

論文 低品質再生細骨材を用いたモルタルの強度や耐久性向上方法の検討

湯屋 蓮*1・松田 信広*2・杉山 知巳*3・伊代田 岳史*4

要旨：再生コンクリートの普及に向けて、エネルギーやコストを抑えて製造することができる低品質再生骨材の利用促進が望まれている。再生コンクリートは再生粗骨材よりも再生細骨材の影響を顕著に受けて強度や耐久性が低下する。本研究では再生細骨材を用いたモルタルの改質方法として骨材の強制炭酸化および C-S-H 系硬化促進剤の添加を行い、強度や耐久性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、C-S-H 系硬化促進剤の添加ではセメントペースト部が改質、骨材の強制炭酸化では、骨材自体が改質されと考えられ、それによってモルタルの曲げ強さ、圧縮強さ、乾燥収縮による長さ変化、透気係数への改善効果が異なることが分かった。

キーワード：再生細骨材、強制炭酸化、C-S-H 系硬化促進剤、プレウェットティング

1. はじめに

構造物を解体した際に発生する解体コンクリート塊は、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。しかし今後は、解体コンクリート塊の発生量増大と路盤材需要の低下により、解体コンクリート塊の発生量が路盤材需要を上回ると予想される。このことから解体コンクリート塊をコンクリート用再生骨材として再利用していくことが求められる。再生骨材は、骨材の絶対密度、吸水率により品質ごとに H,M,L の 3 種類に分類されており、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 M を用いたコンクリート)、JIS A 5023 (再生骨材 L を用いたコンクリート) として制定されている。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¹⁾。

再生コンクリートの普及を見据えた場合、特殊な製造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

れると考えられる。筆者らのグループはこれまで、再生コンクリートの改質方法として低品質再生粗骨材の改質を目的とした、CO₂ ガスを用いた強制炭酸化による低エネルギー・低コスト型の再生粗骨材製造方法²⁾を提案している。この技術は、コンクリートの炭酸化メカニズムに着目し、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部分 (以下、混入モルタル) を炭酸化させ、再生粗骨材自体の改質をはかるものである。本検討では、この技術により再生細骨材を改質させることができないかと考え、再生細骨材に対する強制炭酸化を行った。

また、普通コンクリートにおいて C-S-H 系硬化促進剤を添加することで粗骨材周囲の空隙が緻密化されコンクリートの圧縮強度や物質移動抵抗性が改質されること³⁾を報告している。

本検討では、再生コンクリートの普及に向けて、低品質再生細骨材に対する強制炭酸化による改質方法と、C-S-H 系硬化促進剤の添加による改質方法をモルタルで実施し検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した細骨材の物理的性状を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は低品質な再生細骨材である L および L の規格を外れたもの (以下、L 外) を使用し、比較のため普通細骨材も使用した。また再生細骨材については、強制炭酸化させたものも使用した。

*1 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (学生会員)

*2 (株) 東京テクノ 工場長 (正会員)

*3 ポゾリスソリューションズ (株) セールス&マーケティング 技術開発センター AS 技術開発 (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部先進国際課程 (兼務 土木工学科) 教授 博士 (工学) (正会員)

2.2 改質方法

(1) 骨材の強制炭酸化

コンクリートの炭酸化は、大気中の CO_2 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などと反応し、炭酸カルシウムに変化する現象であることが知られている。この現象は、コンクリート中の細孔溶液の 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^{4,5)}。そこで、再生骨材の混入モルタル部分を炭酸化させることによって緻密化させることができれば、再生骨材自体を改質することができ、コンクリートやモルタルとしたときに強度や耐久性を向上することができると考えられる。

