

CO₂ 吸着による再生骨材改質とコンクリートへの適用

伊代田 岳 史*

1. はじめに

構造物の解体時に発生するコンクリート塊は、その大半が舗装用路盤材や埋戻し材として再利用されている。しかしながら、今後は解体コンクリート塊の発生量の増大および路盤材需要の減少により、コンクリート塊の循環が停滞する恐れがある。このため、これらのコンクリート塊をコンクリート用再生骨材として利用することが望まれている。加えて、戻りコンクリートなどの増加も懸念されており、その処理においても再生骨材としての利用が望まれる¹⁾。再生骨材は、骨材の絶乾密度と吸水率を用いて H, M, L の品質に分類されており、再生骨材および再生コンクリートは 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), JIS A 5023 (再生骨材コンクリート L) として制定されている。それぞれ再生骨材は、H 品質の再生骨材は普通骨材と同様、普通コンクリートのすべての部材に適用が可能であり、M 品質では乾燥収縮および凍結融解作用の影響を受けにくい部材への適用が可能である。L 品質では高い強度や耐久性が要求されない部材への使用となっており、使用可能な範囲が限定されている。一方で低品質再生骨材 (L 品質) は、中・高品質再生骨材 (M, H 品質) 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、一般的には骨材自体の品質が劣り、これら低品質再生骨材を使用したコンクリートは、普通コンクリートと比べ強度が低く、乾燥収縮による長さ変化が大きいことが問題点として挙げられる。さらに、再生コンクリートの強度や耐久性は、再生粗骨材よりも再生細骨材の影響を顕著に受けて低下するという報告も多い²⁾。

さらに、日本国内においては再生骨材を製造できる工場は多くない。特に品質の高い再生骨材を製造するための設備を所有している工場は少なく、そのため再生コンクリートの普及を考えた場合、特殊な設備を必要としない低品質再生骨材の改質技術が求められる。そこで、ここではこの再生骨材の改質方法として、CO₂ ガスを用いた強制炭酸化による低エネルギー・低コスト型の再生骨材製造方法について検討を加えた内容を報告する。この技術は、コンクリートの炭酸化メカニズムに着目したも

のであり、再生骨材に CO₂ ガスを吹き付けることで骨材に付着または混入しているモルタルやセメントペーストを炭酸化させ、再生骨材自体を改質するもの^{3),4)}である。

2. 低品質再生骨材を用いたコンクリートの改質に向けた方策

2.1 再生コンクリートの改質方法の検討

再生骨材を用いたコンクリートの問題は、再生骨材中に存在する空隙と骨材周囲に生成する遷移帯に大きく依存すると考えられる。そこで、図-1 のようにコンクリートとしたときに脆弱となる可能性を次の3つに分離して検討をすることとした。

- ①骨材自体の空隙：再生骨材中の付着モルタルの空隙
- ②骨材界面に形成される空隙：再生骨材と新セメントペーストとの界面
- ③新規モルタル中の空隙：再生コンクリートとして作製したモルタル中の空隙

これらの空隙は、それぞれ生成メカニズムが異なり、再生コンクリートの強度や物質移動抵抗性に大きく影響しているものと考えられる。特に、①再生骨材中の空隙が付着モルタル内に存在することを考えると、付着モルタル中の空隙を緻密化させる方法が有効ではないかと考えた。

2.2 再生骨材中の付着モルタルの改質技術の検討

鉄筋コンクリートの中性化は、コンクリート内に炭酸ガスなどが浸透し、アルカリが徐々に低下することで鉄筋腐食が生じる現象である。このプロセスにおいて、炭酸ガスがセメント水和物の強アルカリである水酸化カルシウムと結合することで炭酸カルシウムを生成し、アルカリが低下することが知られている。しかし、コンクリートにおいては水和物よりも体積の大きい炭酸カルシウムの生成により、空隙を充填し緻密化することが報告⁵⁾されている。この傾向は、普通ポルトランドセメントを用

