

炭酸化による低品質再生骨材の改質技術の提案と 改質再生骨材がコンクリートに与える影響

松田 信広*1・伊代田 岳史*2

概要: 循環型社会の構築に向けて、再生骨材コンクリートの普及が望まれる。本研究では、二酸化炭素を利用した低品質再生骨材の改質を目的に、炭酸化による改質技術を提案し、改質再生骨材がコンクリートに与える影響について検討を行った。その結果、炭酸化技術によって再生骨材の改質が可能であることがわかった。また、改質再生骨材を用いることで、コンクリートの強度、長さ変化率、耐久性、凍結融解抵抗性の改善を確認した。さらに、この技術を用いることで、エネルギー工場における二酸化炭素排出量を削減することができる。

キーワード: 再生骨材, 再生骨材コンクリート, 炭酸化, 骨材置換法, 遷移帯

1. はじめに

環境負荷低減、循環型社会の構築が建設の分野において求められている。近年、解体コンクリート塊は、道路用の路盤材としてそのほとんどが再生利用されてきた。しかし、将来的には道路工事の減少が予測されることから、路盤材としての需要はあまり期待できないと考える。そこで、今後も循環型社会の構築を目指していくためには、解体コンクリート塊の新たな利用先として、再生骨材コンクリートの普及が必要であると考えられる。

再生骨材コンクリートの普及や実用化に向けては、これまでに多くの研究が報告されており、JIS規格・基準類¹⁾は整備され、実構造物への適用も報告^{2) 3)}されている。しかし、2006~2016年までの全国生コンクリート工業組合連合会および再生骨材コンクリート普及連絡協議会の統計によると、全国の生コンクリート出荷量に占める再生骨材コンクリート出荷量の割合は、0.1%未満と非常に少ない状況にあり、再生骨材コンクリートが本格的に普及しているとは言い難い。その普及を阻害している要因は、再生骨材の品質と骨材製造時のエネルギーやコストであると考えている。

高品質再生骨材であるHは、JIS A 5308 附属書Aに規定されていることから、普通コンクリート用の骨材として扱うことができる。しかし、加熱すりもみやスクリーパー磨砕等の特殊な製造設備を必要とすることから、骨材製造に係るエネルギーやコストがかかり、また、副産微

粉末の発生が多量である。

一方、中・低品質再生骨材であるM・Lは、Hと比較してエネルギーやコストをかけずに製造することができ、副産微粉末の発生が少ない。しかし、その反面、骨材に付着しているモルタルおよび骨材に塊として混入しているモルタル（以下、混入モルタル）の割合が大きく、一般的には骨材自体の品質が劣ることから、再生骨材M・Lを用いたコンクリートの適用範囲は限定されている。したがって、これらの品質を改善（以下、改質）させる技術が必要である。

環境負荷低減においては、世界的な地球温暖化対策に向けて、温室効果ガスの一つである二酸化炭素の排出量を削減することが求められている。したがって、建設の分野においてもコンクリート製造に関わる二酸化炭素排出量削減に向けた取り組みが必要である。

以上の背景から、今後の再生骨材コンクリートの普及を見据えた場合、エネルギーやコストをあまりかけずに製造することができる低品質再生骨材を改質し、その一方で、二酸化炭素の排出量を削減できる技術が必要であると考えた。そこで、二酸化炭素を利用した低品質再生骨材の改質を目的に、炭酸化による改質技術を提案し、改質した再生骨材（以下、改質再生骨材）がコンクリートに与える影響について検討を行った。

2. 炭酸化による改質技術の提案

*1 (株) 東京テクノ 工場長 (正会員) 〒195-0064 東京都町田市小野路町 3343

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員) 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5

2.1 改質技術の提案とその効果

(1) 改質技術の概要

再生骨材の品質を左右するものとして、混入モルタルの割合やその品質が指摘⁴⁾、⁵⁾されている。そのため、再生骨材の品質を向上させるための手段として、一般的に磨砕やすりもみ等の製造技術によって混入モルタルを削除する。しかし、それには多大なエネルギーとコストを要し、副産微粉末の発生が増加する。そこで、混入モルタルを削除せずにその部分の品質を改善させることで再生骨材の改質を行うことができれば、低エネルギー・低コストで高品質な再生骨材を製造することができ、さらに、副産微粉末の発生も抑制できると考えた。

再生骨材を改質させるための手段として、コンクリートの炭酸化メカニズムに着目した。コンクリートの炭酸化は、大気中の二酸化炭素がコンクリートに浸透することで、コンクリート中の水和生成物である水酸化カルシウムが二酸化炭素を吸着し、炭酸カルシウムに変化する現象である。これらは、鉄筋コンクリートにおいては、細孔溶液の pH を低下させて不動態皮膜を破壊し、鉄筋腐食を引き起こす劣化現象として中性化と呼ばれている。しかし、コンクリートのみに着目した場合、炭酸化により水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化すると、両者の分子量と密度から体積は約 12% 増加すると計算され、一般的には細孔量が減少し、強度が増加することが知られている⁶⁾、⁷⁾。そこで、混入モルタルを炭酸化させ、そのモルタル部分を緻密化させることができれば、混入モルタルを削除せずに再生骨材を改質することができ、結果、再生骨材コンクリートの欠点である強度や耐久性を向上できると想定している。

(2) 炭酸化の方法とその効果

再生骨材を炭酸化させる方法として、促進中性化装置による強制的な二酸化炭素吸着（以下、強制炭酸化）を行った。強制炭酸化は、温度 20°C、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の条件下で行った。つぎに、炭酸化の期間を決定するため、再生骨材の二酸化炭素吸着量を測定した。二酸化炭素吸着量は、促進中性化装置に気乾状態の再生骨材を静置させ、各吸着期間の質量を測定し、次の式(1)より算出した。再生骨材の二酸化炭素吸着量を図-1 に示す。

$$CA(\%) = (At - Az) / Az \times 100 \quad (1)$$

ここに、CA(%) : 二酸化炭素吸着量、At : 吸着期間 t における質量、Az : 気乾質量

再生骨材の二酸化炭素吸着量は、概ね 7 日で落ち着いていることがわかる。したがって、混入モルタルの強制炭酸化は 7 日で満足できるものと判断した。また、二酸化炭素吸着量は、粗骨材、細骨材ともに再生骨材のクラスが M < L の順に大きくなっていることから、再生骨材

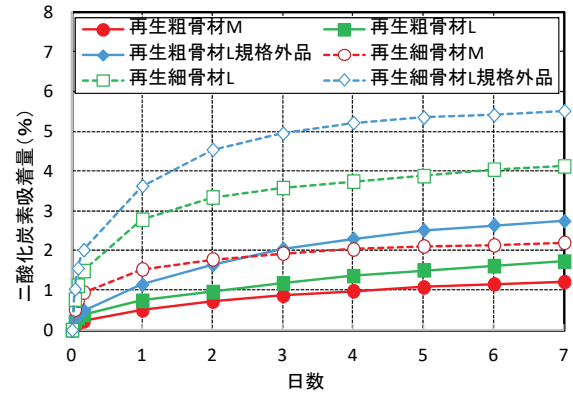


図-1 再生骨材の二酸化炭素吸着量

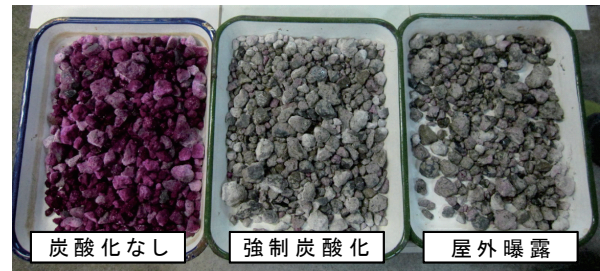


写真-1 フェノールフタレイン溶液噴霧状況

の品質が悪いものほど、すなわち混入モルタル量が多いものほど改質効果が大きいことが予測される。さらに、粗骨材と細骨材で比較すると、細骨材の方が二酸化炭素吸着量は大きいことから、細骨材の方が改質効果は大きいことが予測される。

