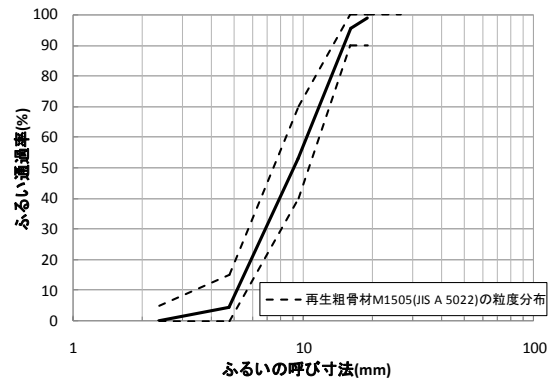


図-2 再生粗骨材の粒度分布

表-4 再生粗骨材の規格 (JIS A 5021~JIS A 5023)

項目	L	M	H
絶乾密度(g/cm ³)	-	2.3以上	2.5以上
吸水率(%)	7.0以下	5.0以下	3.0以下

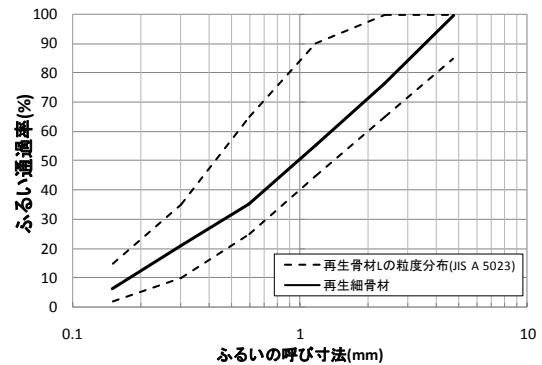


図-3 再生細骨材の粒度分布

表-5 再生細骨材の規格 (JIS A 5021~JIS A 5023)

項目	L	M	H
絶乾密度(g/cm ³)	-	2.2以上	2.5以上
吸水率(%)	13.0以下	7.0以下	3.5以下

2.3 乾式堅型ロッドすりもみ装置の概要⁴⁾

本研究で使用したすりもみ装置の外観を写真-1に、内部の機構を写真-2に示す。すりもみ装置の内部は円筒鋼板で2つのレーンに仕切られており、径24mmの鋼製のね

表-2 原コンクリートの配合とフレッシュ性状

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)					C×%		スランプ(cm)	空気量(%)
		W	C	S	G1	G2	高性能AE減水剤	AE剤		
65	49	185	285	855	405	495	1.6	0.0016	16.5	4.8

じ切りロッドが鉛直に配置されている。ロッドを回転させると、投入した個々の粒子は回転しながらロッドの間隙を通過し、全体としてはレーンに沿って流動する。この際、骨材表面に付着しているモルタルが骨材同士およびロッドとのすりもみによって剥離されることで、再生骨材が製造される。試験に使用したすりもみ装置は処理能力が 150~200kg/h であり、骨材製造 1t 当たり約 5.2~6.9kWh/t の電力が必要である。すりもみ装置の購入電力を 6.0kWh/t とし、電力の CO₂ 排出量を 0.407kg-CO₂/kWh と仮定すると、骨材製造 1t 当たり 2.44kg の CO₂ 排出となる。加熱すりもみ法を用いて再生骨材を製造した場合の骨材製造 1t 当りの CO₂ 排出量は 38.2kg-CO₂/t である⁶⁾。