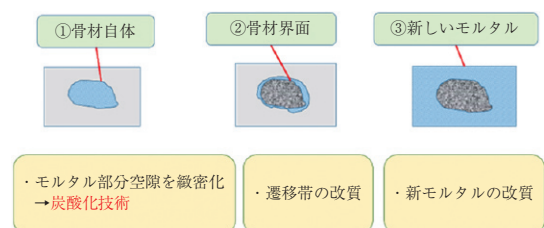


図-1 再生コンクリート中の脆弱となりうる箇所

* いよだ・たけし／芝浦工業大学工学部先進国際課程 教授 (正会員)

いたコンクリートにおいては顕著である。このメカニズムを利用することで、再生骨材に付着したモルタル中の空隙を緻密化させられないかと考えた。そこで、各種再生骨材に強制炭酸化（温度 20℃、相対湿度 60%RH、二酸化炭素濃度 5%）を 1 週間施し、骨材品質の変化を検討した。検討には、表-1 に示すように、様々な種類の再生骨材を用いた。骨材種類として粗骨材および細骨材を用い、再生骨材の品質は M、L および規格外のものを数種類用いた。さらに、原コンクリートには、コンクリート解体ガラと戻りコンクリートを硬化させたものなどを用いている。またそれぞれ粗骨材および細骨材の強制炭酸化前後での物性値をまとめた。また図-2 および図-3 に再生粗骨材および再生細骨材の強制炭酸化前後での絶対乾密度と吸水率の関係を示した。これよりいずれの骨材においてもその大小は存在するものの、改質後の絶対乾密度が増加し吸水率が低下していることがわかる。骨材の中には、再生骨材グレードが向上するものも存在した。ま