本研究の強制炭酸化による改質は、促進中性化装置(温度 20℃、相対湿度 60%、 CO_2 濃度 5% の環境下) で 1 週間実施した。このとき、1 日 1 回試料をかき混ぜ、骨材全体に CO_2 が行き渡るようにした。本研究で使用した再生細骨材の絶対乾密度・吸水率の改善効果を図-1 に示す。L, L 外ともに強制炭酸化を行うことで密度・吸水率が改善し、L 外については L の規格値内に入っている。また、強制炭酸化させてない骨材の物性値を基準とした改善率でみると、絶対乾密度の改善率は L で 3.39%, L 外で 3.40% と同程度であるが、吸水率の改善率は L で 19.6%, L 外で 12.9% と L 外よりも L の方が高い結果となった。

(2) C-S-H 系硬化促進剤の添加

C-S-H 系硬化促進剤は、カルシウムシリケート系水和物(以下、C-S-H) のナノ粒子を主成分とした混和剤であり、C-S-H の種結晶を液相中に導入することによって、セメントからの C-S-H の生成を待つことなく硬化を促進させるメカニズムを有している。一般的に混和剤はコンクリート、モルタルの容積に含まれないものであり、練り混ぜ水に溶解して用いられる。通常の硬化促進剤においても、その添加方法はセメント質量に対して添加する。これは従来の硬化促進剤がセメントに対して作用するためと考えられる。しかし、C-S-H 系硬化促進剤は水和生成物である C-S-H の生成核が混和されているため、その混入量が重要となると考えられる。そこで、C-S-H 系硬化促進剤の添加方法についてはセメント質量に対して添加するよりも単位水量に対する濃度が重要だと考えられており⁹⁾、本研究でも単位水量に対して添加した。

2.3 モルタルの配合

表-2 にモルタルの配合を示す。配合は、水セメント比: 50%, セメント: 細骨材の質量比を 1:3 で一定とし、C-

表-1 細骨材の物性値

細骨材種類	改質	表乾密度 (g/cm ³)	絶対乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
N	-	2.60	2.55	1.92
L	-	2.25	2.04	10.42
	炭酸化	2.28	2.11	8.37
L外	-	2.21	1.94	13.44
	炭酸化	2.24	2.01	11.71

*1: L の規格を外れたもの

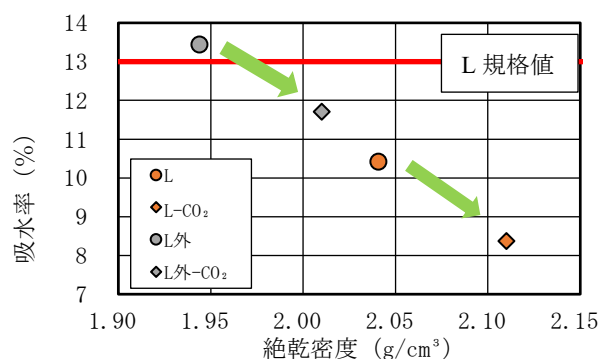


図-1 再生細骨材の絶対乾密度・吸水率

表-2 モルタルの配合

配合名	細骨材種類	W (kg/m³)	W/C (%)	S/C	ACX添加率 (W×%)
N-0	N	254	50	3	0
N-3					3
N-5					5
N-7					7
N-10					10
L-0	L	233			0
L-3					3
L-5					5
L-7					7
L-10					10
L-CO ₂		-			
L外-0	L外	230			0
L外-3					3
L外-5					5
L外-7					7
L外-10					10
L外-CO ₂					-

S-H 系硬化促進剤(表中では ACX と表記)を単位水量に対して添加率を細かく設定(0, 3, 5, 7, 10%)し、添加した配合と、骨材を強制炭酸化させた配合(CO_2)とした。

なお配合名は、C-S-H 硬化促進剤を添加した配合については、細骨材種類-添加率、骨材を強制炭酸化させた配合については、細骨材種類- CO_2 で表している。

2.4 供試体の作製方法

細骨材はすべて表乾状態で使用した。再生細骨材(L, L外)は練り混ぜ前に 24 時間プレウェッティングを行い、使用した。モルタルの練り混ぜは、容量 5L のモルタルミキサーを使用し、40×40×160mm のモルタルバー、およびφ100×200mm の円柱供試体を作製した。打込み翌

