

再生骨材の普及に向けた品質改善と提供手法に関する研究

亀山 敬宏^{*1}， 松田 信広^{*2}， 伊代田 岳史^{*3}

Study on Quality Improvement and Providing Method for the Promotion of Utilization of Recycled Aggregate

Takahiro KAMEYAMA^{*1}, Nobuhiro MATSUDA^{*2} and Takeshi IYODA^{*3}

要旨：近年，骨材不足が問題となっているなか，再生骨材の普及は必須である．しかし，コストや品質などに問題があり，普及していないのが現状である．そこで本研究では，再生骨材の普及に向けて，再生コンクリートにおける再生骨材の付着モルタルが強度や長さ変化に与える影響を把握すること，また，再生骨材に CO₂ ガスを吹き付けることで，付着モルタル部を炭酸化させ，骨材の物性値とコンクリートに使用した際の強度，耐久性への影響を調査した．その結果から，骨材出荷時に工夫をすることで要求された品質となるような骨材提供の可能性を検討した．

キーワード：再生骨材，炭酸化，原コンクリート，乾燥収縮

1. はじめに

近年，コンクリート用骨材の枯渇化が問題となっている．一方で，既設の構造物では更新や老朽化に伴いコンクリート塊が大量に発生することも予想されている．これらの問題を解決する手法として，再生骨材の利用が着目されており，研究も進められている．さらに，現在コンクリート塊の再利用の大半を占めている路盤材は，今後使用量が減少すると想定されるため，コンクリート用再生骨材の普及が望まれている．再生骨材 H はレディーミクストコンクリートの JIS(日本工業規格)により適用範囲の制限なく普通骨材同様に，コンクリート用骨材として使用可能であるが，製造時における消費エネルギーやコストが高いという問題がある．一方，再生骨材 L，M は JIS ではレディーミクストコンクリートに使用できず，適用範囲が限られているが，製造時のエネルギーやコストでは優れている．このように再生骨材はコスト

面や品質面が問題とされており，普及していないのが現状である．そこで本研究では，コストを抑えられる再生骨材 L に着目した．L は付着モルタル量が多いため，再生骨材 H に比べて付着モルタルが強度，耐久性に与える影響が大きいと考えられる．それに加え，付着モルタルの配合が不明である．ことから，原コンクリートの水セメント比の違う再生骨材を使用し，コンクリートに使用した際の強度，耐久性への影響を把握した．また，製造された再生骨材を品質改善させることを目的とし，再生コンクリートの強度，耐久性に与える影響を把握した．そこで，これらの結果から骨材の出荷時に工夫をすることで，安定的な骨材の提供が可能であるかを検討した．

2. 付着モルタルの影響

2.1 骨材製造

実際の再生骨材製造工場に搬入される解体され

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程

*2 株式会社東京テクノ 工場長

*3 芝浦工業大学工学部土木工学科 准教授

たコンクリート塊の配合は様々だと想定される。このことから、付着モルタルの配合の違いが強度や耐久性の影響に与える影響を検討するため、W/Cを30, 50, 70%と変化させたコンクリートをレディーミクストコンクリート工場の実機で製造し、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を作製した。製造に使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砕砂、山砂、粗骨材は砕石を使用した。その後供試体を材齢28日まで標準養生し、7日間大気中に暴露させ、ジョークラッシャーで破碎処理を1回のみ行う低コスト・低エネルギー型の製造方法で再生骨材を製造した。破碎後の骨材の回収方法は、5~20mmになるようにふるい分けし、回収した。破碎後、使用するまでの期間は2ヶ月程度であった。ここで製造した原コンクリートの材齢7, 28日圧縮強度を表-1に示す。また、製造時の様子を図-1に示す。

