

論文 低品質再生骨材コンクリートの強度および耐久性向上を目的とした複数の改質方法の効果と改質メカニズムの検討

湯屋 蓮*1・松田 信広*2・小島 正朗*3・伊代田 岳史*4

要旨: 近年脱炭素社会の実現に向けて、様々な分野で取り組みがされている中、コンクリート分野でも、材料起源による CO₂ 排出量の削減や、コンクリートやコンクリート用骨材への CO₂ 固定など様々な検討がされている。本検討では後者に関連し、低品質再生骨材コンクリートにおいて骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加、さらにそれぞれを組み合わせた改質方法の効果と、その改質メカニズムの検討を行った。その結果、再生細骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加を組み合わせた改質方法により、総空隙量が減少、遷移帯厚さが大きく縮小し、圧縮強度、透気係数、乾燥収縮いずれにおいても高い改善効果を示した。

キーワード: 再生細骨材, 再生粗骨材, 強制炭酸化, C-S-H 系硬化促進剤, CO₂ 固定

1. はじめに

地球温暖化に影響を及ぼす温室効果ガス、特に、二酸化炭素 (CO₂) の排出量の低減は、世界規模での共通認識である。日本では、2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し、脱炭素社会の実現に向け、様々な分野で取り組みがなされている。コンクリート分野においても、脱炭素社会の実現に向け、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用し、ポルトランドセメントの使用量を抑制することで材料起源によるコンクリートの CO₂ 排出量を大幅に低減したコンクリートの開発¹⁾や、回収した CO₂ から製造される炭酸カルシウムを使用するカーボンリサイクル・コンクリートの開発²⁾など様々な技術が検討されている。

また、2016 年に開催された国際会議 ICEF にて、「Carbon Dioxide Utilization (CO₂U)-ICEF ROADMAP1.0」³⁾が提示され、コンクリートやコンクリート用骨材への CO₂ 固定が、近い将来の CO₂ の有効利用において世界規模で大きなポテンシャルを持つことが示されている。また戦略的な行動をとることで、2030 年において、骨材への CO₂ 固定によって世界規模で 36 億トンの CO₂ を削減できる可能性を秘めていると示されている。一方、近年日本では、老朽化したコンクリート構造物の解体や更新に伴い、コンクリート塊の発生量が増加してきており、今後も増加し続ける予測がなされている。コンクリート塊はこれまで、その大半が路盤材として再利用されてきたが、今後は、新設の道路建設も少なくなることが予想され、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。コンクリート塊の有効的な利用法として、再生骨材への使用が考えられるが、再生骨材コンクリートには、再生

骨材の品質に起因する品質問題が存在することなどから、その出荷量は、普通コンクリートの出荷量に対して 0.1% にも満たず、普及に至っていないのが現状である。筆者らのグループはこれまで、再生骨材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⁴⁾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しているモルタルを炭酸化させ、再生骨材自体の改質をはかるものであるが、これら炭酸化再生粗骨材を使用した場合でも再生粗骨材自体の品質は向上するものの、再生骨材コンクリートの品質は大きく向上していないのが現状である。

一方、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透過性が改質されること⁵⁾を報告している。

そこで本検討では、再生細骨材および再生粗骨材両方を用いたコンクリートにおいて、骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加、さらにそれぞれを組み合わせることで低品質再生骨材コンクリートの改質方法と、その改質メカニズムの検討を行った。

2. 空隙の存在する箇所および改質方法

2.1 再生骨材コンクリートの空隙

低品質再生骨材を用いたコンクリートは、空隙が多く含まれていることにより、強度や耐久性が低下すると考えられる。既往の文献⁶⁾より、再生骨材コンクリートにおいて、再生骨材の付着モルタルや骨材界面に空隙が多く存在することが報告されている。再生骨材コンクリー

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 (株) 東京テクノ 生産技術統括本部長 (芝浦工業大学大学院 博士課程) (正会員)

*3 (株) 竹中工務店技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ長 博士(工学) (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)

トに空隙が存在する箇所として、図-1 に示すように、①セメントペースト部分、②再生細骨材の付着ペースト部分、③再生細骨材の骨材界面、④再生粗骨材の付着モルタル部分、⑤再生粗骨材の骨材界面の5ヶ所が考えられ、これらの空隙を改質することによって再生骨材コンクリートの強度や耐久性が向上すると考えられる。