日に脱型を行った後、温度 20℃にて水中養生を行った。

2.5 試験項目及び試験方法

(1) 曲げ・圧縮強さ試験

供試体は 40×40×160mm のモルタルバーを用いて、JIS R 5201 に準拠し、水中養生 3, 7, 28, 91 日において行った。

(2) 透気試験

φ100×200mm の円柱供試体を 28 日間水中養生した後、高さ 25mm のサイズでカットし、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 0.1MPa の圧力で空気を透過させ、その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、以下の式(1)より透気係数を算出した。

$$K = \frac{2LP_1}{(P_1^2 - P_2^2)} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで

K : 透気係数 (cm⁴/N・s), L : 供試体厚さ (cm)

P₁ : 载荷圧力 (N/cm²), P₂ : 流出側圧力 (0.1N/cm²)

Q : 透気量 (cm³/s), A : 透気面積 (cm²)

(3) 乾燥収縮試験

供試体は 40×40×160mm のモルタルバーを用いて、28 日間水中養生を行った後、JIS A 1129-3 に準拠し、養生終了時、養生終了から 1, 2, 4, 8 週で測定を行った。

(4) 空隙率試験

圧縮強さ試験後の供試体から 40×40×30mm 程度の破片を採取し、水で満たしたビーカーに試験体を入れ、真空状態で飽水させて飽水質量と水中質量を計測した。その後、40℃の乾燥炉に質量減少が恒量となるまで静置し、絶対乾燥状態の質量を計測した。それぞれの測定値を使用して、式(2)を用いてアルキメデス法により空隙率を算出した。

$$\text{空隙率 (\%)} = \frac{\text{飽水質量} - \text{絶乾質量}}{\text{飽水質量} - \text{水中質量}} \times 100 \quad (2)$$

3. 試験結果及び考察

3.1 曲げ・圧縮強さ

図-2 に、材齢 3, 7, 28, 91 日の曲げ強さを、図-3 に材齢 3, 7, 28, 91 日の圧縮強さを示す。なお、図-2 の材齢 7 日および 91 日において、曲げ強さの試験値が確認できない配合があるが、これらは 0.05N/mm²程度の強度低下であり誤差と判断した。まず、L-CO₂および L 外-CO₂の材齢 28 日での曲げ強さは N-0 とほぼ同程度まで強度が増進した。また、材齢 91 日では強度増進しなかったが、N-0 も強度増進しなかったため同程度であった。

次に、圧縮強さについては、材齢 91 日で L-CO₂と N-0, L 外-CO₂と L-0 が同程度となった。また材齢 3 日では、L, L 外それぞれで C-S-H 系硬化促進剤を添加した配