なお、強制炭酸化中は、2日に1回の割合で試料をかき混ぜ、骨材全体に二酸化炭素がいき渡るようにした。

一方で、今後の実用化を考えた場合、強制炭酸化よりもさらに低エネルギー・低コストで簡略化した方法についても検討が必要と考えた。そこで、屋外曝露環境下において二酸化炭素吸着（以下、屋外曝露）を行った。屋外曝露による炭酸化は、降雨や日照の影響を受ける場所において、10週間もしくは26週間の曝露を行った。

炭酸化なし、強制炭酸化および屋外曝露（10週間）を行った再生粗骨材にフェノールフタレイン溶液を噴霧した状況を写真-1に示す。強制炭酸化および屋外曝露を行った再生粗骨材は、炭酸化を行っていないものと比較して着色が少なく、外観からは二酸化炭素を吸着し、炭酸化したことが確認できる。

つぎに、強制炭酸化と屋外曝露による再生骨材の改質効果を確認した。再生骨材は粗骨材のみ検討を行った。原コンクリートには、戻りコンクリート（購入者の事情で不要となったもの）を使用した。戻りコンクリートの使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント（C）、細骨材は砕砂（S1）および砂（S2）を 7 : 3 で混合したもの、粗骨材は碎石（JG）である。配合および基礎性状

表-1 戻りコンクリートの配合

原コン強度*1	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	S1/S2	JG
18N	66.5	46.0	242	161	610/255	1029
24N	57.0	45.4	277	158	594/250	1029

*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm²)
 ※ 目標スランブ：8cm, 目標空気量：4.5%

表-2 戻りコンクリートの基礎性状

原コン強度*1	スランブ (cm)	空気量 (%)	材齢 28 日 標準養生 (N/mm ²)	材齢 20 日*2 封かん養生 (N/mm ²)
18N	10.0	4.5	21.9	21.1
24N	8.0	4.3	33.2	32.8

*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm²)
 *2 骨材製造時の材齢

表-3 再生粗骨材の特性

骨材名称	原コン強度*1	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	モルタル混入率 (%)
18RG	18N	2.29	5.78	6.71	35.8
24RG	24N	2.29	5.72	6.72	36.5

*1 原コンクリートの呼び強度 (N/mm²)

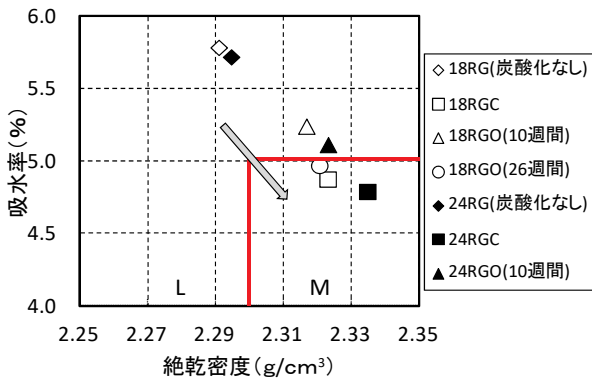


図-2 再生粗骨材の密度・吸水率

を表-1 および表-2 に示す。戻りコンクリートは、工場内に広げ 20 日間硬化させた後、原コンクリートとして使用した。また、原コンクリートは、戻りコンクリートの呼び強度が 18N/mm² (以下, 18N) のものと 24N/mm² (以下, 24N) のものを用いた。

再生粗骨材の製造は、再生骨材プラントにおいて行った。再生粗骨材の特性を表-3 に示す。屋外暴露は、18N のみ 10 週間実施したものと 26 週間実施したものを用いて、暴露期間の違いによる影響について検討した。再生粗骨材の密度・吸水率を図-2 に示す。なお、強制炭酸化および屋外暴露を行ったものは骨材名称の後に「C」および「O」と表記している。強制炭酸化および屋外暴露を行ったものは、密度・吸水率が改善し、クラスアップしているものも確認できる。つぎに、強制炭酸化と屋外暴露による改質効果を表すものとして、改質前後の値の差を改質前の値で除したものを「改善率」とし、各骨材に対する吸水率の改善率を確認した。炭酸化を行って

表-4 再生骨材の物性

種類	骨材名称	品質区分	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	モルタル混入率 (%)	原コン*2
粗骨材	MA	M	2.50	3.06	15.1	解
	MB		2.51	3.01	19.7	解*3
	MC		2.44	3.94	28.5	解*3
	MD		2.43	3.47	21.7*1	解*3
	LA	L	2.32	5.69	41.0	解
	LB		2.35	5.66	40.8	解
	LC		2.24	6.13	42.9*1	解
	LD		2.26	6.82	57.1	解
	OA	外品	2.21	7.44	53.9	戻
	OB		2.20	10.79	60.2*1	戻
細骨材	MS	M	2.34	4.80	—	解*3
	LS	L	1.94	12.92	—	解
	OS	外品	1.92	14.57	—	戻

*1 破砕値から算出した参考値
 *2 解：解体コンクリート 戻：戻りコンクリート
 *3 一部、戻りコンクリートを含む

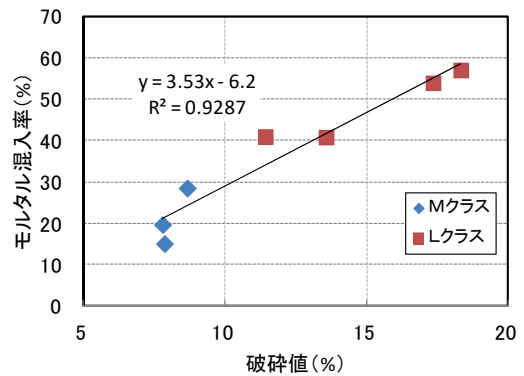


図-3 破砕値とモルタル混入率の関係

ないものに対する吸水率の改善率は、強制炭酸化を行った 18RGC は 15.7%, 24RGC は 16.2% となり、屋外暴露を行った 18RGO は 9.4%, 24RGO は 10.6% であった。この結果から、屋外暴露に比べて強制炭酸化の方が改質効果は大きいことがわかった。一方、屋外暴露を 26 週間行ったものの改善率は 14.1% であり、暴露期間を長くすることで改質効果は向上したが、強制炭酸化の改善率には及ばなかった。以上の結果から、屋外暴露による炭酸化では、改質は確認できたものの、強制炭酸化と同等の効果は得られないことがわかった。

(3) 流通している再生骨材での実証

実際に流通している再生骨材を用いて、強制炭酸化による再生骨材の改質効果を確認した。使用した再生骨材の物性を表-4 に示す。再生骨材は、再生粗骨材を 10 種類、再生細骨材を 3 種類用いた。再生骨材の品質は、絶乾密度および吸水率により区分すると、再生粗骨材は、M クラスが 4 種類、L クラスが 4 種類、L の規格を外れているもの (以下, 外品) が 2 種類である。再生細骨材は、M, L, 外品がそれぞれ 1 種類である。なお、再生粗骨材におけるモルタル混入率は、再生粗骨材の絶乾質量