2.2 改質方法

(1) 骨材の強制炭酸化

鉄筋コンクリートの中性化はコンクリート内にCO₂などが浸透し、コンクリート中の細孔溶液のpHが低下することで鉄筋の防錆効果が失われてしまう現象である。このプロセスにおいて、CO₂が水和生成物である水酸化カルシウム(CH)やカルシウムシリケート水和物(以下、C-S-H)などと結合することで炭酸カルシウムを生成することが知られており、コンクリートのみに着目した場合、水和生成物よりも体積の大きい炭酸カルシウムの生成により、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⁷⁾。低品質再生骨材は、付着モルタル量が多いため、骨材の強制炭酸化により、この付着モルタル部分の空隙を緻密にすることができれば骨材自体の品質を向上することができると考えられる。本検討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%、CO₂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CO₂が行き渡るようにした。

(2) C-S-H系硬化促進剤の添加

C-S-H系硬化促進剤(ACX)は、C-S-Hのナノ粒子を主成分とした化学混和剤であり、このC-S-Hナノ粒子がコンクリートの液相中に導入されることで、種結晶として作用し、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⁵⁾。通常の化学混和剤はセメント質量に対して添加するが、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、液相中の存在量が重要となると考えられる。そこで、セメント質量に対して添加するよりも単位水量に対して添加し、添加量を増加させた方が効果的であると考えられている⁵⁾ため、本検討でも単位水量に対して添加した。

3. 試験概要

3.1 使用材料および計画配(調)合

本検討で使用した細骨材および粗骨材の物理的性状を表-1に示す。再生骨材は再生細骨材L、再生粗骨材L(JIS A 5022 付属書 A)を使用し、比較のため普通骨材も使用した。ここで、図-2と図-3に示すように既往の研究^{4,8,9)}同様、強制炭酸化により、再生骨材の絶乾密度、吸水率が改善し、中でも再生粗骨材は再生粗骨材M(JIS

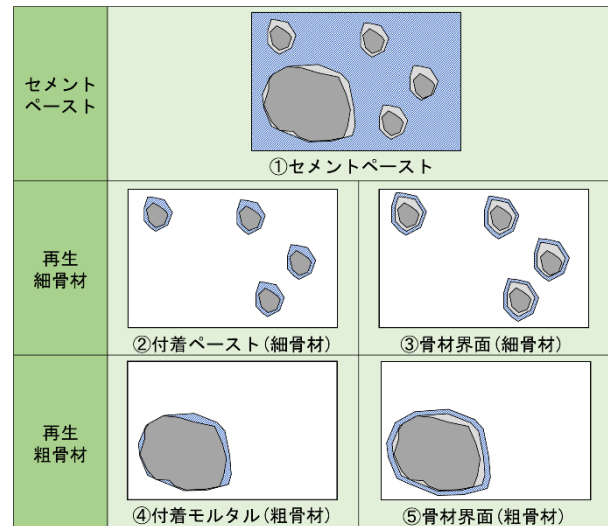


図-1 空隙の存在する箇所

表-1 使用骨材の物理的性状

記号	骨材種類	炭酸化	表乾密度 (g/cm ²)	絶乾密度 (g/cm ²)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
NS	普通細骨材	-	2.60	2.55	1.92	2.00
LS	再生細骨材	なし	2.24	2.00	12.01	8.60
LSC		あり	2.31	2.13	8.47	
NG	普通粗骨材	-	2.70	2.69	0.32	0.80
LG	再生粗骨材	なし	2.51	2.37	5.90	1.00
LGC		あり	2.55	2.45	4.35	