2.2 使用材料および配合

コンクリートの配合は、W/C50%, s/a50%, 単位水量 172kg/m^3 一定とし、高炉セメントB種(スラグ分量45%)を用いた。高炉セメントを用いた理由として、再生骨材によるアルカリ骨材反応の抑制および環境負荷低減を目的としている。目標スランプ $10 \pm 2.5 \text{cm}$, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。スランプ、空気量の調整方法は基本配合(砕石)の減水剤0.2%, AE剤2%に減水剤0.15%, AE剤1.0%程度増加させ調整した。また、表-2に骨材物性を示す。再生骨材に関しては、破碎後の粒度を示す。製造したコンクリートのW/Cの相違より再生骨材R-30, 50, 70と表記する。ここで再生コンクリートの製造に用いる骨材はR-30, 50, 70を100%としたものに加え、実際、再生コンクリートを製造する際、付着モルタルの強度の違う再生骨材が混合していることが想定されるため、R-30とR-70の割合を体積比で7:3, 5:5, 3:7に変化させたコンクリート配合についても併せて検討した。これらの骨材は割合に対し、RM(7:3), (5:5), (3:7)と表記する。再生骨材の使用方法としては、24時間吸水させた後、布で水分を拭き取り、表乾状態で使用した。

2.3 再生コンクリートの性能評価試験

表-3に再生骨材に加え砕石を使用したコンクリートに実施した試験項目を示す。強度試験にお

表-1 原コンクリートの圧縮強度試験結果

W/C(%)	強度(N/mm^2)	
	7日	28日
30	64.0	76.6
50	28.7	36.9
70	14.3	19.3

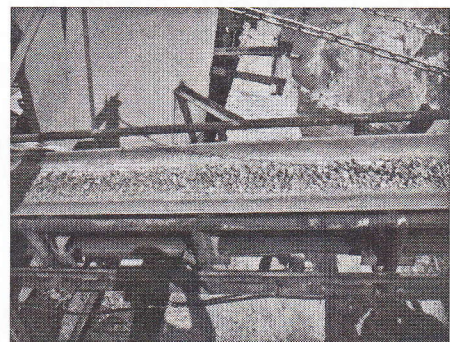
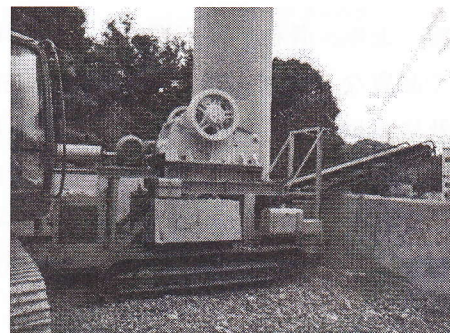


図-1 製造時の様子

表-2 骨材種類とその物性

	骨材種類	記号	表乾密度(kg/m^3)	吸水率(%)	粗粒率	規格
細骨材	山砂	S	2.69	0.99	2.91	-
粗骨材	砕石	N	2.72	0.54	6.60	-
再生粗骨材	W/C30%	R-30	2.39	6.15	6.68	L種
	W/C50%	R-50	2.34	6.55	6.79	L種
	W/C70%	R-70	2.24	6.64	6.66	L種

表-3 実施試験項目

試験	試験方法	供試体本数	試験材齢(週)
圧縮強度試験	JIS A 1108	3	4
割裂引張強度試験	JIS A 1113	30	4
長さ変化試験 (コンタクトゲージ方法)	JIS A 1129-2	3	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14

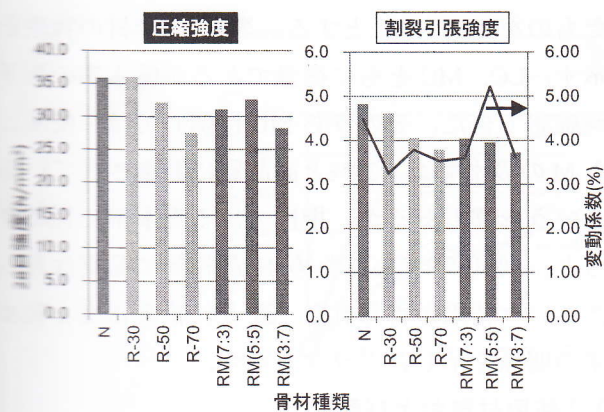


図-2 各配合の強度と変動係数
(実線は変動係数を表す)