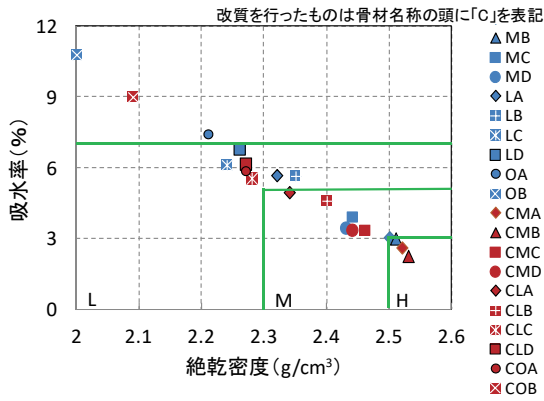


図-4 再生粗骨材の密度・吸水率

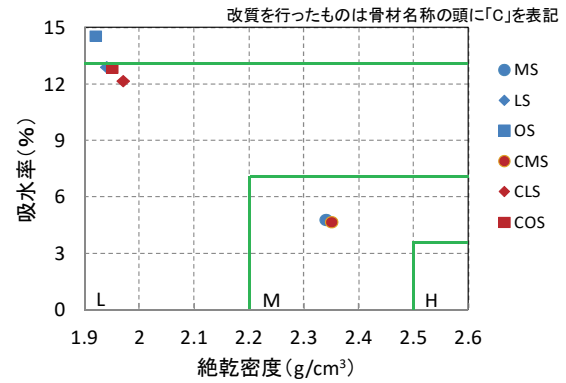


図-6 再生細骨材の密度・吸水率

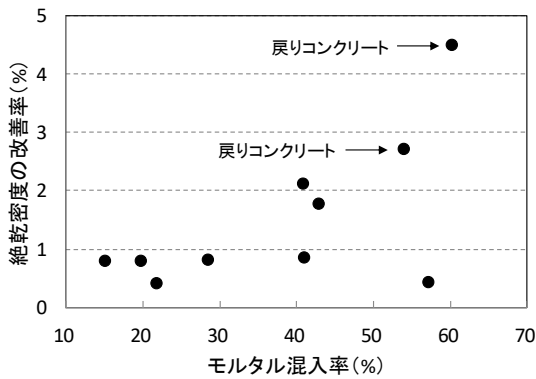


図-5 モルタル混入率と絶対乾密度の改善率との関係

と塩酸洗浄後のモルタルを除去した原骨材の絶対乾質量の差を、再生粗骨材全体の絶対乾質量で除した値とした。さらに、破砕値試験を行った。破砕値試験は、主に骨材の強さを調べる試験として使用されている⁸⁾。既往の研究⁹⁾では、再生粗骨材の破砕値とモルタル混入率は相関関係にあることが報告されている。そこで、筆者らも破砕値とモルタル混入率の関係を確認した。試験方法は、JIS A 5023 (再生骨材コンクリート L) 附属書 C「再生粗骨材 L の吸水率の推定試験方法」に準拠して実施した。ただし、高橋らの報告⁹⁾によると、載荷荷重は同規格で示される 100kN よりも 200kN の方が測定値は明確となっていることから、載荷荷重は 200kN で実施した。破砕値とモルタル混入率の関係を図-3 に示す。破砕値はモルタル混入率の増加に伴って大きくなり、良好な関係がみられた。そこで、MD, LC, OB のモルタル混入率については、次の式(2)から算出し、参考値とした。

$$Mm = 3.53Cv - 6.2 \quad (2)$$

ここに、 Mm : モルタル混入率 (%)

Cv : 破砕値 (%)

原コンクリートの形態はそれぞれ異なり、解体現場から発生したコンクリート塊、生コンクリート工場から発

生した戻りコンクリートを硬化させたもの、また、それらが混合したものに分類される。なお、ここで用いた戻りコンクリートは、再生骨材となるまでにおおよそ 2~4 週間程度を要している。改質前後の再生粗骨材の密度・吸水率を図-4 に示す。強制炭酸化によってほぼすべての再生粗骨材で絶対乾密度および吸水率は改善し、クラスアップしている骨材も確認できた。つぎに、モルタル混入率と絶対乾密度の改善率との関係を図-5 に示す。絶対乾密度の改善率は、モルタル混入率が 57.1% の 1 点を除き、モルタル混入率が大きいものは改善効果も大きい傾向であった。この傾向は、再生骨材の二酸化炭素吸着量の傾向と等しい。また、原コンクリートに戻りコンクリートを使用したものは改善効果大きい。これは、解体現場からのコンクリート塊の供用期間は、長期に経過していることが推測される。したがって、再生骨材とした時点で、既に混入モルタル部分の炭酸化が進行している可能性が考えられる。一方、戻りコンクリートは、再生骨材となるまでに数週間程度しか経過していない。したがって、混入モルタル部分に水酸化カルシウムが多く存在することから、炭酸化し易い状況にあったことが考えられる。すなわち、この差が改善効果に影響を及ぼしていると考えられる。なお、戻りコンクリートは、購入者の品質要求に適合しないものも含まれている可能性がある。しかし、この場合、受入れ検査時のスランプおよび空気量が対象であると考えられ、再生粗骨材の品質にはそれほど大きな影響を与えていないものと考えている。

再生細骨材の密度・吸水率を図-6 に示す。粗骨材と同様に、絶対乾密度および吸水率は改善し、改善効果が得られることがわかった。しかし、再生細骨材の二酸化炭素吸着量の結果から改善効果は大きいことが期待されたが、再生粗骨材と同等もしくはそれ以下であった。

再生骨材の破砕値を図-7 に示す。粗骨材、細骨材ともに強制炭酸化によって破砕値は小さくなった。破砕値は骨材の圧縮荷重に対する抵抗性を示していると考えられ、混入モルタルの品質や原骨材と旧モルタルとの付着強度もしくは遷移帯の品質が改善したものと考えられる。

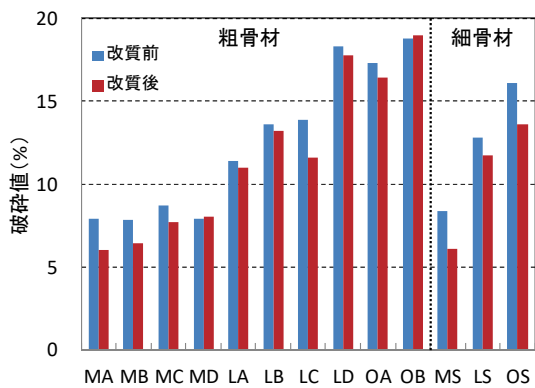


図-7 再生骨材の破砕値

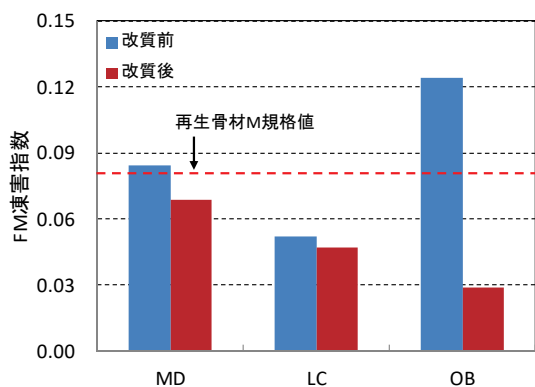


図-8 再生粗骨材のFM凍害指数

つぎに、再生粗骨材の FM 凍害指数を確認した。FM 凍害指数は、再生粗骨材の凍結融解抵抗性を評価するために開発¹⁰⁾されたものである。再生粗骨材の FM 凍害指数を図-8 に示す。すべてのもので FM 凍害指数は改善され、再生粗骨材 M の規格値を満足する結果であった。特に OB の改善率が大きく、これは吸水率の傾向と同様であった。これは、混入モルタル部分の凍結水量が小さくなったことが関係していると考えられる。

以上の結果から、強制炭酸化を行うことで再生骨材の密度、吸水率、破砕値、FM 凍害指数は改善し、改質したと言える。

(4) 原コンクリートの W/C とセメント種類の影響

原コンクリートの W/C およびセメント種類が異なる再生粗骨材の改質効果を確認した。改質方法は強制炭酸化である。再生粗骨材は、W/C およびセメント種類の異なるコンクリートから φ100×200mm の円柱供試体を作製し、そこから簡易な破砕処理によって製造した。