た、その傾向は粗骨材と細骨材の差異は大きくないが、原コンクリートに戻りコンクリートを用いたものの方が、改質効果が高いことが確認できた。また、図-4 はそれぞ

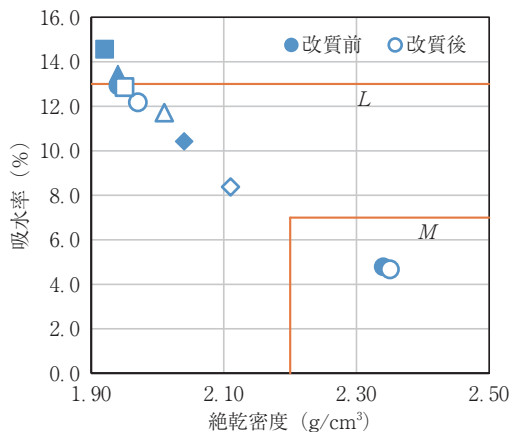


図-3 再生細骨材の改質効果

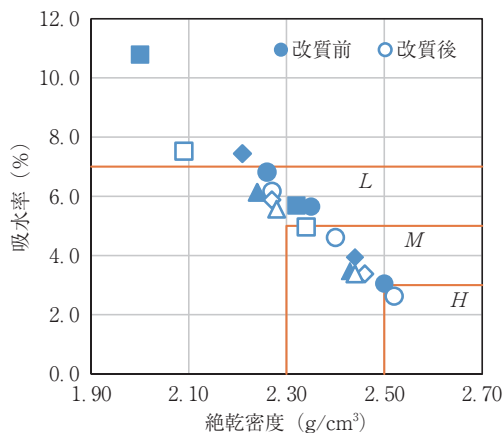


図-2 再生粗骨材の改質効果

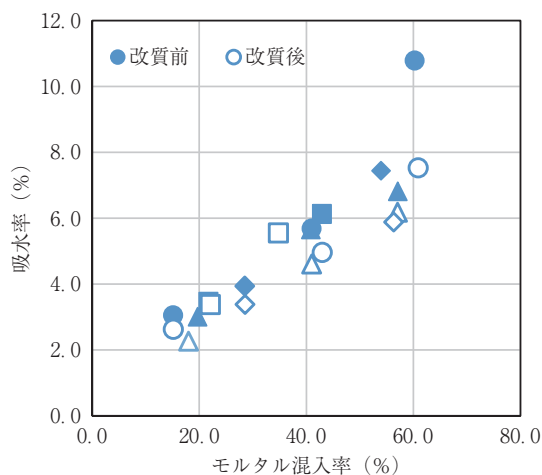


図-4 再生粗骨材のモルタル混入率と吸水率の関係

表-1 使用した再生骨材の種類と炭酸化前後での物性の比較

原コンクリート	class	改質前骨材					表乾密度 (g/cm³)
		記号	絶対乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	破砕値 (%)	モルタル混入率 (%)	
粗骨材	砕石	N			-	-	2.71
		M	MA	2.50	3.06	7.9	15.10
	MB		2.51	3.01	7.8	19.69	2.58
	MC		2.44	3.94	8.7	28.51	2.54
	MD		2.43	3.47	7.9	21.7	2.52
	L	LA	2.32	5.69	11.4	40.95	2.45
		LB	2.35	5.66	13.6	40.82	2.49
		LC	2.24	6.13	13.9	42.9	2.38
		LD	2.26	6.82	18.3	57.05	2.42
	規格外	OA	2.21	7.44	17.3	53.94	2.37
		OB	2.00	10.79	18.8	60.2	2.22
	細骨材	砕砂	NS			-	-
M		MS	2.34	4.80	8.4	-	2.46
		L	LS1	1.94	12.92	12.8	-
LS2			2.04	10.42	-	-	2.25
規格外		OS1	1.92	14.57	16.1	-	2.20
		OS2	1.94	13.44	-	-	2.21
→							
改質後骨材 (炭酸化処理)							
記号	絶対乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	破砕値 (%)	モルタル混入率 (%)	表乾密度 (g/cm³)		
CMA	2.52	2.63	6.0	15.13	2.59		
CMB	2.53	2.27	6.4	18.02	2.59		
CMC	2.46	3.38	7.7	28.53	2.54		
CMD	2.44	3.38	8.0	22.0	2.52		
CLA	2.3	4.97	11.0	42.94	2.46		
CLB	2.4	4.61	13.2	40.97	2.51		
CLC	2.28	5.56	11.6	34.7	2.40		
CLD	2.27	6.18	17.8	57.00	2.41		
COA	2.3	5.88	16.4	56.31	2.41		
COB	2.09	7.53	19.0	60.9	2.25		
CMS	2.35	4.68	6.1	-	2.46		
CLS1	1.97	12.18	11.7	-	2.21		
CLS2	2.11	8.37	-	-	2.28		
COS1	1.95	12.87	13.6	-	2.20		
COS2	2.01	11.71	-	-	2.24		

*一部、戻りコンクリートを含む

*ハッチングは破砕値からの推定値⁶⁾

れの骨材に付着していたモルタル混入率と改質前後の吸水率を示したものであるが、再生骨材では当然ながら、モルタル混入率が大きいほど吸水率が高いが、混入率が高いほど改質後の吸水率が小さくなっていることがわかり、炭酸化により緻密化が起きていることが想定できる。

そこで、改質前後の骨材の空隙量を比較したところ、図-5に示すように改質後には空隙が減少していた。さらに改質後の空隙内を観察すると、図-6のように炭酸カルシウムが析出していることがわかることから、図-7のように炭酸化による空隙改質が生じていると推測できる。

2.3 再生骨材と新モルタルとの界面の改質

再生骨材と新モルタルとの界面も欠陥の一つとなると想像される。ここで、再生骨材の強制炭酸化を行うことで、上述したように炭酸カルシウムが骨材の空隙内および表面に生成し、新たなモルタルの反応改善や界面改善が行われることも想像できる。