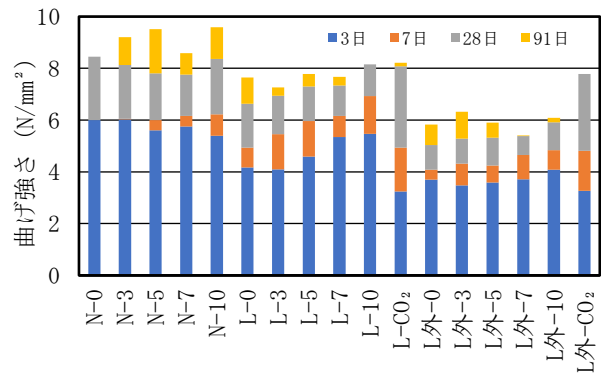


図-2 曲げ強さ

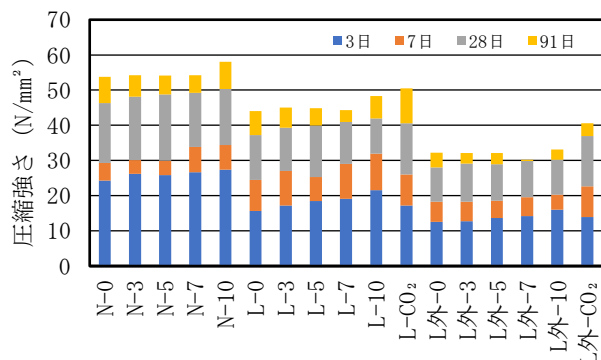


図-3 圧縮強さ

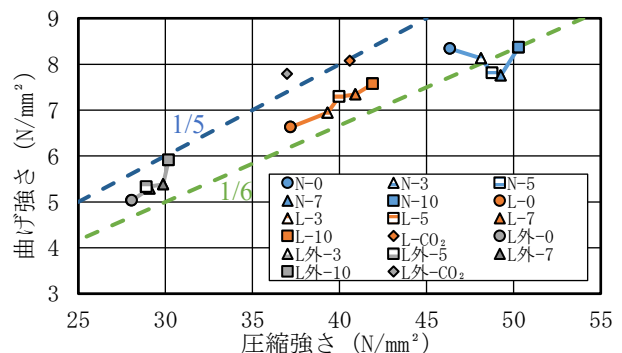


図-4 曲げ強さ・圧縮強さ

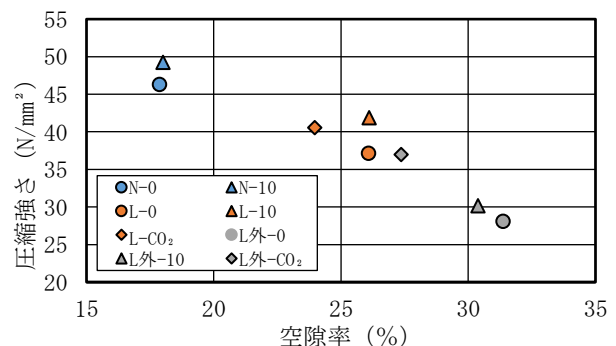


図-5 材齢 28 日の空隙率と圧縮強さ

合の方が骨材を強制炭酸化させた配合よりも圧縮強さが高くなった。しかし、L では材齢 28 日で L-10 と L-CO₂ の圧縮強さが、L 外では材齢 7 日で L 外-10 と L 外-CO₂ の圧縮強さがほぼ同程度となった。このことから、初期

材齢には C-S-H 系硬化促進剤を添加した方が骨材の強制炭酸化的改質効果を上回るが、長期材齢を考慮すると骨材自体を改質している強制炭酸化の方が、改質効果が高いと考えられる。図-4 に材齢 28 日の圧縮強さと曲げ強さの関係を示す。曲げ強さは概ね一般的な範囲である圧縮強さの 1/5～1/6 の範囲となった。骨材を強制炭酸化させた L-CO₂ と L 外-CO₂ では曲げ強さが圧縮強さの 1/5 を上回っており、他の配合と比較して圧縮強さに対する曲げ強さが大きいことが分かる。

3.2 圧縮強さと空隙率の関係

材齢 28 日の空隙率と圧縮強さの関係を図-5 に示す。なお、C-S-H 系硬化促進剤の添加率 3～7% の空隙率の試験値を表記していないが、これらはおおむね 0% と 10% の空隙率の試験値の間に位置していたため表記を省略した。空隙率が高いほど、圧縮強さは低下した。また C-S-H 系硬化促進剤の添加によるモルタル全体としての空隙率の改善はあまり認められず、一方で強制炭酸化では空隙率の改善が認められた。そこで、再生細骨材の混入モルタルの空隙を考慮して、骨材の吸水率と材齢 28 日の圧縮強さの関係を図-6 に示す。吸水率が高くなると圧縮強さが低下しており、既往の文献⁷⁾と同じく両者には相関が認められた。図-5 のモルタルとしての空隙率と圧縮強さの関係と図-6 の細骨材の吸水率とモルタルの圧縮強さの関係は、同傾向であると考えられ、モルタル全体としての空隙率の改善は、強制炭酸化による再生細骨材の混入モルタルの空隙の改善によるものであると考えられる。