原コンクリートおよび再生粗骨材の特性を表-5 に示す。原コンクリートの W/C は、65、55、45、35%とし、全て同じ方法によって製造した。また、セメントは普通ポルトランドセメント（以下、OPC）と高炉セメント B 種（以下、BB）の 2 種類を用いた。改質前の再生粗骨材の特性として、W/C が低いものほど吸水率は小さくなる

表-5 原コンクリートおよび再生粗骨材の特性

骨材名称	セメント種類	原コンクリート		再生粗骨材	
		W/C (%)	圧縮強度*1 (N/mm ²)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
65N	OPC	65.0	27.5	2.33	4.91
55N		55.0	28.8	2.29	5.03
45N		45.0	47.7	2.36	4.74
35N		35.0	58.0	2.34	4.72
65B	BB	65.0	28.8	2.33	5.14
55B		55.0	31.3	2.29	5.07
35B		35.0	55.0	2.33	5.00

*1 材齢 28 日標準養生

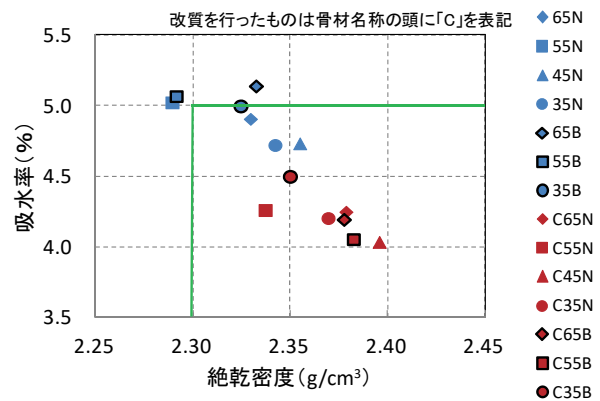


図-9 再生粗骨材の密度・吸水率

傾向にあったが、それほど大きな差は確認されなかった。また、絶乾密度は W/C の違いによる一定の傾向はみられなかった。セメント種類で比較すると、吸水率は OPC を用いたものと比較して BB を用いたものの方が若干大きくなったが、絶乾密度は大きな差はみられなかった。

改質前後の再生粗骨材の密度・吸水率を図-9 に示す。強制炭酸化によってすべての種類で絶乾密度および吸水率は改善した。W/C の異なるもので比較すると、OPC を用いたものは、W/C が小さいものほど改善の効果は小さい傾向にあった。これは、混入モルタルの圧縮強度が高いものほど二酸化炭素の吸着が小さくなることを示している。しかし、BB を用いたものは、その様な傾向はみられなかった。セメント種類で比較すると、吸水率は BB を用いたものの方が改善の傾向は大きく、密度は OPC を用いたものの方が改善の傾向は大きかった。

2.2 改質メカニズム

炭酸化による改質は、混入モルタル中の空隙が減少し、緻密化することに起因していると考えられる。そこで、アルキメデス法による空隙率を次の式(3)より算出した。再生粗骨材の空隙率を図-10 に示す。

$$P(\%) = (m_1 - m_2) / v_1 \cdot 1 / \rho_w \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $P(\%)$: 空隙率、 m_1 : 表乾質量

m_2 : 絶乾質量、 v_1 : 表乾状態の体積、 ρ_w : 水の密度

強制炭酸化および屋外暴露で炭酸化した骨材は、空隙

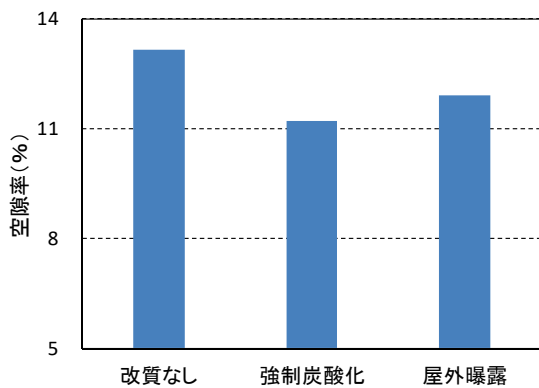


図-10 再生粗骨材の空隙率

率が減少しており、緻密化していることが確認できる。また、別の改質再生骨材において示差熱重量分析 (TG-DTA) を行ったところ、改質なしのものと比較して、炭酸カルシウムの生成量が多いことを確認している。

3. 改質再生骨材がコンクリートに与える影響

3.1 強度

(1) 炭酸化方法による影響

強制炭酸化と屋外曝露による炭酸化方法の違いが、コンクリートの圧縮強度および割裂引張強度に与える影響について確認した。再生骨材は表-3 に示す粗骨材を用いた。セメントおよび再生粗骨材以外は、原コンクリートで使用した材料と同一である。なお、18N シリーズの屋外曝露を行ったものは、曝露期間が26週間行ったものを用いた。セメントはアルカリシリカ反応抑制対策のためBBを用いた。配合はW/C50%, s/a46%, 単位水量は160kg/m³で一定とした。スランプおよび空気量の目標値は10cm および4.5%とした。また、比較として普通粗骨材を用いたコンクリートを同一条件で作製した。フレッシュ性状を表-6 に示す。18N シリーズと24N シリーズは検討の時期が相違するため、比較のため普通コンクリートであるJG配合はそれぞれ行っている。すべての配合でスランプおよび空気量の目標値を満足した。

圧縮強度について、普通コンクリートの圧縮強度に対する比率を図-11 に示す。圧縮強度は、3本の供試体からの平均値で示し、各供試体のばらつきに大きな異変は確認されなかった。強制炭酸化および屋外曝露を行ったものは、改質を行っていないものに対して改善している。これは、再生骨材が改質されたことに起因する。強制炭酸化と屋外曝露を比較すると、18N, 24N のどちらも強制炭酸化の方が強度は大きくなった。また、18N は24N の屋外曝露よりも曝露期間を長くしているにもかかわらず強制炭酸化の結果には及ばなかった。以上の結果から、圧縮強度については、屋外曝露では強制炭酸化と同等の効果は得られないことがわかった。また、この結果は、

表-6 再生骨材コンクリートのフレッシュ性状

配合名	原コン強度*1	改質方法	スランプ (cm)	空気量 (%)
JG	—	—	10.5/8.5*2	4.5/5.2*2
18RG	18N	改質なし	10.5	5.9
18RGC		強制炭酸化	10.0	5.5
18RGO		屋外曝露	8.5	5.5
24RG	24N	改質なし	11.5	5.6
24RGC		強制炭酸化	10.0	5.3
24RGO		屋外曝露	10.0	4.8

*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm²)

*2 18N 実施時/24N 実施時の結果

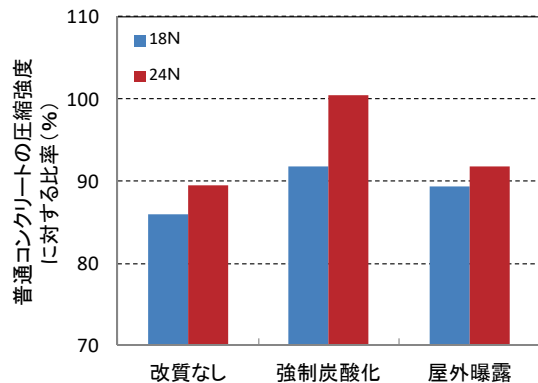


図-11 普通コンクリートの圧縮強度に対する比率

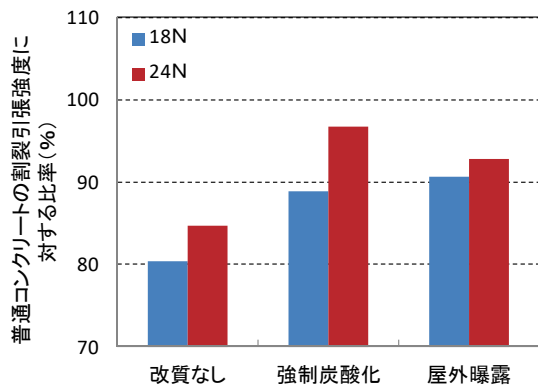


図-12 普通コンクリートの割裂引張強度に対する比率

再生骨材の密度・吸水率の改善傾向と同様であった。

割裂引張強度について、普通コンクリートの割裂引張強度に対する比率を図-12 に示す。割裂引張強度は、3本の供試体からの平均値で示し、各供試体のばらつきに大きな異変は確認されなかった。強制炭酸化および屋外曝露を行ったものは、改質を行っていないものに対して改善した。これは、圧縮強度と同様に再生骨材が改質されたことに起因している。一方、改質を行っていないものは、圧縮強度と比較して低下している。これは、割裂引張強度は混入モルタルの強度の他に、再生骨材中の原骨材と旧モルタルとの付着強度もしくは遷移帯の品質の影響を受けていると考えられる。なお、これらは既往の研究¹¹⁾においても同様の傾向が見られている。強制炭