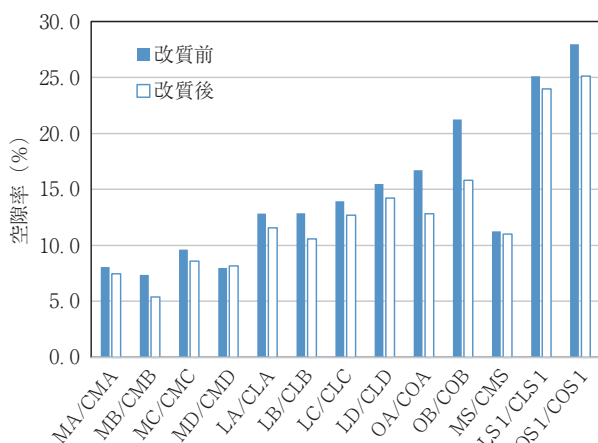


図-5 炭酸化前後の空隙率の比較

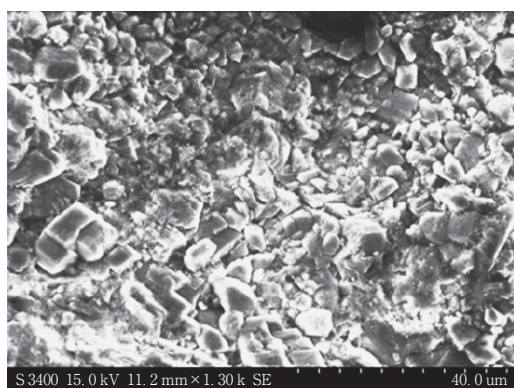


図-6 炭酸化による析出物

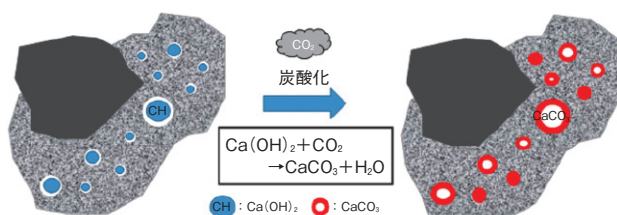


図-7 炭酸化による空隙充填メカニズム

3. 改質再生粗骨材を用いた再生コンクリートの性質

3.1 使用材料と配合

改質前後の再生骨材を用いてコンクリートを製造し、圧縮強度、長さ変化試験を実施した。コンクリートの配合は、ASRの懸念および環境負荷低減を目的とすることから、高炉セメントB種を用いたW/C 50%としs/a 50%、単位水量 170 kg/m³で一定とした。圧縮強度および割裂引張強度に関しては、再生粗骨材および改質再生粗骨材を用いてコンクリートを作製した。なお粗骨材の改質効果を明確にするために、細骨材は砕砂を用いた。JIS A 1108 圧縮強度および JIS A 1113 割裂引張強度試験を実施し、試験体はφ100×200 mmの円柱試験体であり、標準養生28日後に3本の試験を実施し、その平均値により強度を算出した。また長さ変化については圧縮強度試験で効果が認められたLおよび規格外(O)の骨材を用いてコンクリートを作製し、コンクリートの乾燥収縮試験をJIS A 1129-3に準拠して実施した。打込み後1日で脱枠し、水中養生7日後から温度20℃、湿度60%RHの環境にて静置し、乾燥開始から1, 2, 4, 8, 13週での長さ変化を計測した。また表-2にはフレッシュコンクリートのスランプ・空気量と圧縮強度の測定結果も併記したが、フレッシュ性状においては特に大きな問題は顕在化しなかった。