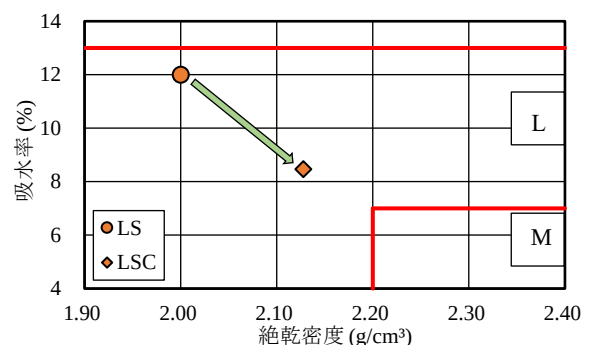


図-2 再生細骨材の絶乾密度と吸水率

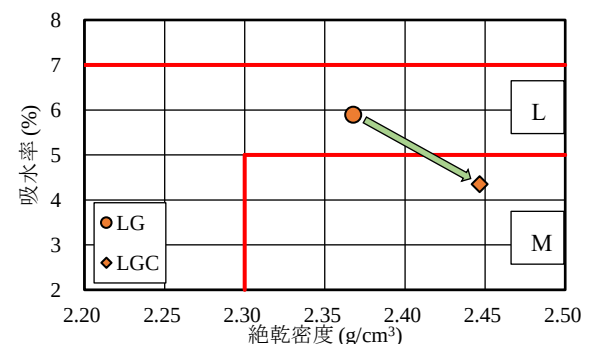


図-3 再生粗骨材の絶乾密度と吸水率

A 5022 付属書 A) となった。コンクリートの練混ぜ前の骨材の準備として再生骨材は、吸水率の高さからそのまま使用するとスランブロスが懸念されるため、再生細・粗骨材ともに練混ぜ前に24時間プレウェッティングを

表-2 コンクリートの計画配（調）合

配合名	改質方法		使用骨材		W/C (%)	s/a (%)	air (%)	単位量(kg/m³)			ACX (W×%)	
	骨材の炭酸化	ACX	細骨材	粗骨材				W	OPC	S		G
NSNG	-	-	NS	NG	50	48	4.5	170	340	847	950	-
LSLG	-	-	LS	LG						729	883	-
LSLG-ACX	-	○								752	883	10
LSCLG	S炭酸化	-	LSC	LG						752	883	-
LSCLG-ACX	S炭酸化	○										752
LSCLGC	S,G炭酸化	-	LSC	LGC						752	897	-
LSCLGC-ACX	S,G炭酸化	○										752

行い、表乾状態として使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。表-2 にコンクリートの計画配（調）合（以下、配合）を示す。配合は、水セメント比：50%，s/a：48%で一定とし、細骨材粗骨材両方を炭酸化しない配合、細骨材のみ炭酸化した配合と細骨材粗骨材両方を炭酸化した配合、また、それぞれに C-S-H 系硬化促進剤を 10%添加した配合とした。なお、C-S-H 系硬化促進剤の添加率については、既往の検討⁵⁾において、添加率 10%で圧縮強度や透気係数が頭打ちとなったため、10%とした。

ここで配合名は、細骨材種類粗骨材種類で示しており、C-S-H 系硬化促進剤を添加した配合については、細骨材種類粗骨材種類-ACX で示している。

3.2 試験項目および試験方法

(1) 圧縮強度試験

φ100×200mm の円柱供試体を温度 20℃にて材齢 28 日まで水中養生し、JIS A 1108 に準拠して実施した。

(2) 透気試験

φ100×200mm の円柱供試体を 28 日間水中養生した後、両端を 25mm 程度切断し、残った 150mm 程度の供試体を 50mm 程度で 3 本に切断し、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：載荷圧力 (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

100×100×400mm の角柱供試体を 28 日間水中養生した後、養生終了時、養生終了から 1,2,4,8,13,26 週にて測定を行った。本検討では、再生骨材使用時の問題である乾燥収縮は養生日数を増やすことで抑制できると考え、また再生細骨材、再生粗骨材に対する強制炭酸化による改善効果を検討するため、養生日数は 28 日とした。なお試験は恒温恒湿室 (20℃, RH60%の環境) にて行った。

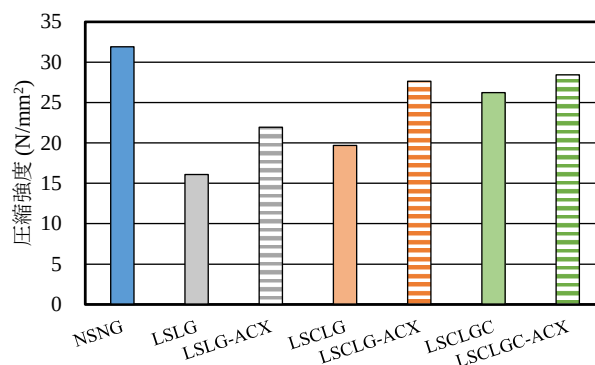


図-4 圧縮強度

(4) 空隙率試験

透気試験用に作製した φ100×50mm の供試体を切断終了後、直ちに水で満たした容器に入れ、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、絶乾質量を計測し、アルキメデス法により空隙率を算出した。