表-7 再生骨材の組合せ

記号	再生骨材組合せ		
	粗骨材	細骨材	
MA	MA	普通 細骨材	
MB	MB		
MC	MC		
LA	LA		
LB	LB		
LC	LC		
LD	LD		
OA	OA		
LC/LS	LC		LS
OB/OS	OB		OS

表-8 改質前後のスランブおよび空気量

記号	スランブ (cm)		空気量 (%)	
	改質前	改質後	改質前	改質後
MA	10.0	8.5	5.4	3.8
MB	9.5	9.5	4.0	3.9
MC	8.0	10.0	5.6	5.7
LA	8.0	11.5	5.0	5.5
LB	11.5	12.0	5.3	5.7
LC	9.5	9.0	4.5	5.0
LD	12.5	9.0	5.5	3.5
OA	12.0	9.0	5.4	3.5
LC/LS	12.0	10.0	5.5	4.8
OB/OS	10.5	7.0	5.9	6.5

酸化と屋外曝露を比較すると、24Nのものでは強制炭酸化の方が強度は大きくなったものの、18Nのものでは屋外曝露の方が強度は大きくなった。この結果は、再生骨材での密度・吸水率の傾向とは異なる。これは、18Nのものでは曝露期間を延長したことで、再生骨材中の原骨材と旧モルタルとの付着強度もしくは遷移帯の品質が強制炭酸化よりも改善し、それが強度に影響していると考えられる。以上の結果から、割裂引張強度については、曝露期間が10週間の屋外曝露では強制炭酸化と同等の効果は得られないが、曝露期間を延長することで強制炭酸化と同等の結果が得られる場合があることがわかった。

(2) 再生骨材種類の影響

実際に流通している再生骨材を用いて圧縮強度および割裂引張強度を確認した。再生骨材は表-4に示すものを用いた。その他の使用材料について、セメントは(1)と同様の理由でBBを用いた。再生骨材は表-7に示す組合せでコンクリートを製造し、試験を行った。配合は、W/C50%, s/a50%, 単位水量は170kg/m³で一定とした。スランブおよび空気量の目標値は10cmおよび4.5%とした。スランブおよび空気量は表-8に示すとおり所要の性状が得られている。

圧縮強度を図-13に示す。なお、試験値は、3本の供試体からの平均値で示し、各供試体のばらつきに大きな異変は確認されなかった。改質再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度は一部を除いて改善されており、その中でもモルタル混入率が大きいもので特に改善する結果となった。また、原コンクリートに戻りコンクリートを使用したものは改善した。これは、供用期間が長期に経

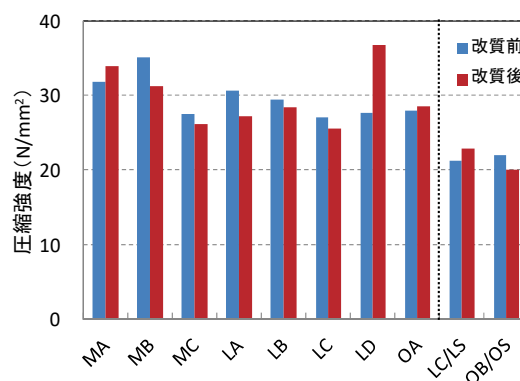


図-13 圧縮強度

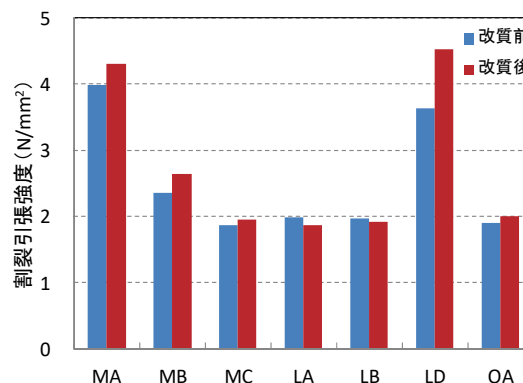


図-14 割裂引張強度

過している解体コンクリートと比較して、コンクリートの製造から時間が経っていない戻りコンクリートの方が改善効果は大きいことを示している。この結果は、骨材の改質傾向と等しい。同一の再生粗骨材を用いたコンクリートで、細骨材に普通細骨材を用いたLCと再生細骨材を用いたLC/LSを比較すると、LCは改善がみられないがLC/LSは改善が確認された。したがって、圧縮強度の改善を求める場合には、細骨材に改質再生細骨材を使うことが有効であると考えられる。

つぎに、割裂引張強度を図-14に示す。試験値は、3本の供試体からの平均値で示し、各供試体のばらつきに大きな異変は確認されなかった。割裂引張強度は、圧縮強度の結果と比較して改質効果が比較的高いと感じられる。これは、(1)の結果と同様に、改質によって原骨材と旧モルタルとの付着強度や遷移帯が改善されたことによるものと推測する。また、圧縮強度と同様に原コンクリートに戻りコンクリートを使用したものは改善した。これは、コンクリートの製造から時間が経っていない戻りコンクリートの方が改善効果は大きいことを示しており、再生骨材の改質や圧縮強度の傾向と同様であった。

(3) 原コンクリートのW/Cとセメント種類の影響

原コンクリートのW/Cおよびセメント種類の異なるコンクリートから得られた再生骨材を用いて圧縮強度お

表-9 改質前後のスランブおよび空気量

記号	スランブ (cm)		空気量 (%)	
	改質前	改質後	改質前	改質後
65N	13.0	7.5	2.8	2.0
55N	10.0	9.5	2.4	1.9
45N	8.0	8.5	2.0	2.0
35N	18.0	20.5	1.6	1.7
65B	6.0	11.0	2.1	2.0
55B	10.0	10.5	2.1	2.4
35B	9.6	17.0	1.1	1.9
NC	15.5		1.4	

よび割裂引張強度を確認した。なお、各試験値は3本の供試体からの平均値で示している。再生粗骨材は表-5に示すものを用いた。セメントはここまでの検討と同様にBBを用いた。配合は、W/C50%, s/a45%, 単位水量は152kg/m³で一定とした。また、比較用として普通骨材を用いたコンクリート (NC) を製造し、比較を行った。スランブおよび空気量の試験結果を表-9に示す。各骨材を用いたコンクリートのスランブはばらついているものの、改質前後のスランブや空気量については大きなばらつきはみられていない。