3.2 圧縮試験と割裂引張試験結果

図-8、図-9に圧縮・割裂引張強度の結果を示す。改質した骨材を用いたコンクリートの強度特性は、大幅に改善は示さないものの、改質前の再生骨材コンクリートと比べて同程度かやや強度が増加していることがわかる。特にL骨材および規格外(O)の骨材を用いたコンクリートにおいては改質効果が著しくみられた。また、割裂引張強度では圧縮強度と比較して、改質効果が比較的得られやすく、これはおそらく2.3の骨材界面の脆弱部が少なくなったことによるものと推測できる。

表-2 作製したコンクリートの種類とフレッシュ性状

記号	CO ₂ 吸着	粗骨材	細骨材	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
NN	-	N	NS	11.0	5.9	28.9
LAN	なし	LA	NS	8.0	5.0	30.6
LBN		LB	NS	11.5	5.3	29.4
LCN		LC	NS	9.5	4.5	27.1
LCL		LC	LS	12.0	5.5	21.3
OAN		OA	NS	12.0	5.4	27.9
OBO		OB	OS	10.5	5.9	22.0
CLAN		CLA	NS	11.5	5.5	27.2
CLBN		CLB	NS	12.0	5.7	28.4
CLCN	あり	CLC	NS	9.0	5.0	25.6
CLCCL		CLC	CLS	10.0	4.8	22.9
COAN		COA	NS	9.0	3.5	28.5
COBCO		COB	COS	7.0	6.5	20.1

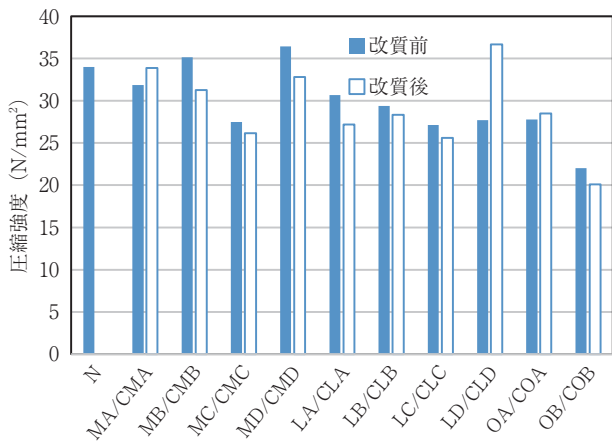


図-8 圧縮強度の比較

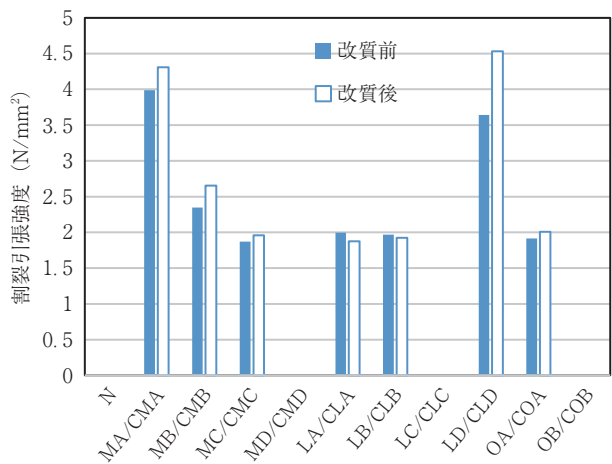


図-9 割裂引張強度の比較

3.3 長さ変化試験結果

図-10は乾燥材齢8週(56日)における長さ変化試験の結果である。長さ変化率は、骨材改質後ではおおむね同等か小さくなる結果が得られ、普通骨材を使用したコンクリートに比べ小さくなるものも確認された。これらは、炭酸化によって再生骨材の吸水率が改質したことが原因と考える。特に改質効果が大きく認められたのは、規格外(O)を改質したCOAおよびCOBのコンクリートであった。これらの再生骨材は戻りコンクリートを用いていることから、供用期間が長期に渡っている解体コンクリートよりも、製造から時間が経っていない若材齢コンクリートの方が、改質効果が期待できると考えられる。