3.3 透気試験

図-7 に透気試験の結果を示す。C-S-H 系硬化促進剤の添加によって、L 外では、大きく改善が認められたが、C-S-H 系硬化促進剤の添加率を変動させても透気係数に変動は認められなかった。また、N, L においては、L 外ほどの改善は認められなかったが、C-S-H 系硬化促進剤の添加率を上げるほど透気係数は低下した。C-S-H 系硬化促進剤は、本来セメントペースト部分に作用すると考えられる。しかし、N, L が C-S-H 系硬化促進剤の添加率が上がるほど透気係数が改善しているのに対して、L 外は低添加率で透気係数が改善し、その後は添加率が上がっても透気係数がそれほど変化していないことから、骨材界面にまで C-S-H 系硬化促進剤の作用が及んでいる可能性もあると考えられる。次に、強制炭酸化によって、L ではあまり改善が認められなかったが、L 外では大幅な改善が認められた。

ここで、材齢 28 日の圧縮強さと透気係数の関係を図-8 に示す。C-S-H 系硬化促進剤の添加によって、L 外は圧縮強さの改善に対する透気係数の改善が大きく、N, L は圧縮強さの改善に対する透気係数の改善が小さいことが

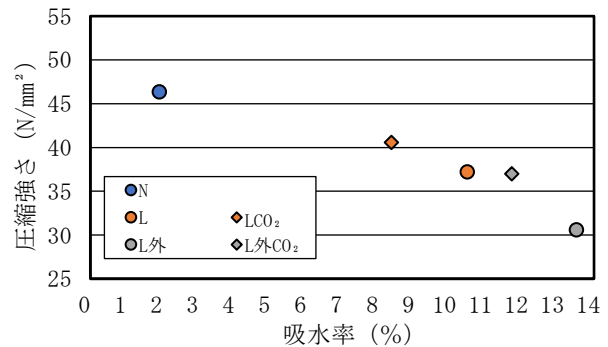


図-6 骨材の吸水率と材齢 28 日の圧縮強さ

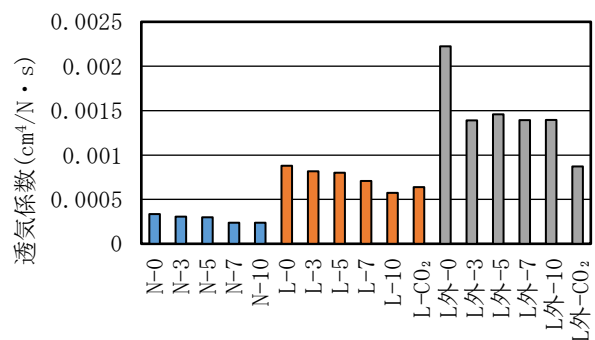


図-7 透気係数

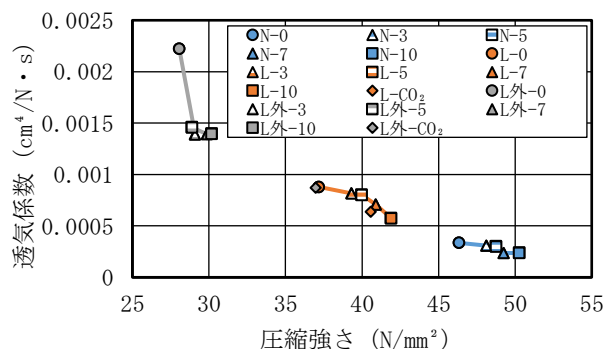


図-8 圧縮強さと透気係数

分かる。このことから N, L と L 外では、C-S-H 系硬化促進剤の作用している箇所が違ふ可能性があると考えられる。

3.4 乾燥収縮試験

図-9～図-11 に養生終了後 8 週目までの乾燥収縮試験の結果を示す。まず、N, L, L 外のそれぞれの細骨材を用いたモルタルに対して、C-S-H 系硬化促進剤の添加率を 3～10% の範囲で変動させて添加しても改善効果が認められなかった。このことから、細骨材の種類に関係なく C-S-H 系硬化促進剤の添加によりセメントペースト部分に対する改質は生じるが、乾燥収縮による長さ変化の改善には寄与しないことが考えられる。これは、C-S-H 系硬化促進剤の添加では、モルタル全体としての水分量が変化しないためだと考えられる。