写真-1 すりもみ装置の外観

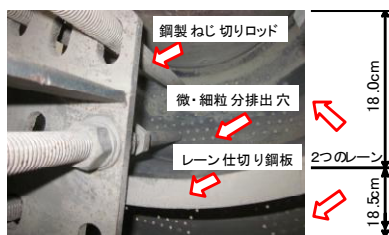


写真-2 すりもみ装置の内部

3. 再生細骨材の改質

再生細骨材の利用は、再生細骨材自体の強度や吸水率といった問題点があり、その実現には至っていないのが現状である。再生細骨材の品質は、骨材表面に付着するセメントペーストの品質や、マイクロクラックに大きく影響されると考えられる。また、再生細骨材の粒子のほとんどが硬化ペーストであるものも少なくない。著者らは、ボールミルを用いて物理的に再生細骨材を改質することを試みたが、再生細骨材は粒径が小さいため、セメントペーストを除去することは困難であった。また、物理的な改質を行うことで再生細骨材からセメントペーストが剥離し、再生微粉が増加することが問題となる。

そこで本研究では、再生細骨材についてボールミルによる物理的な処理を行わず、炭酸化のみによる密度、吸水率の改質について検討を行った。炭酸化を行うことにより、再生細骨材の表面に付着しているセメントペース

ト中の水酸化カルシウムと反応することで炭酸カルシウムが生成され、CO₂ が固定される。炭酸カルシウムの発生によりセメントペーストが緻密化し、さらにマイクロクラックが埋まることで品質が改善されると考えられる。

再生骨材は 0.15mm 以下の粒度が含まれていないものを使用し、再生細骨材の炭酸化は、温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 10%の環境下で促進中性化装置により行った。炭酸化が均一に進行するように、再生細骨材の試料を容器に薄く敷き、1日1回かき混ぜた。