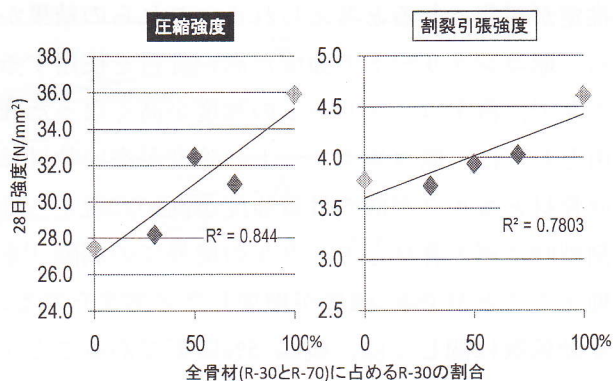


図-3 R-30, 70 の割合による強度変化

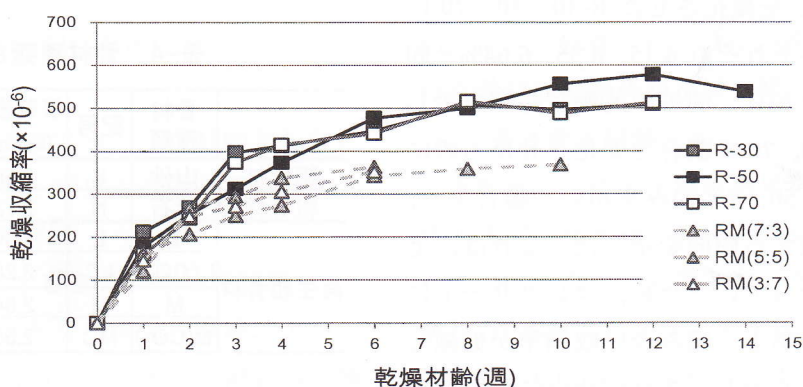


図-4 各配合の試験材齢における乾燥収縮率

いては、再生骨材にはモルタルが付着しているため、割裂する際にモルタル部と骨材の境界で破断するものや、骨材そのものが破断するものなどがあり、破壊性状が強度に影響すると考えられる。そこで、コンクリートの圧縮強度より小さい引張強度にはばらつきが生じると考え、このばらつきを確認するため割裂引張強度試験の供試体本数を30本用いることとした。さらに、再生骨材は吸水率が高く、骨材の空隙が多いと考えられるため、再生コンクリートは乾燥収縮や凍害に対する抵抗性が低いことが問題とされている。そのため、本研究では長さ変化試験を実施した。長さ変化試験は、材齢28日まで標準養生し、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ に調整した恒温恒湿室で測定を行った。

2.4 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験および割裂引張強度試験

各配合の圧縮強度、割裂引張強度およびその変

動係数を図-2に示す。一般的に再生骨材Lを使用すると普通コンクリートに比べ強度は小さくなるとされているが、R-30に関しては同等程度の強度が得られた。さらに原コンクリートの強度が高い骨材を使用することで、再生コンクリートの強度も大きくなる傾向を示した。これは付着モルタルの強度が不明なものや、不特定な構造物からの骨材が混合している製品Lを用いると強度は小さくなると想定されるが、本研究ではR-30などを単体で使用しているため、骨材の強度が大きければコンクリートの強度もそれに応じて大きくなったと考えている。次に、R-30, 70の割合を変化させた骨材を用いたコンクリートの強度をR-30の混入率との関係として図-3に示す。図-2や、この図からも原コンクリートの強度が高い骨材を多く利用することで、再生コンクリートの強度も大きくなる傾向を示し、正の相関関係が得られた。このことより、R-30の混入率が分かればある程度の強度

推定が可能であると考えられる。これらの結果から、原コンクリートの強度が高い骨材を使用することで、再生コンクリートの強度が高くなった理由としては、原コンクリートの強度が高い骨材は原骨材とモルタル部の付着強度が高いと考えられ、割裂時に再生骨材とモルタルの境界での剥離を抑えることができ、強度が増加したと考えられる。変動係数に関しては、概ね 5%以下であることから、強度のばらつきは小さいと考えられる。