次に、骨材の強制炭酸化を行った配合において L-CO₂

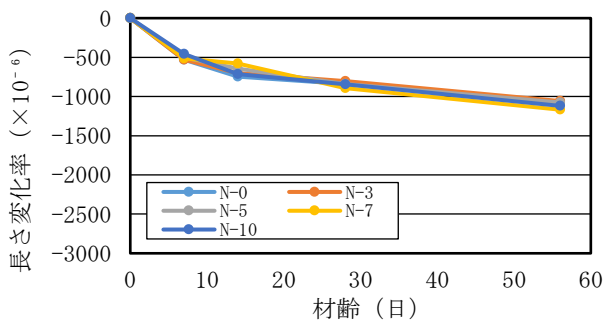


図-9 養生終了後8週までの長さ変化率 (N)

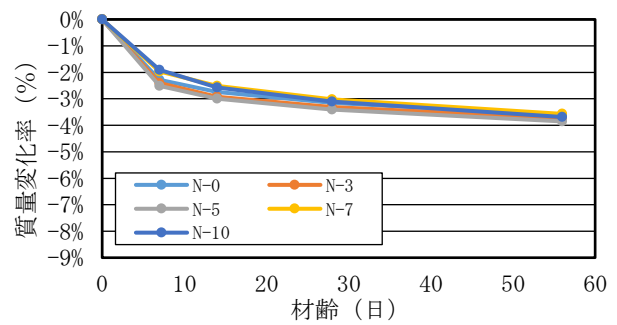


図-12 養生終了後8週までの質量変化率 (N)

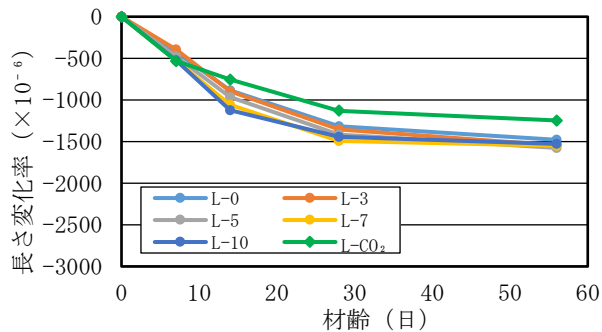


図-10 養生終了後8週までの長さ変化率 (L)

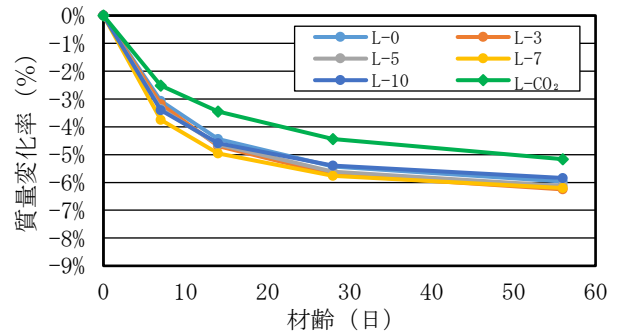


図-13 養生終了後8週までの質量変化率 (L)