炭酸化による質量増加を図-4に、吸水率と絶乾密度の改質結果を各々図-5、図-6に示す。

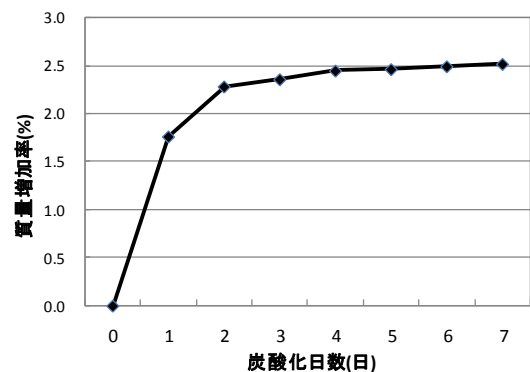


図-4 炭酸化による質量変化

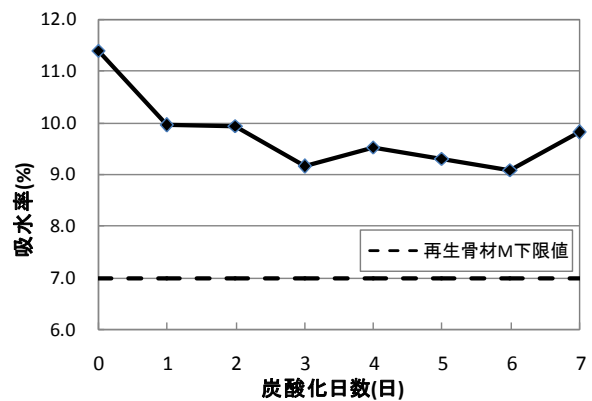


図-5 炭酸化日数と吸水率

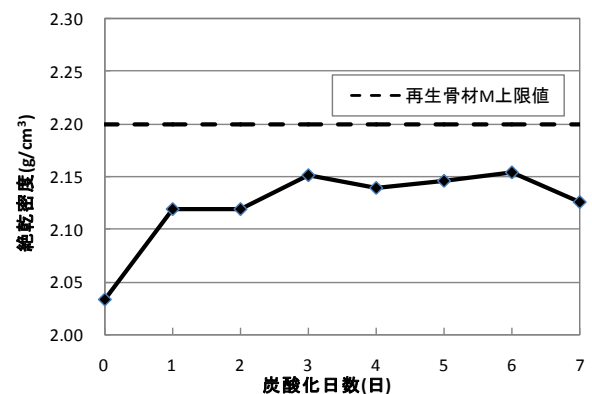


図-6 炭酸化日数と絶乾密度

質量は炭酸化により1日目から2日目にかけて急激に増加するが、4日目以降はほとんど増加せず、7日目で約2.5%の質量増加となった。炭酸化による改質を行う前の再生細骨材は吸水率が11.4%、絶乾密度が2.03g/cm³であり、すりもみ装置により製造される再生細骨材は再生骨材 L(JISA5023)に相当する品質であった。炭酸化を行うことにより吸水率、絶乾密度ともにある程度改質効果が見られるものの、吸水率で約9.0%、絶乾密度で約2.15g/cm³までの改質に留まり、再生細骨材 M (JIS A 5022)の規格を満足することはできなかった。改質結果には多少バラツキがあるが、これはそれぞれ異なる試料を計測しているため、試料自体のバラツキが影響したものと考えられる。今回用いた試料は原コンクリートの水セメント比が65%であることから、もともと再生細骨材に付着しているペーストが低品質であり、炭酸化による品質の改善には限界があるものと考えられる。しかし、3日間程度炭酸化を行うことで吸水率、絶乾密度の改質効果がある程度得られることが明らかとなったので、本研究ではこの条件再生骨材を用いることとした。

4. 再生骨材コンクリート

4.1 試験概要

炭酸化による改質結果をふまえ、低環境負荷で製造した再生骨材を用いたコンクリートの性能について実験を行った。コンクリートの配合は表-6に示す11配合とした。配合記号は、Sが細骨材、Gが粗骨材、Rが再生骨材、cが改質、数字は微粉混入量と水セメント比を表している。炭酸化による再生骨材の改質がコンクリートに与える影響について検討するため、再生細骨材を改質したものと未改質のものそれぞれについて配合を設定した。改質の条件は温度20℃、湿度60%、CO₂濃度10%の環境下で促進中性化装置によって行うものとした。上述のように、再生細骨材は3日間炭酸化を行った。すりもみ装置によって製造される再生骨材の割合は、再生粗骨材が35~45%、再生細骨材が45~50%、再生微粉が15~20%程度であると考えられる。再生骨材の発生割合により、再

生細骨材と微粉が利用しきれないことが考えられる。よって、再生細骨材を用いる場合は全量を用いることとし、また、再生細骨材と普通粗骨材を組み合わせた配合も設定した。微粉についても同じく利用しきれないことから、コンクリートに使用できる範囲内で60kg/m³、90kg/m³の微粉を細骨材置換として混入する配合を設定した。

再生骨材に関しては粒度分布においてJISの規格を満たしていないが、本研究では製造される再生骨材の全量を使用するという観点から、粒度調整を行わずそのままの状態の骨材を用いてコンクリートを製造した。

コンクリートの製造は、温度20℃、相対湿度60%の試験室において、容量100リットルのミキサを用いて行い、1バッチの練混ぜ量を55リットルとした。

フレッシュコンクリート試験における目標値は、スランプが8±2.5cm、空気量が5.0±1.5%と設定した。表-4にコンクリートのフレッシュ性状の試験結果も合わせて示した。細骨材、粗骨材ともに再生骨材を用いた配合については高性能AE減水剤を使用しなければ所定のスランプ値を満足させることができなかった。また、再生微粉を用いた場合も同じく、高性能AE減水剤を使用し、混入量に比例して混和剤の添加量も多くなる結果となった。