(2) 長さ変化試験

各配合の長さ変化試験結果を図-4 に示す。原コンクリートの W/C を変化させた R-30, 50, 70 に関しては吸水率がそれぞれ 6.15, 6.55, 6.64%と同程度であったことから、同等の乾燥収縮率を示した。一方で、R-30, 70 の割合を変化させたものに関しては、R-30, 50, 70 のみを用いた場合より、乾燥収縮率が低減する傾向を示した。これは、それぞれ粒型が異なっていたため、コンクリートにした際に骨材同士がよく噛み合い収縮率が低減したと考えている。しかし、これについては明確ではなく、今後さらなる検討が必要と考えている。

3. 骨材の品質改善

3.1 骨材製造

一般にコンクリートを炭酸化させることで、モルタル中の水酸化カルシウムが二酸化炭素と化学反応し、炭酸カルシウムが生成し緻密化するといわれている。炭酸カルシウムが生成することにより質量も変化する。そこで、本研究では実機で製造された製品低品質・中品質骨材である L, M に強制的に CO₂ ガスを吸着させることで付着モルタルを改質し、骨材自体の品質改善につながると考え、骨材を製造した。付着モルタルが緻密化すれば、骨材全体の空隙が埋まり吸水率が低下し骨材自体の強度増加が可能であると考えている。CO₂ 吸着方法は、温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の中性化促進試験機に入れ、1 週間静置し、製造した。1 週間とした理由としては、予備実験で 2 週間静置させたものと質量を比較した結果、変化がみられなかったためである。CO₂ ガスを吸着し

たものを LC, MC とする。表-4 に骨材の物性を示す。LC, MC とともに微量であるが吸水率の低下が確認できた。そのうち MC に関しては、使用した M の吸水率が 3.28% と高品質に製造されているという影響もあるが、指標である吸水率で判断すると、3% 以下であるため H 品相等に品質改善したという結果が得られた。図-5 に絶乾密度と吸水率の関係を示したグラフを示す。

3.2 使用材料および配合

2.2 で行ったコンクリートの配合、使用材料ならびにスランプ、空気量の調整方法は同様である。

表-4 骨材種類とその物性

	骨材種類	記号	表乾密度 (kg/m ³)	吸水率 (%)	粗粒率	規格
細骨材	山砂	S	2.69	0.99	2.91	—
粗骨材	碎石	N	2.72	0.54	6.60	—
再生粗骨材	L	L	2.30	6.82	6.81	L種
	L(CO ₂)	LC	2.28	6.62	—	L種
	M	M	2.54	3.28	6.73	M種
	M(CO ₂)	MC	2.55	2.84	—	H種

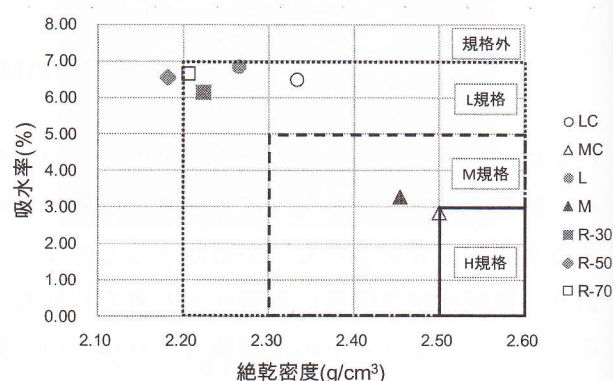


図-5 吸水率変化

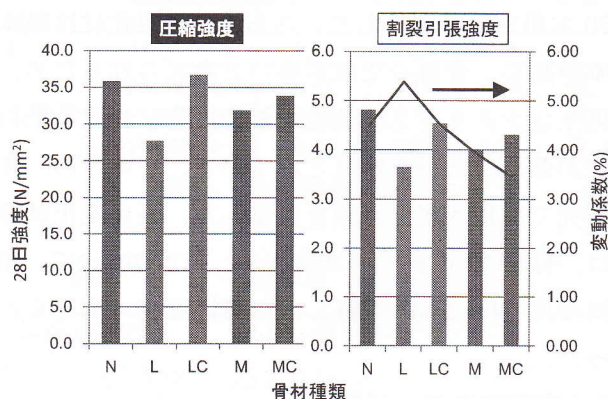


図-6 各配合の強度と変動係数
(実線は変動係数を表す)