3.4 再ASRへの対策の可能性⁷⁾

上述のように、炭酸化技術による骨材の改質を利用すれば、ASRを生じた原骨材から製造した再生骨材の再ASR抑制につながるかの検討も行った。検討結果より、再ASRの抑制効果が認められた。これは図-11に示すように再生骨材の炭酸化技術を用いることで付着モルタルのアルカリ性を低下させることが可能となり、また付着モルタルの緻密化につながることから、アルカリの浸透を抑制するとともに原骨材からのシリカの溶出を抑制できることが原因であると考えられる。

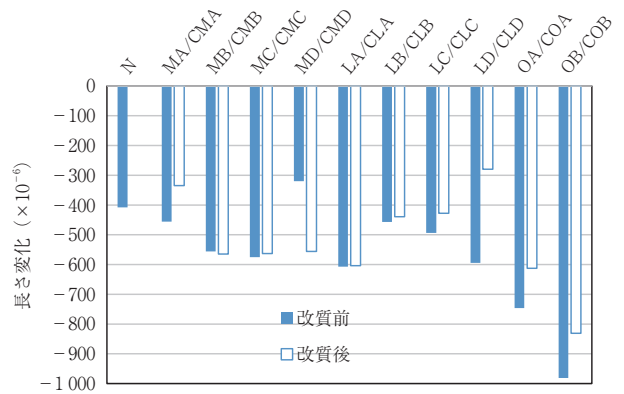


図-10 乾燥収縮量の比較

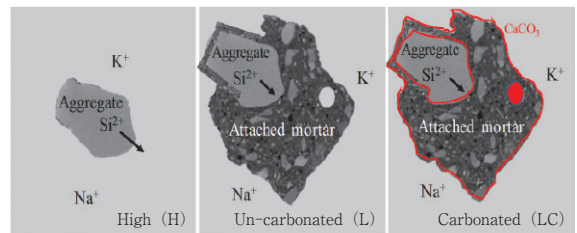


図-11 再ASR抑制のメカニズム

4. 改質再生細骨材を用いた再生モルタルの性能⁸⁾

4.1 使用材料と配合

細骨材での強制炭酸化の効果を評価するために、表-1のLS2およびOS2を用いたモルタルによる強度ならびに長さ変化を計測した。モルタル強さ試験はJIS R 5201に、長さ変化試験はJIS A 1129-3に準拠して実施した。加えて、物質移動抵抗性を評価するために、加圧透気試験を実施した。φ100×200 mmの円柱供試体を28日間水中養生した後、高さ25 mmのサイズで切断し、両端以外の供試体を用いて実施した。供試体は質量が恒量となるまで40℃の炉で乾燥させた。その後0.1 MPaの圧力で空気を透過させ、透気量を水上置換法によりメスシリンダーを用いて計測し透気係数を算出した。

4.2 モルタル強さ試験結果

図-12にモルタルの圧縮強さの経時変化を図-13に曲げ強さの経時変化を示す。改質再生細骨材を用いた方が、圧縮・曲げともに大きくなっていることがわかる。また曲げ強さの発現は圧縮強さの発現よりも炭酸化の効果が認められた。

4.3 長さ変化試験

図-14に長さ変化試験の結果を示す。いずれの細骨材においても長さ変化は炭酸化により抑制されており、その効果は規格外(OS2)の方が大きいことがわかる。また物質移動抵抗性を検討した透気試験結果においても図-15のように、大きく透気係数が改善しており、物質移動抵抗性は向上することがわかる。