圧縮強度を図-15に示す。圧縮強度は、改質再生骨材を用いることで全ての種類で改善している。これは、強制炭酸化によって骨材自体が改質されたことに起因している。一方、W/C毎に比較すると、改質前後ともに原コンクリートのW/Cが小さくなるほど、すなわち混入モルタルの圧縮強度が高くなるほど、再生骨材コンクリートの圧縮強度は高くなる傾向であった。しかし、何れの改質再生骨材においても普通骨材を用いたコンクリートと同等の結果を得ることができなかった。再生骨材コンクリートの圧縮強度は、混入モルタルの量と質に関係していることは既往の研究^{12),13)}からも明らかになっている。さらに、再生骨材コンクリートからの新しいモルタル(以下、新モルタル)と再生骨材の原コンクリート中のモルタル(以下、旧モルタル)のどちらのモルタルがコンクリートの強度を支配しているかが重要であると指摘¹¹⁾している。これは、旧モルタルの強度が新モルタルよりも小さい場合は、そのコンクリートの強度は旧モルタルに依存し、旧モルタルの強度が新モルタルよりも大きい場合は、そのコンクリートの強度は新モルタルに依存することを示している。したがって、新モルタル依存の状況にある35N, 45N, 35Bの強度が低下した理由として、ある一定量以上の混入モルタル量が存在したからであると考えられる。また、既往の研究から、新モルタルに依存している場合、旧モルタルを改質しても効果がないことが報告されているが、35N, 45N, 35Bでは改質によって強度の改善効果が表れており、新モルタルに依存している場合でも改善効果が得られている。これは、再生骨材自体の改質効果が表れていれば、新モルタル依存であっても再生骨材コンクリートの圧縮強度は改善すると言える。

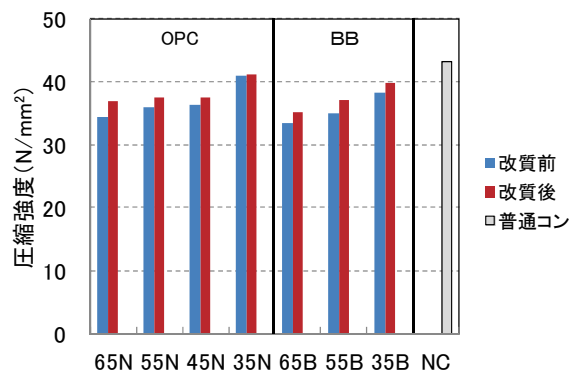


図-15 圧縮強度

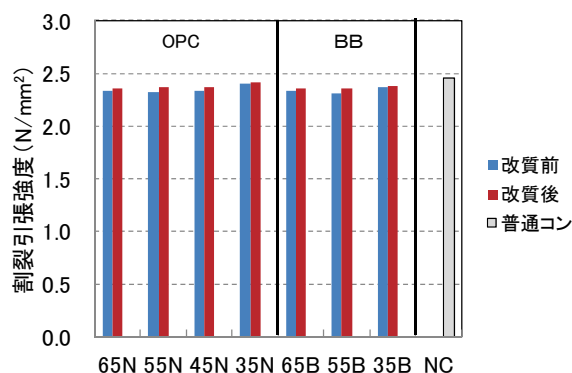


図-16 割裂引張強度

一方で、旧モルタル依存である55N, 65Nや55B, 65Bは、改質後においてもNCとの強度差があり、旧モルタルと新モルタルの品質に大きな差がある場合、その差を埋めることは難しいと言える。ただし、既往の研究¹⁴⁾では低品質再生骨材の利用方法として、普通骨材と混合および置換する方法(以下、骨材置換法)を提案している。骨材置換法は、再生骨材コンクリートの品質を確保する方法として、日本建築学会「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)」においても具体的な適用方法が示されている。したがって、所要の圧縮強度が得られない場合は、骨材置換法を組み合わせることによって圧縮強度を担保することができると考えている。なお、この検討については4章に述べる。

割裂引張強度を図-16に示す。改質再生骨材を用いることで全ての種類で強度は改善した。これまでの結果と同様に強制炭酸化によって骨材自体が改質されたことに起因しているものと考えられる。また、W/C毎に比較すると、それほど大きな差はみられなかった。これは、ここまでの検討からも示されているとおり、割裂引張強度は混入モルタルの強度と比較して原骨材と旧モルタルとの付着強度もしくは遷移帯の影響を受けていると考えられる。

3.2 長さ変化率

再生骨材コンクリートの問題点の一つに、混入モルタルの影響から乾燥収縮が大きいことが懸念されており、

再生骨材コンクリート M・L は、乾燥収縮作用を受けにくい部材等に適用範囲が限定されている。そこで、実際に流通している再生骨材を用いて、その改質再生骨材が長さ変化率に与える影響について確認した。

長さ変化率試験結果を図-17に示す。測定値は、2本または3本の供試体からの平均値で示し、各供試体のばらつきに大きな異変は確認されなかった。なお、測定期間は乾燥期間8週とした。改質再生骨材を用いたコンクリートの長さ変化率は、ほぼすべてのもので改善する結果となった。これは、強制炭酸化による再生骨材の改質によって、再生骨材に混入するモルタル部分が緻密化されたことに起因しているものと考えられる。また、改善されたものの中でも、低品質再生骨材を用いたものは改善が顕著である。これらは、混入モルタル部分の多く含む再生骨材は改善効果が大いことを示している。以上の結果から、改質再生骨材コンクリートを用いることで適用範囲を拡大できる可能性があると考えられる。また、同一の再生粗骨材を用いたコンクリートのもので、細骨材に普通細骨材を用いた LC と再生細骨材を用いた LC/LS を比較すると、どちらも改善はしているものの、改善効果はほぼ同程度であった。以上の結果から、改質再生細骨材による改善効果は、長さ変化率ではあまり効果が期待できないことがわかった。

一方、3.1 (1) における 18N シリーズについても長さ変化率を測定した。測定は乾燥期間 26 週までを行い、測定値は 2 本の供試体からの平均値で示した。長さ変化率試験結果を図-18に示す。ここでも、強制炭酸化を行ったものは改善している。一方、各乾燥期間における長さ変化率は、乾燥初期では強制炭酸化を行ったものの方が大きく、その後は、改質を行っていないものの方が大きくなっている。これは、以下のように考える。混入モルタルを多く含む低品質再生骨材には、再生骨材自身からの水分供給による自己養生効果があることが示唆されている¹⁵⁾。2.2 で示している再生骨材の改質メカニズムは、混入モルタル中の空隙が減少し、緻密化することで、再生骨材自体の吸水率が小さくなる。この場合、コンクリートの練混ぜ時では、再生粗骨材の含水状態を表乾状態としていることから、骨材自体の含水率は小さくなり、その結果、自己養生効果も小さくなる。このような骨材は、一般的には、吸水率が大きい骨材と比較して乾燥収縮も小さくなると考えられる。一方で、自己養生効果の大きいものは、乾燥初期では再生骨材からの水分供給によって収縮が抑えられるものの、乾燥期間の経過に伴って収縮が大きくなると考えられる。したがって、図-17では、乾燥期間8週の長さ変化率を示しているが、炭酸化による改善効果の有無は、この時点でも評価することができる。

3.3 物質移動抵抗性

改質再生骨材コンクリートの物質移動抵抗性を確認

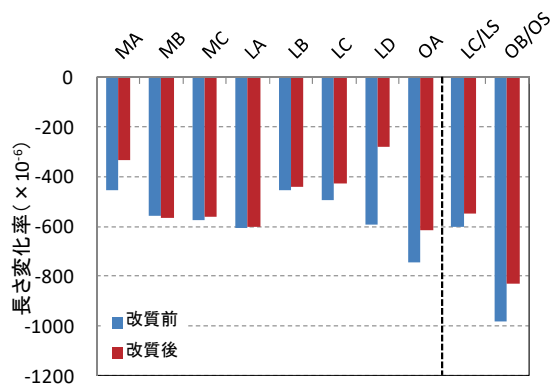


図-17 長さ変化率試験結果 (乾燥期間8週)