表-7にコンクリート試験に使用した材料と品質を示す。

表-7 使用材料

材料名	種類(記号)	品質
セメント	普通ポルトランドセメント(C)	密度3.15g/cm ³ 、比表面積3290cm ² /g
微粉末	再生微粉(RP)	0.15mm以下、表乾密度2.40g/cm ³
細骨材	中砂(S)	表乾密度2.61g/cm ³ 、吸水率1.21%
	再生細骨材【未改質】(RS)	表乾密度2.27g/cm ³ 、吸水率11.40%
	再生細骨材【改質】(RSc)	表乾密度2.33g/cm ³ 、吸水率9.47%
粗骨材	安山岩碎石【1505】(G1)	表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.84%
	安山岩碎石【2010】(G2)	表乾密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.78%
	再生粗骨材【2005】(RG)	表乾密度2.56g/cm ³ 、吸水率3.81%
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物
		ポリカルボン酸エーテルの複合体
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-6 再生骨材コンクリートの配合とフレッシュ性状

配合記号	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)									C×%			スランプ(cm)	空気量(%)			
			W	C	S	RS(未改質)	RSc(改質)	RP	G1	G2	RG	AE減水剤	高性能AE減水剤	AE剤					
S-G-55	55	46	170	309	819	-	-	-	482	482	-	-	0.25	-	0.003	5.5	5.0		
S-RG-55			170	309	819	-	-	-	-	-	943	-	0.5	-	0.002	8.2	5.4		
RS-G-55			170	309	-	712	-	-	482	482	-	-	1	-	0.006	7.5	4.5		
RSc-G-55			170	309	-	-	731	-	482	482	-	-	1.1	-	0.007	7.3	5.5		
RS-RG-55			170	309	-	712	-	-	-	-	943	-	-	0.3	0.001	5.5	4.8		
RSc-RG-55			170	309	-	-	731	-	-	-	943	-	-	0.375	0.002	8.7	6.4		
RSc-60-RG-55			170	309	-	-	673	60	-	-	943	-	-	0.5	0.0033	9.3	5.0		
RSc-90-RG-55			170	309	-	-	643	90	-	-	943	-	-	0.65	0.0035	5.6	3.6		
RS-RG-45			45	46	170	378	-	689	-	-	-	912	-	-	0.5	0.001	7.7	6.3	
RSc-RG-45					170	378	-	-	707	-	-	-	912	-	-	0.5	0.001	9.5	5.5
RSc-60-RG-45					170	378	-	-	649	60	-	-	912	-	-	0.9	0.007	9.1	5.0

4.2 試験項目

本研究では硬化コンクリート試験として、圧縮強度試験、静弾性係数試験、長さ変化試験、促進中性化試験、凍結融解試験を行ったが、ここでは特に圧縮強度試験と静弾性係数試験について考察を行うこととし、その他の試験結果については別途報告する。

4.3 圧縮強度試験結果

材齢7日および28日における圧縮強度試験の試験結果を図-7に示す。

(1) 再生骨材使用による影響

図-7より、粗骨材に再生骨材を用いた場合の強度発現は、普通骨材のそれと同等の値を示した。これは、再生粗骨材に関してはすりもみ装置による処理で普通骨材に近い品質が得られたことを意味する。細骨材に未改質の状態再生骨材を用いた場合、さらに粗骨材にも再生骨材を用いた場合は、いずれも普通骨材を用いた場合より強度が低下している。その傾向は材齢が増加すると顕著になり、材齢28日における再生骨材使用による強度低下は最大で10%程度であった。この結果は強度低下が再生骨材の利用に起因していることを示す。これは、再生細骨材に低品質なペーストが多く付着していること、及び硬化ペーストからなる再生細骨材も少なくないことによるものと考えられる。また、再生細骨材に含まれる未水和成分の反応に加え、再生微粉の充填効果によって再生骨材使用による強度の低下を抑制したと考えられる。

(2) 再生細骨材の改質による影響

図-7より、どの配合においても改質した再生細骨材を用いる場合の方が、未改質のものを用いた場合よりも、7~25%程度強度が大きい結果を示した。加えて、普通骨材を用いた場合よりも大きい強度を示した。この原因として、改質効果により再生細骨材とペーストの付着効果が高まった可能性が考えられるが、これらのメカニズムに関しては今後詳細に検討する必要がある。