このことから、炭酸化による改質効果はコンクリートよりもモルタルの方が顕著であり、従来から指摘されて

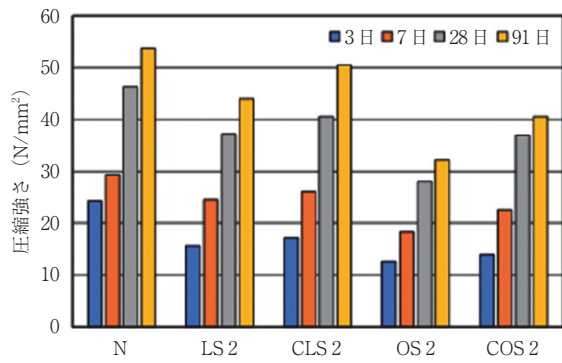


図-12 モルタルの圧縮強さの経時変化

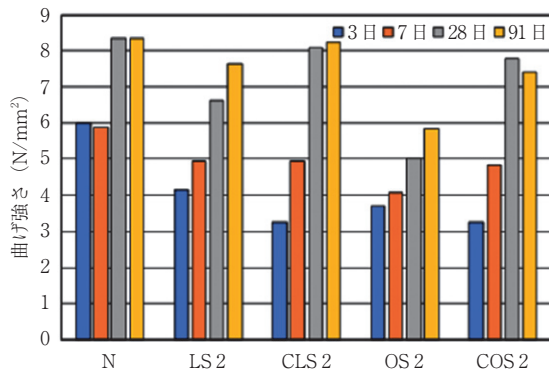


図-13 モルタルの曲げ強さの経時変化

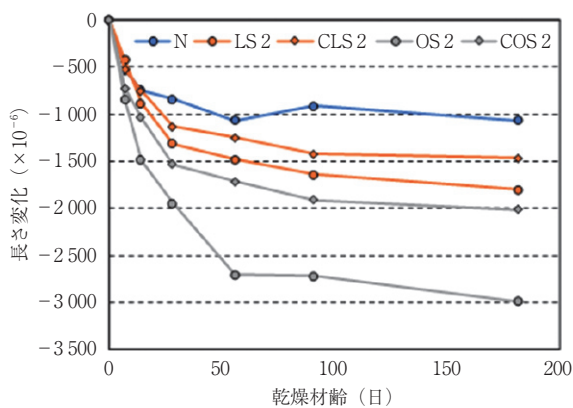


図-14 モルタルの長さ変化結果

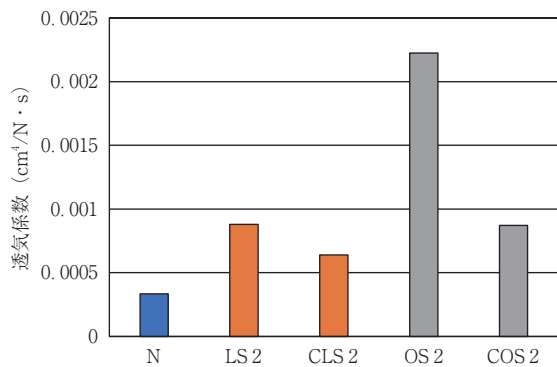


図-15 モルタルの透気試験結果

いる粗骨材と比較して細骨材の影響が大きいとされる再生コンクリートの品質低下に対しては、炭酸化により解消できる可能性が得られた。

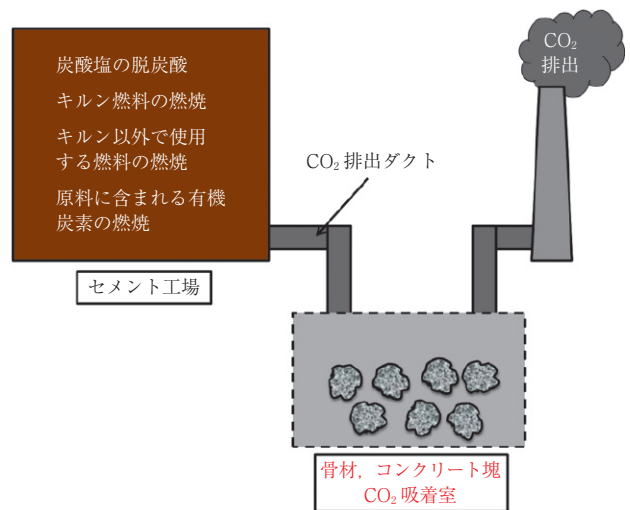


図-16 再生骨材提供システムの提案

5. 炭酸化技術による骨材改質の将来展望

このように炭酸化により低品質再生骨材を改質し、コンクリートへ適用できる可能性が示唆できた。このシステムを実現するための方策を図-16のように考えている。レディーミクストコンクリート工場から出荷され戻ってきた戻りコンクリートや残コンクリートをヤードに広げてある程度固化させる。その後、一時破碎して骨材粒度に整える。その後、このレディーミクストコンクリート工場に近接する、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、製造した低品質再生骨材を運搬する。エネルギー排出工場の排気ダクトへつながる場所にて、骨材のCO₂吸着室を設けその中でCO₂吸着を実施する。高温であるため、吸着しやすいと考える。改質した骨材を、再びレディーミクストコンクリート工場へ運搬してコンクリート用骨材に置換してコンクリートを製造して出荷する。このようにすることで、エネルギー排出工場におけるCO₂削減も実現可能であると考え。今後は、普通の骨材を使用したコンクリートの性能よりも低下させない再生骨材置換率を決定するなど必要であると考え。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 強制炭酸化を用いることで再生粗骨材および再生細骨材は、絶乾密度は増加し、吸水率は小さくなったことから、骨材品質を改善できるといえる。
- 2) 改質した粗骨材を用いることで、コンクリートの強度は若干の改善、乾燥収縮はおおむね改善できることが確認できた。
- 3) 骨材の改質効果は、モルタル混入率の高いもので大きくなったことから、混入モルタル部分の緻密化が生じていると考える。また、若材齢のコンクリートから製造した低品質再生骨材ほど高いこと

から、戻りコンクリートのリサイクルの糸口となり得る。