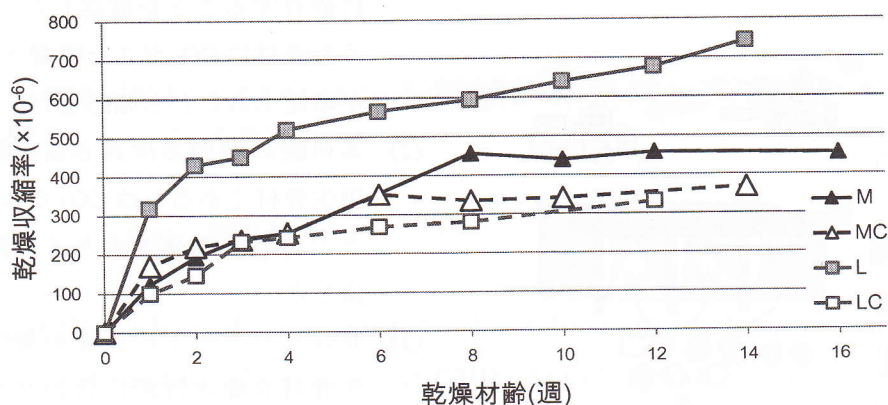


図-7 各配合の試験材齢における乾燥収縮率

骨材は N, L, LC, M, MC を用いた。

3.3 性能評価試験

骨材の品質改善を確認することを目的としたため 2.3 の性能評価試験と同様の試験を行った。

3.4 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験および割裂引張強度試験

各配合の圧縮強度、割裂引張強度試験およびその変動係数を図-6 に示す。圧縮強度、割裂引張強度ともに CO_2 ガスを吸着させたことで強度増加する結果が得られた。また再生骨材 M に比べ、品質が悪い L の方が改質したのは、付着モルタルの量が多いことにより、そこが炭酸化の影響を強く受けて、強度が増加したと考えられる。この強度増加した原因としては、骨材に付着しているモルタル部が炭酸化したことによって、モルタル部の強度が高くなり、再生コンクリートの強度増進に寄与したと考えている。このほかに原骨材と付着モルタルとの界面(遷移帯部分)に CO_2 ガスが入り込むことで付着モルタルが剥がれ落ちやすくなり、練り混ぜの際にミキサー中で衝撃により剥がれ落ち、骨材における付着モルタル量が減少したことで、強度増進したと推察される。しかし、まだ証明できるまで至っていないため、今後このメカニズムについて検討し明らかにしたいと考えている。再生骨材 L は品質面が問題となっていることから再生コンクリートにした際に強度にばらつきをもたらすと考えていたが、変動係数は概ね 5% 以下で安定し、ばらつきは小さいと考えられる。また、

CO_2 ガスを吸着させていない骨材と比べて吹き付けた骨材は変動係数が減少傾向を示した。

(2) 長さ変化試験

各配合の長さ変化試験結果を図-7 に示す。乾燥収縮率は吸水率の高い、低品質再生骨材である L が著しく大きい結果となった。乾燥収縮の最大値は、土木学会コンクリート標準示方書 2007 年版³⁾では 1200×10^{-6} 、建築学会 JASS5⁴⁾では 800×10^{-6} と定められていることから、L は今後、上限値に到達する可能性があるため、JIS の記載どおり乾燥収縮の影響を受ける場所に使用できないと考えられる。再生骨材 M に関しては、L 程大きな値は示していない。 CO_2 ガスを吸着した骨材 MC に関しては、M と同等の乾燥収縮率を示し、大きな改善はみられなかった。LC に関しては、乾燥収縮率の大きかった L に比べ大きな低減がみられ、大きな改善効果があったことが得られた。