4. 試験結果および考察

4.1 圧縮強度

図-4 に圧縮強度を示す。再生骨材に改質を施していない LSLG の圧縮強度は、NSNG の圧縮強度のおよそ 5 割程度であった。これに対し、まず LSLG と、再生細骨材のみ強制炭酸化を行った LSCLG、再生細・粗骨材両方の強制炭酸化を行った LSCLGC の圧縮強度を比較すると、強制炭酸化により圧縮強度が向上していることが分かる。また C-S-H 系硬化促進剤を添加した LSLG-ACX および LSCLG-ACX、LSCLGC-ACX の圧縮強度についても、それぞれの無添加 (LSLG および LSCLG、LSCLGC) と比較すると大きく向上していることが分かる。とくに再生細・粗骨材両方を強制炭酸化し、C-S-H 系硬化促進剤を 10%添加した LSCLGC-ACX の圧縮強度は、NSNG の圧縮強度の 9 割程度まで向上したが、再生細骨材のみ強制炭酸化し、C-S-H 系硬化促進剤を 10%添加した LSCLG-ACX の圧縮強度も大きく向上し、NSNG の 8.5 割程度まで向上した。

4.2 透気係数

図-5 に透気係数を示す。LSLG の透気係数は、NSNG の透気係数と比較すると大きな結果となった。透気係数

についても、LSLG と LSCLG, LSCLGC の透気係数を比較すると、強制炭酸化により透気係数が改善していることが分かる。また、LSLG-ACX および LSCLG-ACX, LSCLGC-ACX の透気係数についても、それぞれの無添加 (LSLG および LSCLG, LSCLGC) と比較すると大きく改善していることが分かる。とくに LSCLGC-ACX の透気係数が最も大きく改善したが、LSCLG-ACX の透気係数も同様に大きく改善した。

以上より圧縮強度、透気係数いずれの試験においても LSCLG-ACX と LSCLGC-ACX の改善効果が同程度であることや、再生粗骨材のみに対して強制炭酸化を行った検討⁹⁾において、圧縮強度や透気係数は大きく改善しなかったことから、強制炭酸化による改善効果は再生粗骨材よりも再生細骨材の方が高いと考えられる。

4.3 乾燥収縮

図-6 に乾燥収縮による長さ変化率、図-7 に質量変化率を示す。養生終了後から 26 週目時点での長さ変化率は、NSNG が -500×10^{-6} 程度であるのに対して、LSLG は、 -1300×10^{-6} 程度と 2 倍以上の長さ変化率であった。一般的にコンクリートの乾燥収縮は、養生終了時のコンクリートの水分量を減少させることができれば、抑制できると考えられる。すなわち水和により空隙を緻密にすることができれば、養生終了時の余剰水分量が減少し、乾燥収縮を抑制できると考えられる。まず骨材の強制炭酸化では、骨材の吸水率が低下していることから、付着モルタル部分の空隙が緻密になり、プレウェッティングにより骨材が有する水分量が減少し、乾燥収縮を抑制できたと考えられる。LSLG および LSCLG, LSCLGC の 3 つの配合を比較すると、LSCLGC が最も乾燥収縮を抑制していることが分かるが、LSCLG から LSCLGC の差と LSLG から LSCLG の差を比較すると、後者の方が大きい。これは再生粗骨材よりも再生細骨材の方が、元々の吸水率が高いことから、強制炭酸化による吸水率の改善効果が大きいことが要因として考えられる。また C-S-H 系硬化促進剤の添加により乾燥収縮が抑制していることが分かる。C-S-H 系硬化促進剤の添加では、セメントペースト部分や骨材界面の空隙が緻密になり、養生終了時の供試体の余剰水分量が減少したことにより乾燥収縮を抑制できたと考えられる。また図-7 より、乾燥収縮が抑制されている配合ほど質量変化率が小さいことから養生終了時のコンクリートの余剰水分量、すなわち空隙量を減少させることが重要であると考えられる。

4.4 空隙率と各物性の関係

図-8 に空隙率と圧縮強度、図-9 に空隙率と透気係数の関係を示す。空隙率が低下するほど圧縮強度が向上し、透気係数が改善していることが分かる。改質を 1 つしか行っていない LSLG-ACX と LSCLG では、それぞれ改善