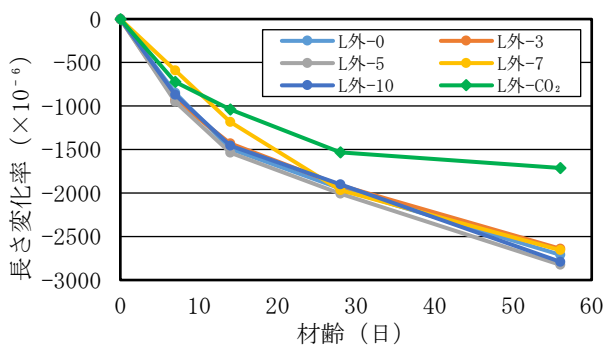


図-11 養生終了後8週までの長さ変化率 (L 外)

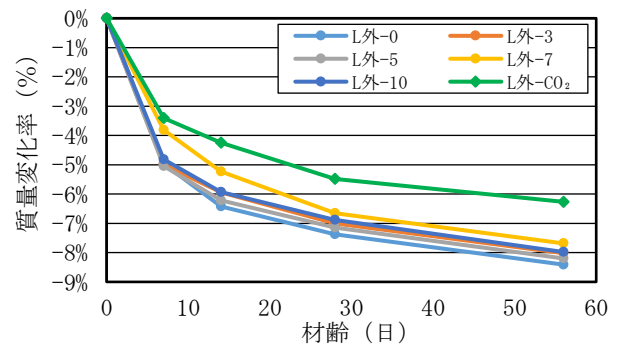


図-14 養生終了後8週目までの質量変化率 (L 外)

については、L-0 と比較して 300×10^{-6} 程度の改質効果が認められたが、L 外-CO₂ については、L 外-0 と比較して 1000×10^{-6} 程度と大幅な改質が認められ、L-0 とほぼ同程度まで長さ変化率を抑制する結果となった。これは、強制炭酸化により、L 外-CO₂ の吸水率が L の吸水率に近づいたことが要因ではないかと考えられる。続いて、図-12～図-14 養生終了後8週目までの質量変化率の結果を示す。乾燥収縮による長さ変化の改善は、モルタル全体としての水分量を減少させる事が重要であると考えられる。本検討で行った C-S-H 系硬化促進剤の添加では、モルタル全体としての水分量が変化しないため、乾燥収縮による長さ変化の改善が認められなかったと考えられる。一方で骨材の強制炭酸化では、再生細骨材が持つ水分量が減少した（吸水率が改善した）ことで乾燥収縮による長さ変化の改善が認められたと考えられる。そこで、細骨材の吸水率との関係を見るため、骨材の吸水率と養生終

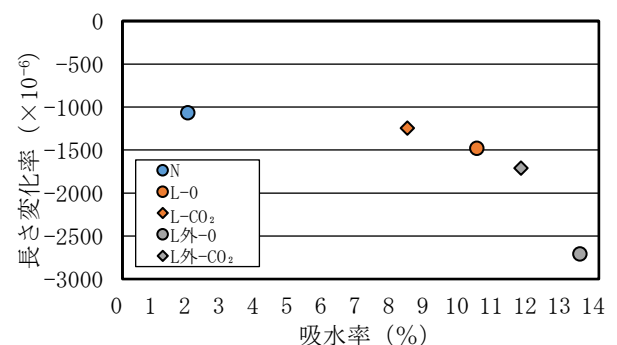


図-15 骨材の吸水率と養生終了後8週目での長さ変化率

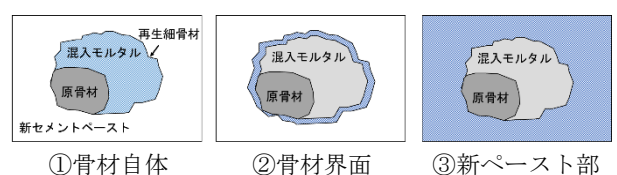


図-16 空隙が存在する箇所

了後 8 週目での長さ変化率の関係を図-15 に示す。骨材の吸水率が高いほど長さ変化率も高いことが分かる。このように、圧縮強さ、乾燥収縮による長さ変化は、骨材の吸水率に依存していると考えられ、強制炭酸化による再生細骨材の改質は有効であると言える。