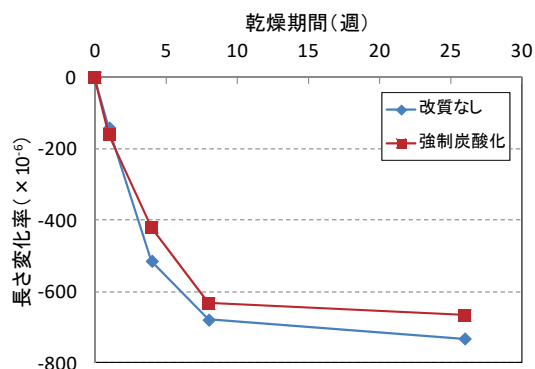


図-18 長さ変化率試験結果



写真-2 透気試験装置

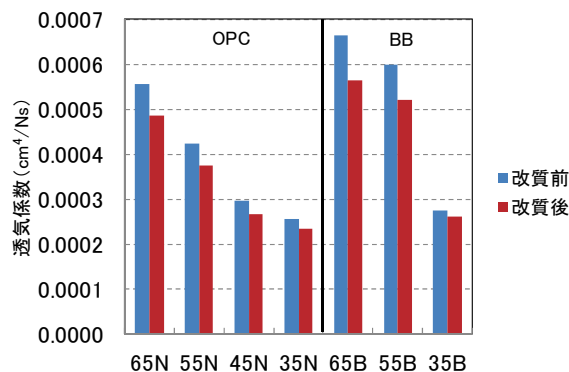


図-19 透気試験結果

するため透気試験を行った。試験体は円柱供試体を5cmに切断したものをを用いた。試験方法は既往の文献¹⁶⁾を参考に、写真-2に示す装置を用いて、一定の圧力を与えることで透過した空気を水上置換法により計測し、得られた透気量から透気係数を算出した。透気試験結果を図-19に示す。なお、試験値は、3本の供試体からの平均値で示し、各試験体のばらつきに大きな異変は確認されなかった。透気係数は、改質再生骨材を用いることで全ての種類で小さくなった。また、圧縮強度と同様にW/Cの大きいもので改善効果は大きくなった。セメント種類で比較すると、BBを用いたもので透気係数は大きくなった。しかし、改善効果は、BBを用いたものの方が大きくなった。透気係数は、物質移動抵抗性に大きく係る。したがって、改質再生骨材コンクリートを用いることで耐久性の向上も期待できることが示唆された。

4. 改質再生骨材を用いた骨材置換率でのコンクリートの特性

4.1 実験概要

改質再生骨材を用いた骨材置換法でのコンクリートの特性を把握することを目的として検討を行った。使用した再生骨材は表-3に示す原コンクリートの強度が24Nのものを用いた。その他の使用した材料は3.1の強制炭酸化と屋外曝露による改質効果の比較を行ったものと同一である。再生骨材コンクリートの配合を表-10に示す。再生粗骨材の置換率は、0、15、30、50、75、100%とした。スランブおよび空気量の目標値は、 $10 \pm 2.5\text{cm}$ および $4.5 \pm 1.5\%$ とした。フレッシュ性状を表-11に示す。全配合ともスランブおよび空気量の目標値を満足した。試験項目は、圧縮強度、割裂引張強度を実施した。なお、測定値は3本の供試体からの平均値で示した。

また、これまで耐久性の中で未確認であった凍結融解抵抗性については、凍結融解作用によるスケーリング試験 (ASTM C 672) において確認を行った。スケーリング試験は、 $22 \times 22 \times 5.5\text{cm}$ の試験体を各1体作製し、材齢14日まで標準養生を行い、その後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の環境下で14日間気中養生を行った。養生後、試験面 (供試体底面) から深さ6mmとなるように水を注ぎ入れ試験を開始し、 -20°C の冷凍庫で17時間凍結させ、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の環境下で7時間融解させる作業を1サイクルとし、それを50サイクル実施した。測定方法は、50サイクルを終了後に試験面より剥離したスケーリング片を採取し、 105°C の乾燥炉で24時間乾燥させ、乾燥重量を試験面面積で除し、単位面積あたりのスケーリング量 (g/cm^2) に換算し評価した。

4.2 骨材置換法でのコンクリートの特性

(1) 強度

再生粗骨材の置換率と圧縮強度の関係を図-20に示

表-10 再生骨材コンクリートの配合

再生粗骨材置換率	再生骨材の改質	単位量 (kg/m^3)					
		C	W	S1/S2	JG	RG	RGC
0%	—	320	160	584/245	988	—	—
15%	なし				840	136	—
	強制炭酸化				—	—	137
30%	なし				692	272	—
	強制炭酸化				—	—	274
50%	なし				496	452	—
	強制炭酸化				—	—	456
75%	なし				247	680	—
	強制炭酸化				—	—	685
100%	なし				—	906	—
	強制炭酸化				—	—	914

※ JG：碎石，RG：改質なし，RGC：強制炭酸化

表-11 再生骨材コンクリートのフレッシュ性状

再生粗骨材置換率	再生骨材の改質	スランブ (cm)	空気量 (%)	CT ($^\circ\text{C}$)
0%	—	8.5	5.2	21
15%	なし	11.0	4.9	21
	強制炭酸化	9.5	4.6	21
30%	なし	10.5	5.0	22
	強制炭酸化	10.0	5.7	21
50%	なし	10.0	5.6	21
	強制炭酸化	10.0	4.9	21
75%	なし	10.0	4.3	20
	強制炭酸化	9.5	4.0	20
100%	なし	11.5	5.6	20
	強制炭酸化	10.0	5.3	20

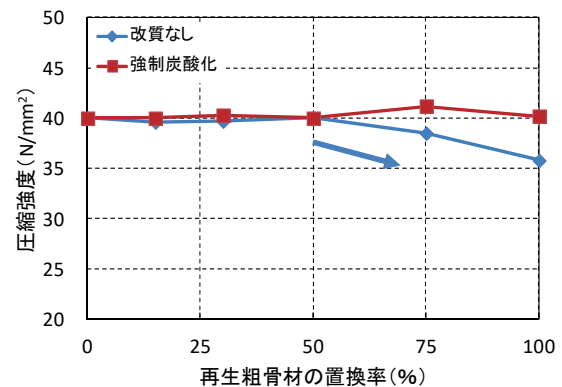


図-20 再生粗骨材の置換率と圧縮強度の関係

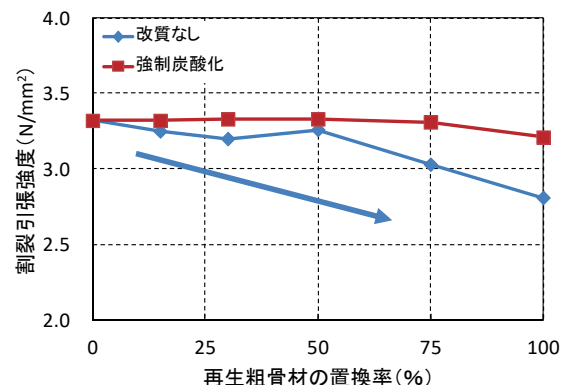


図-21 再生粗骨材の置換率と割裂引張強度の関係

す。改質を行っていないものは、置換率 50%までは圧縮強度の低下は確認されなかった。しかし、置換率 50%を超えると圧縮強度の低下がみられ、置換率 100%では再生粗骨材を用いていないものに対し約 10%低下した。それに対し改質再生骨材を用いたものは、置換率が大きくなっても圧縮強度の低下はみられなかった。

再生粗骨材の置換率と割裂引張強度の関係を図-21に示す。改質を行っていないものは、置換率の増加に伴い強度の低下がみられ、置換率 75%で約 9%低下し、置換率 100%では約 15%低下した。それに対し、改質再生骨材を用いたものは、置換率 75%までは割裂引張強度の大きな低下はみられなかった。