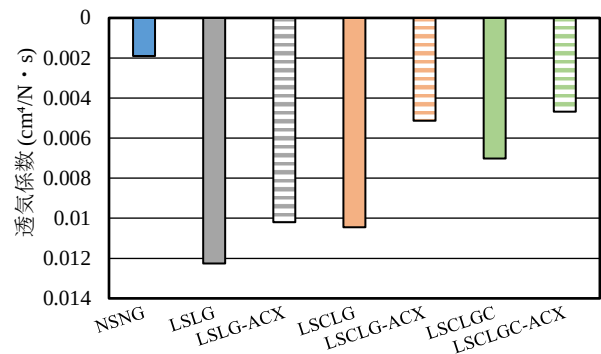


図-5 透気係数

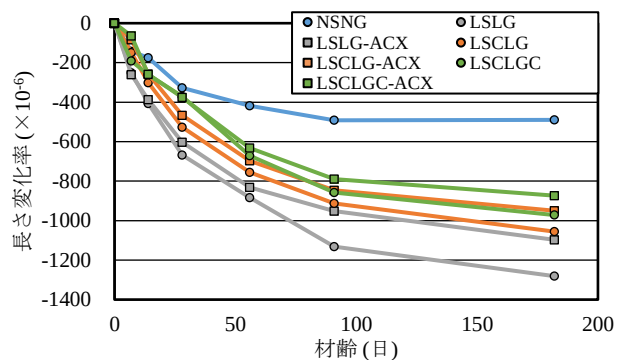


図-6 乾燥収縮

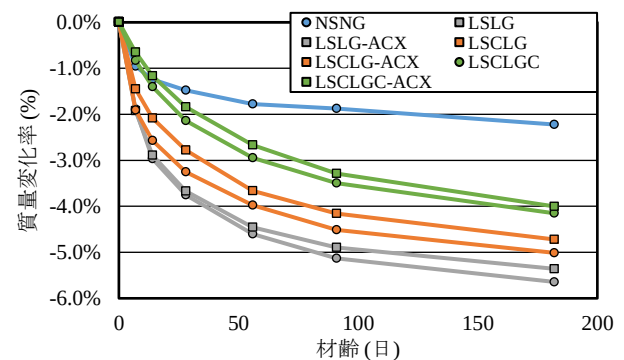


図-7 質量減少率

はしているものの、改善効果が小さい。一方、改質を 3 つ行っている LSCLGC-ACX が最も改善しているが、改質 2 つの LSCLG-ACX の改善効果も高いことが分かる。また、図-1 に示した空隙箇所のうち、②および④の付着モルタル部分の空隙は、強制炭酸化によって改質されると考えられる。しかし、アルキメデス法による空隙率試験では、図-1 に示した 5 つの空隙の総空隙量を合計し、空隙率として算出しているため、②、④以外のそれぞれの空隙がどの程度改質したのかが不明である。そこで、コンクリートの強度や物質透過性は遷移帯の影響を大きく受ける¹⁰⁾ことから、各改質方法によって、⑤粗骨材界面の空隙、すなわち遷移帯がどの程度改善しているのかを検討するためにピッカース硬さを測定し、各改質方法による空隙改質メカニズムの検討を行った。

5. 各改質方法による空隙改質メカニズムの検討

5.1 ビッカース硬さ試験の試験方法

透気試験後の供試体から粗骨材を含む $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}$ 程度の供試体を作製し、供試体表面を研磨紙#120~15000を用いてターンテーブル上で鏡面仕上げした後、粗骨材界面のビッカース硬さを測定した。ビッカース硬さの測定には、微小硬さ試験機（荷重 0.9807 N 、試験力負荷速度 $10 \mu\text{m/s}$ ）を使用し、粗骨材端部から $20 \mu\text{m}$ 間隔で $200 \mu\text{m}$ まで 2 点ずつ測定した。各距離で測定したビッカース硬さの数値の差が 10 N/cm^2 を超えた場合については同じ距離で、もう一点測定し、平均値として算出した。