3.5 改質方法の違いによる改質部分の検討

低品質再生骨材を用いたコンクリートやモルタルには、空隙が多く含まれていることから強度や耐久性が低下すると考えられる。図-16 に示すように、再生細骨材を用いたモルタルに空隙が存在する箇所として、①再生骨材に付着している混入モルタル部（骨材自体）、②再生骨材の骨材界面、③新しいセメントペースト部の 3 ヶ所が考えられる。これらの空隙を改質することによって強度や耐久性が向上すると考えられる。

C-S-H 系硬化促進剤を添加した配合では、3 種類どの細骨材に対しても、添加率を上げるほど圧縮強さが増進していること、乾燥収縮による長さ変化に対しては効果がほとんどなかったことから、③新しいセメントペースト部を改質していると考えられる。しかし、L 外では物質移動抵抗性にも改善効果が認められるため、②再生骨材の骨材界面への改善も否定できない。

一方、骨材の強制炭酸化を行った配合では、圧縮強さは大きく増進し、乾燥収縮による長さ変化も L では 300×10^{-6} 程度、L 外では 1000×10^{-6} 程度とかなり抑制した。これは、強制炭酸化により、①混入モルタル部が炭酸化し空隙が減少することで、骨材自体の改質が起きたことによるものだと考えられる。しかし、L-CO₂ では L の他の配合と比べ、圧縮強さに対する透気係数が若干低かったことから、②再生骨材の骨材界面の改質効果も否定できないため、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

再生コンクリートの普及に向けて低品質再生細骨材を用いたモルタルで検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 強制炭酸化を行なった低品質再生細骨材は、密度、吸水率が改善した。
- (2) 骨材の強制炭酸化を行った配合では、曲げ強さが L-CO₂、L 外-CO₂ ともに N-0 と同程度となった。圧縮強さについては、材齢 91 日で L-CO₂ が N-0 と、L 外-CO₂ が L-0 と同程度となった。また材齢 28 日で圧縮強さに対する曲げ強さが大きかった。乾燥収縮による長さ変化は、強制炭酸化していない配合と比較して改善し、より低品質である L 外で大きく改善し

た。物質移動抵抗性は、L ではあまり改善しなかったが、L 外で大きく改善した。強制炭酸化により、骨材自体の改善率は L の方が高かったものの、モルタルでの改善効果は L 外の方が高かった。

- (3) C-S-H 系硬化促進剤の添加を行った配合では、N、L、L 外全てにおいて、添加率を上げるほど、曲げ強さ、圧縮強さともに強度増進した。しかし、添加率を変動させても乾燥収縮による長さ変化には改善効果はなく、セメントペースト部のみを改善しても乾燥収縮による長さ変化には寄与しないと考えられた。物質移動抵抗性は、N、L ではあまり改善されず、骨材自体に空隙を多く含む L 外で大きく改善された。

謝辞

本研究の一部は 2019 年度コンクリート工学研究助成（研究代表者：伊代田岳史）にご支援いただいたことを付記する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 松田信広，伊代田岳史：異なる条件で改質させた再生骨材がコンクリートの強度性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集 Vol.39, No.1, pp.1531-1536, 2017
- 3) 深澤英将，杉山知巳，伊代田岳史：コンクリートの内部構造が C-S-H 系硬化促進剤に与える影響の検討，土木学会第 74 回年次学術講演会，V-301, 2019
- 4) 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
- 5) 横関康祐，渡邊賢三，安田和弘，坂田 昇：炭酸化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
- 6) 伊代田岳史，水野博貴，杉山知巳：C-S-H 系硬化促進剤の添加方法と空隙改善メカニズムの検討，第 45 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，Vol.72, pp.204-210, 2018
- 7) 船橋康史，麓隆行，山田優：再生細骨材の吸水量がコンクリートの強度に及ぼす影響，土木学会第 57 回年次学術講演会 V-233, pp.445-446, 2002