(3) コンクリートに対する吸水率の影響

CO_2 を吸着させた LC, MC に吸水率の大きな変化はみられなかったが、強度試験、長さ変化試験の結果から CO_2 を吸着させた骨材と吸着させていない骨材を比較すると大きな違いがあった。既往の研究⁵⁾からは吸水率の増加に伴い圧縮強度は低下するといわれている。しかし本研究の結果は異なることや、乾燥収縮率の低減もみられたため、吸水率の影響だけでなく他の違う要因があると考えられる。今後も更なる検討が必要であると考えている。

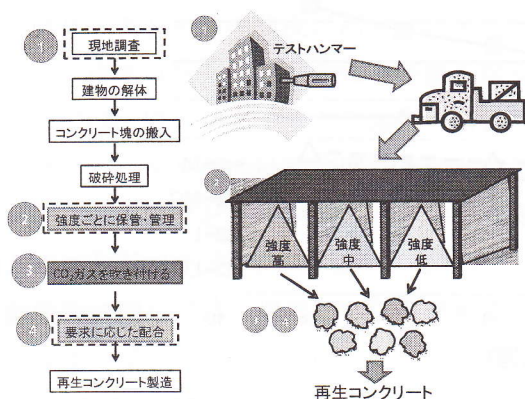


図-8 再生骨材提供システム

4. 再生骨材提供システムの提案

以上の実験結果をもとに次のような再生骨材提供システムを提案する。システムの一連の流れを図-8に示す。まず、構造物を解体する前に構造物のコンクリート強度をある程度把握するため、簡易的な手法としてテストハンマーなどを用いて強度を推定する。その後、建物を解体し、このコンクリート塊を破碎処理のみを行い、調査した強度を2章で用いた強度レベル程度に分け保管・管理する。その後CO₂ガスを吸着させ骨材自体の品質を改善させた後、構造物製造時の要求に応じた強度となるように骨材を混合させ、再生コンクリートを製造する。また、CO₂ガスを吸着させる際の一つの提案としてCO₂排出の多いセメント工場などの排気ダクトにCO₂吸着室のようなものを設け骨材の品質を改善させる。これにより工場から排出されるCO₂ガスの量も削減することができ、既往の研究⁶⁾では、再生碎石5mm通過分の粒子1tあたりのCO₂固定量は11kg-CO₂という結果があり、環境負荷低減に寄与できると考えられる。

5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 低コスト、低エネルギーで製造する破碎処理程度のみで製造する低品質骨材においては、強度試験、割裂引張強度試験結果より再生コンクリートの強度は、原コンクリートの強度

に依存することを確認した。また、このような骨材にCO₂ガスを吸着させることで強度が増進することも確認した。

- (2) 本研究の範囲では長さ変化試験から低品質再生骨材であるLはCO₂ガスを吸着させることで乾燥収縮率が大きく低減することが確認した。
- (3) 原コンクリートの強度を管理することで再生骨材を要求性能に合わせた形で供給可能であることが示唆された。

吸水率が高い再生骨材を使用することでコンクリートは強度が小さく、乾燥収縮が大きいという既往の結果がある。しかし、本研究のLCのように既往の研究と異なった結果が得られたことから、再生コンクリートの品質を一概に吸水率だけで判断できないと考えられる。よって、今後は現在の指標以外の判定基準を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 森脇和己ほか：中品質の再生粗骨材を用いた再生コンクリート梁の強度と破壊性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，2013
- 2) 佐伯竜彦ほか：中性化によるモルタルの強度変化，土木学会論文集，No.451，pp.69-78，1992
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2007
- 4) 建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2009
- 5) 片平博：再生骨材の品質がコンクリートに与える影響，セメント・コンクリート，No.654，pp.38-44，2001.8
- 6) 土木学会：コンクリートライブラリー134，コンクリート構造物の補修・解体・再利用におけるCO₂削減を目指して，pp.74-102，2012