5.2 ビッカース硬さ

図-10 と表-3 にビッカース硬さを示す。いずれの配合においても、骨材界面から数 $10 \mu\text{m}$ の幅でビッカース硬さが低い脆弱な遷移帯領域が存在し、さらに離れた領域には、骨材の影響を受けないビッカース硬さがある程度均一なバルク部分が存在していることが分かる。バルク部のビッカース硬さは $80 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ 程度となっていることから、遷移帯部分をビッカース硬さが 80 N/mm^2 以下の部分と定義¹⁾すると、遷移帯厚さは、NSNG で $40 \mu\text{m}$ 程度なのに対し、LSLG では $120 \mu\text{m}$ 程度とかなり大きな厚さとなった。これは既往の文献⁶⁾と同様に、再生骨材は吸水率が高いことが要因となり、硬化体としたときに骨材内部の水分が骨材界面に滲出し、遷移帯が粗大化したと考えられる。一方で、骨材の強制炭酸化や C-S-H 系硬化促進剤の添加を行うことで遷移帯厚さが小さくなっていることが分かる。それぞれの改質方法で比較すると、LSCLG や LSCLGC よりも LSLG-ACX の遷移帯厚さの方が小さくなっていることから、骨材の強制炭酸化よりも C-S-H 系硬化促進剤の添加による改質方法のほうが遷移帯に存在する空隙を緻密化する作用が大きいことが考えられる。また、LSLG-ACX および LSCLG-ACX、LSCLGC-ACX のバルク部分のビッカース硬さは、それぞれの無添加（LSLG および LSCLG、LSCLGC）と比較すると、それぞれ若干大きくなっていることから、C-S-H 系硬化促進剤の添加では、図-1 の①セメントペーストの空隙も改善している可能性が考えられる。また、強度や耐久性への改善効果が大きかった LSCLG-ACX と LSCLGC-ACX の遷移帯厚さは、 $60 \mu\text{m}$ 程度となっていることが分かる。これは、前述の C-S-H 系硬化促進剤の添加による遷移帯に存在する空隙の緻密化と、骨材の強制炭酸化により、吸水率が低下し、硬化体となった後に滲出する水分量が減少したことにより遷移帯厚さが縮小したと考えられる。

5.3 改質方法の違いによる空隙改質部分の検討

本検討により得られた試験結果から骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加により、図-1 に示した空隙箇所のうち、いずれの空隙に改質効果があるのかとその

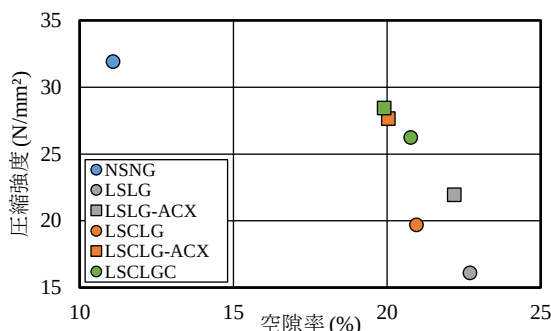


図-8 空隙率と圧縮強度

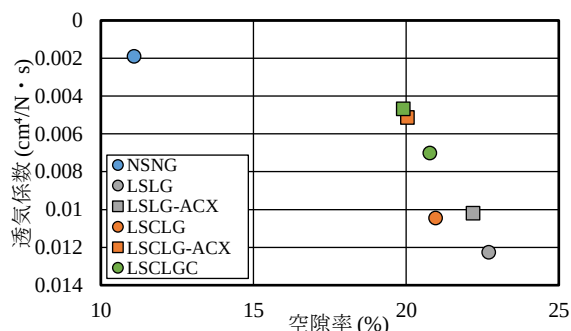


図-9 空隙率と透気係数

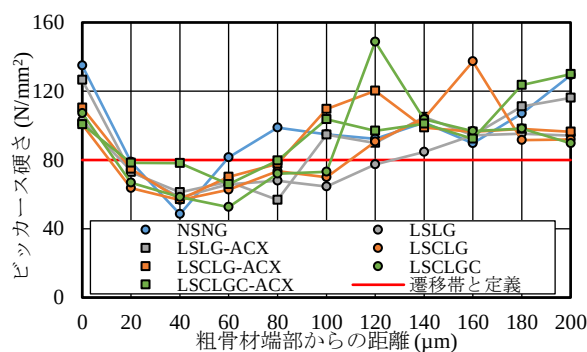


図-10 ビッカース硬さ

表-3 各配合の遷移帯厚さ

配合名	粗骨材の遷移帯厚さ(μm)
NSNG	40
LSLG	120
LSLG-ACX	80
LSCLG	100
LSCLG-ACX	60
LSCLGC	80
LSCLGC-ACX	60