- 4) ASR 反応性を持つ骨材は、再生骨材として使用しても膨張挙動を示した。L 品質と H 品質では大きな差は見られなかった。一方、再生骨材の炭酸化により ASR を大幅に抑制できる。
- 5) 粗骨材と比較して細骨材を炭酸化改質することで、付着モルタルの改質効果が高いと想像できる。これは、骨材の比表面積に依存していると考えられるが、今後検証を続ける。
- 6) セメント工場などの排ガスを用いて強制炭酸化することで工場からの排出 CO₂ の削減とともに、若材齢コンクリートである戻りコンクリートを低コスト・低エネルギーにて低品質な再生骨材とし、炭酸化技術で簡易に改質することで環境負荷低減型のコンクリートの製造につながることを示唆できた。

謝 辞 本研究は、2012 年度から(株)東京テクノとの共同研究にて行ったものであり、現在も継続中である。実験に際しては、東京テクノの松田信広氏および多くの芝

浦工業大学土木工学科マテリアルデザイン研究室の卒業生の協力を得ました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：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、コンクリートライブラリー第 134 号, 2012
- 2) 小川秀夫・名和豊春・山本正義：磨砕処理した再生細骨材の品質がモルタルの諸特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.503~517, 2007
- 3) 松田信広・亀山敬宏・松田美奈・伊代田岳史：CO₂ ガスの強制吸着による低エネルギー型再生骨材製造方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1732~1737, 2014
- 4) 松田信広・伊代田岳史：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, コンクリート工学論文集, 第 30 巻, pp.65~76, 2019
- 5) 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
- 6) 高橋祐一・黒田 満・榊田佳寛・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) 松田信広・Abdullahi Abdulkareem Abdulkadeer・伊代田岳史：反応性を有する再生粗骨材を用いたコンクリートの ASR 特性と改質再生骨材による抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1493~1498, 2019
- 8) 湯屋 蓮・松田信広・杉山知巳・伊代田岳史：低品質再生骨材を用いたモルタルの強度や耐久性向上方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.965~970, 2021