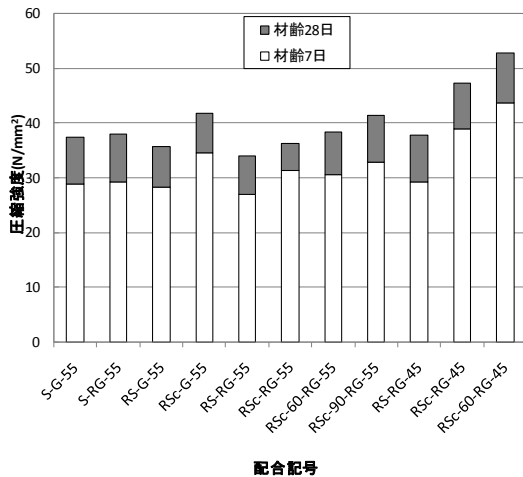


図-7 圧縮強度試験結果

(3) 再生微粉使用による影響

再生微粉混入量と圧縮強度の関係図を図-8に示す。図より、再生微粉混入量の増加に伴い圧縮強度は11~14%増加しており、材齢7日、28日のどちらにおいても普通コンクリート(図中点線)と同等かそれ以上の強度が示された。これは再生微粉による充填効果に加え、再生微粉に含まれる未水和成分によるものと考えられる。また、高性能 AE 減水剤による高い分散性が強度に影響を与えたことも考えられる。この結果から、所定のスランプを得ることができれば、微粉を混入することによって強度発現を促進させ、微粉を有効に活用できる可能性があると言える。

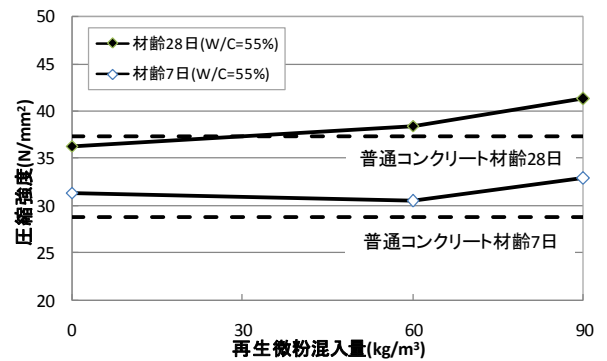


図-8 再生微粉混入による圧縮強度への影響

4.4 静弾性係数試験結果

材齢7日および28日における静弾性係数試験の試験結果を図-9に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10に示す。また、コンクリート標準示方書設計編⁷⁾(以下、示方書)に記載されている圧縮強度と静弾性係数の関係も合わせて示した。