影響について考察する。表-4 に各改質方法によって改質された空隙箇所を示す。まず、C-S-H 系硬化促進剤の添加のみ(LSLG-ACX)では、圧縮強度や透気係数への改善効果は小さいものの、遷移帯厚さが大きく縮小したことやバルク部分のビッカース硬さが若干大きくなっていることから①セメントペースト部分、⑤粗骨材の骨材界面

の空隙に効果があると考えられる。細骨材の強制炭酸化 (LSCLG)では、圧縮強度や透気係数、遷移帯厚さへの改善効果が小さいものの、骨材の吸水率が大きく改善し、細骨材界面に滲出する水分量は減少すると考えられる。

5.2 節において、粗骨材の強制炭酸化により粗骨材の遷移帯厚さが縮小していることを考慮すると、細骨材と粗骨材の遷移帯形成は同じ挙動を示すと考えられ、細骨材の強制炭酸化により②細骨材の付着ペースト部分と③細骨材界面の空隙に効果があると想像できる。ただし、本検討では確認には至っておらず、今後検討を加える予定である。細・粗骨材の強制炭酸化(LSCLGC)では、同様のことから、細・粗骨材の付着モルタル部分(②, ④)と骨材界面(③, ⑤)の空隙に効果があると考えられる。細骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加の組み合わせ (LSCLG-ACX)では、圧縮強度や透気係数、遷移帯厚さへの改善効果が高いことから①セメントペースト部分と②細骨材の付着ペースト部分、細・粗骨材の骨材界面(③, ⑤)の空隙に効果があり、細・粗骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加の組み合わせ(LSCLGC-ACX)では、同様の結果から①セメントペースト部分、骨材の付着モルタル部分(②, ④)と骨材界面(③, ⑤)の空隙に効果があると考えられる。以上より、⑤粗骨材界面の空隙改善が重要であると考えられる。一方で各試験の結果から、再生粗骨材の強制炭酸化による再生粗骨材の付着モルタルの空隙改善による各種物性への効果は再生細骨材と比較すると小さいと考えられる。

6. まとめ

低品質再生骨材コンクリートの各改質方法における強度や耐久性の改善効果を以下に示す。

- (1) C-S-H 系硬化促進剤の添加のみでは、セメントペースト部分や粗骨材界面の空隙は改善するものの、圧縮強度や透気係数、乾燥収縮への改善効果は小さい。
- (2) 骨材の強制炭酸化では、骨材の付着モルタル部分や骨材界面の空隙が改善し、圧縮強度や透気係数、乾燥収縮が改善する。
- (3) 骨材の強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加の組み合わせでは、セメントペースト部分や骨材の付着モルタル、また特に、骨材界面の空隙が大きく改善し、圧縮強度や透気係数、乾燥収縮が大きく改善する。特に、再生細骨材のみ強制炭酸化と C-S-H 系硬化促進剤の添加による改善効果が大きい。

謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16002) によるものである。

表-4 各改質方法によって改質される空隙

	①	②	③	④	⑤
ACX (LSLG-ACX)	○				◎
S 炭酸化 (LSCLG)		○	○		
S 炭酸化+ACX (LSCLG-ACX)	○	○	○		◎
S,G 炭酸化 (LSCLGC)		○	○	○	○
S,G 炭酸化+ACX (LSCLGC-ACX)	○	○	○	○	◎

参考文献

- 1) 小林利充, 並木憲司, 溝渕麻子: 混和材を高含有したコンクリートの強度性状に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.83~88, 2019
- 2) 大成建設「T-eConcrete®/Carbon-Recycle」の開発: https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210216_5079.html (閲覧日: 2022 年 1 月 6 日)
- 3) CARBON DIOXIDE UTILIZATION (CO2U)-ICEF ROADMAP1.0 :https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2016_roadmap1.pdf (閲覧日: 2022年1月3日)
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Poon, C.S., Shui, Z.H. and Lam, L.: Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, Construction and Building Materials, Vol.18, pp.461-468, 2004
- 7) 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
- 8) 湯屋蓮, 松田信広, 杉山知巳, 伊代田岳史: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.965-970, 2021
- 9) 坂井一貴, 松田信広, 杉山知巳, 伊代田岳史: 複数の空隙改善手法による再生粗骨材コンクリートの性能向上の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.959-964, 2021
- 10) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993
- 11) 後藤努, 庄谷征美, 阿波稔: コンクリートの骨材界面に形成される遷移帯に関する基礎的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-40, pp.604-605, 1998