以上の結果から、強度性状において改質再生骨材を用いた骨材置換法でのコンクリートでは、置換率 75%までは普通コンクリートと同等の品質を確保した。

(2) 凍結融解抵抗性

再生粗骨材の置換率とスケーリング量の関係を図-22に示す。いずれもスケーリング量は僅かなものであり、再生粗骨材を用いていないものと同等若しくはそれ以下であった。強制炭酸化を行ったものは、改質を行っていないものに対し、置換率 50%ではスケーリング量はおおよそ半減し、100%では僅かに小さくなる結果であった。したがって、凍結融解作用によるスケーリング劣化にはある程度効果を示しており、凍結融解抵抗性は向上していると考えられる。

5. 改質再生骨材の将来展望

このように、二酸化炭素を利用した改質再生骨材は、コンクリートへ適用できる可能性が示唆された。ただし、屋外曝露ではあまり大きな効果が得られないため、改質の方法として強制炭酸化を行う必要がある。これまでの強制炭酸化は、非常に小規模の装置であったことから、工場の排煙などの利用が望ましいと考えている。

このシステムを実現するための方策を次のように考えている。生コン工場から発生した戻りコンクリートは、一度敷地内にひろげ、ある程度硬化させる。この段階で、コンクリートの種類が高強度品とそれ以外に区分できていくことが望ましい。硬化した原コンクリートを破砕処理し、粒度調整を行う。コンクリートの種類が区分できていけば、高強度品はそのまま原コンクリートに使用し、それ以外のものは、生コン工場に隣接する燃料を燃やしている工場、例えば、セメント工場やバイオマスエネルギー工場などへその再生骨材を運搬する。その工場の排気ダクトに繋がる場所にて骨材の二酸化炭素吸着室を設けて、その中で二酸化炭素吸着を行う。このような環境は高温であるため、本研究の結果と比較して、さらに吸着しやすいと考える。そのように改質した再生骨材を再び生コン工場へ運搬し、コンクリート用骨材と

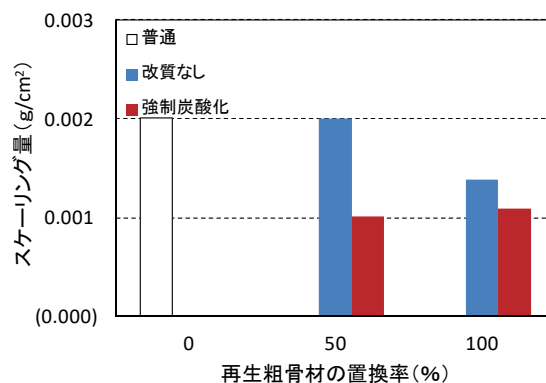


図-22 再生粗骨材の置換率とスケーリング量の関係

して最大で 75%まで置換してコンクリートを製造し、出荷する。

これによって、エネルギー工場における二酸化炭素排出量の削減と低品質再生骨材の改質が可能である。また、改質再生骨材を用いることで、再生骨材コンクリートの弱点である乾燥収縮および凍結融解抵抗性に対する抵抗性が向上し、適用範囲を拡大させることができる。

6. まとめ

- 1) 炭酸化技術によって、再生骨材の改質が可能であることがわかった。改質方法については、屋外曝露よりも強制炭酸化の方が効果的であった。また、モルタル混入率の大きいもの、コンクリート製造から時間が経過していない戻りコンクリートは改善効果が大きいことが確認された。
- 2) 炭酸化による改質は、混入モルタル中の空隙内に炭酸カルシウムが生成されることで空隙が減少し、緻密化することに起因している。
- 3) 改質再生骨材を用いることで、コンクリートの強度、長さ変化率が改善した。その中でも、屋外曝露よりも強制炭酸化の方が効果的であった。また、モルタル混入率の大きいもの、コンクリート製造から時間が経過していない戻りコンクリートの様なものは改善効果が大きいことが確認された。
- 4) 改質再生骨材を用いることで、乾燥収縮や凍結融解に対する抵抗性が向上し、適用範囲を拡大させることができる。
- 5) 改質再生骨材を用いることで、コンクリートの物質移動抵抗性が向上することで耐久性の向上にも期待できる。
- 6) 改質再生骨材と骨材置換法を用いることで、コンクリートの強度が担保できる。
- 7) セメント工場やバイオマスエネルギー工場などの排気ガスを用いて強制炭酸化することで、エネルギー工場における二酸化炭素排出量を削減する

ことができる。

謝辞：本研究の実施にあたり、元芝浦工業大学の伊代田研究室であった亀山敬宏氏、松田美奈氏、柳澤晃大氏、鈴木創太氏、末木博氏、田竈滉貴氏、元芝浦工業大学大学院生のAbdullahi Abdulkareem Abdulkadeer氏のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案），2014
- 2) 依田和久，新谷彰，親本俊憲：実適用後5年が経過した再生骨材コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1549-1554，2017.7
- 3) 松田信広，竹内博幸，高橋祐一：中品質再生骨材を用いたコンクリートの実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1516-1521，2012.7
- 4) 高橋祐一：再生粗骨材における混入モルタルが再生骨材コンクリートの性能に及ぼす影響の評価に関する研究，宇都宮大学大学院博士論文，2011.9
- 5) 竹中寛，笠井哲郎：再生粗骨材の付着モルタルの物性が再生骨材コンクリートの品質に与える影響，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.3，pp.21-29，2008.9
- 6) 長嶋正久，飛内圭之：二酸化炭素の作用と硬化コンクリートの変化，セメント・コンクリート，No.465，pp.27-33，1985.11
- 7) 横関康祐，渡邊賢三，安田和弘，坂田昇：炭酸養生によるコンクリートの高耐久化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.555-560，2002.7
- 8) 建材試験センター：コンクリート骨材試験のみどころ・おさえどころ（改訂版），工文社，2009
- 9) 高橋祐一，黒田満，樹田佳寛，竹内博幸：再生骨材中の混入モルタル量の品質管理方法および評価基準の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1453-1458，2013.7
- 10) 片平博，渡辺博志：再生骨材の耐凍害性評価手法の研究，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.1，pp.25-33，2010.1
- 11) 大信明，宮里心一，原法生，Yodsudjai Wanchai：再生骨材コンクリートの物質透過性および強度の評価とその結果に基づく改善方法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.2，pp.1-12，2001.5
- 12) 入江真吾，神代泰道，一瀬賢一：低品質再生粗骨材の付着モルタルの特性が再生コンクリートに与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1439-1444，2010.7
- 13) 笠井哲郎，内田賢吾，岩野慎平：原コンクリートの配合条件が再生骨材の品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1209-1214，2002.7
- 14) 道正泰弘：低品質再生骨材を置換したコンクリートの諸性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1393-1398，2015.7
- 15) 村上英明，佐川康貴，川端雄一郎，松下博通：再生モルタルの強度および空隙構造に及ぼす再生骨材の水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.397-402，2008.7
- 16) 河野俊一，氏家勲：乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.847-852，1999.7

（原稿受理年月日：2019年1月10日）

Proposal of Low Quality Recycled Aggregate Improved by Carbonation Technology And Influence on the Improved Recycled Aggregate on Concrete By Nobuhiro Matsuda and Takeshi Iyoda

Concrete Research and Technology, Vol.30, 2019

Synopsis: Greater utilization of recycled aggregate concrete (RAC) is desirable to build a sustainable recycling oriented society that reduces carbon dioxide emissions. In this study, low-quality recycled concrete aggregate was improved by carbonation technology and the effect of the use of carbonated RAC as a partial replacement of aggregate on the properties of concrete was investigated. The carbonation of RAC was found to significantly improve the strength, freeze-thaw resistance, and durability of RAC, and also to reduce its shrinkage. This carbonation technology can be used also to reduce CO₂ emissions of energy plants.

Keywords: Recycled aggregate, Recycled aggregate concrete, Carbonation, Replacement of aggregate, Interfacial transition zone