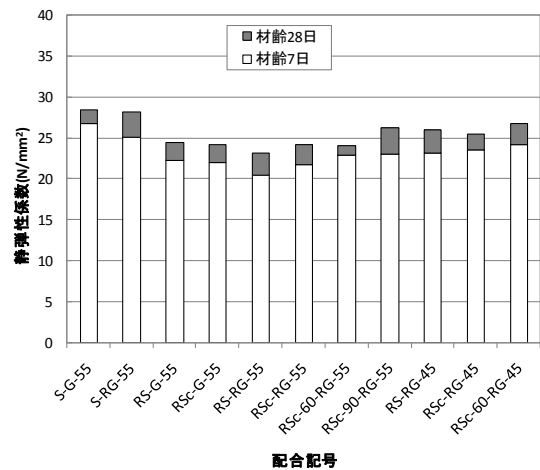


図-9 静弾性係数試験結果

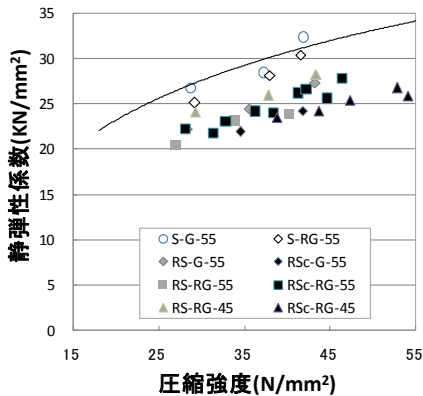


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-10 より、圧縮強度と静弾性係数の関係において、普通骨材を用いたものに関しては概ね示方書に示される値と同等の値を示した。また、粗骨材にのみ再生粗骨材を用いた配合についても、示方書の値よりは小さいが、近い値を示している。しかし、細骨材、粗骨材ともに再生骨材を用いた配合については、水セメント比や再生細骨材の改質の有無によらず、圧縮強度に対する静弾性係数の値は小さい値を示している。これは、本研究で用いた原コンクリートの水セメント比が65%であることから、再生細骨材に付着するセメントペーストが低品質であることに起因するものと考えられる。再生細骨材の改質により圧縮強度は増加するが、静弾性係数に与える影響は小さい結果であった。再生微粉を混入すると圧縮強度、静弾性係数ともに増加する傾向にあるが、静弾性係数は、圧縮強度と比べるとその増加割合は小さい。

5. まとめ

本研究では、低環境負荷型のすりもみ装置を使用して再生骨材を製造し、得られた骨材を全量リサイクルすることを目標として再生骨材コンクリートを製造した。再生細骨材については炭酸化による改質を行い、改質がコンクリートの性能に及ぼす影響について検討を行った。また、再生微粉を混入することによる影響についても検討を行った。

本研究における試験結果をまとめると以下の通りである。

(1) 再生骨材の製造

乾式堅型ロッドすりもみ装置を使用することにより、低環境負荷で、再生骨材を製造することが可能である。また、再生粗骨材については JIS における M の規格を満足し、再生細骨材については JIS における L の規格を満足する品質が得られる。

(2) 再生細骨材の改質

再生細骨材を3日間程度炭酸化させることで、ある程度品質を改善することが可能である。しかし、再生骨材 M の規格を満足することはできない結果となった。

(3) 再生骨材コンクリートの配合

再生粗骨材と再生細骨材を同時に使用する場合は、高性能 AE 減水剤を使用しなければ所定のスランプが得られない。また、再生微粉を混入する場合にも多くの高性能 AE 減水剤が必要である。

(4) 再生骨材コンクリートの硬化特性

圧縮強度は、再生粗骨材のみを使用した場合には普通骨材のそれと同等の強度を示したが、再生細骨材を使用した場合は強度が低下する。また、微粉を混入することによりコンクリートの強度は増加した。再生細骨材を炭酸化によって改質することで、圧縮強度が増加する。

静弾性係数については、再生骨材を用いることで示方書の値より小さくなる。微粉の混入、細骨材の改質が静弾性係数に与える影響は見られない。

謝辞

本研究は、平成 24 年度住宅・建築関連先導技術開発助成事業（課題名「廃コンクリート・石系廃棄物の低炭素・完全循環利用技術の開発（代表者：香川大学教授 堺孝司）」）の補助金を受けて行ったものである。尚、再生骨材は三豊産業で製造された。ここに合わせて感謝の意を表す。

参考文献

- 国土交通省のリサイクルホームページ：建設副産物排出量の将来予測
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/recycle/index.html>
- 環境省：チャレンジ 25
<http://www.challenge25.go.jp/index.html>
- 東京建設業協会：<http://token.or.jp/kankyoku/warming/>
- 河村景史，堺孝司，錦織和紀朗，北垣亮馬：廃コンクリートの低環境負荷完全リサイクルに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1,pp.1492-1497，2012
- 荻田 家久，藤戸 幹大：廃コンクリートからの再生粗骨材の効率的製造に関する基礎的研究，第 38 回砕石フォーラム，2011.10
- 土木学会：コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針，p.16，2005
- 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書設計編，p.44，2008