

論文

改質再生骨材と高炉スラグ微粉末を併用した環境配慮型 コンクリートの強度特性に関する検討

竹入 陽太^{*1}, 伊代田 岳史^{*2}, 池尾 陽作^{*3}

Study on Strength Properties of Environmentally Friendly Concrete Made with Improved Recycled Aggregate and Ground Granulated Blast Furnace Slag

Yota TAKEIRI^{*1}, Takeshi IYODA^{*2} and Yosaku IKEO^{*3}

要旨： 持続可能な社会の実現に向けた取り組みとして、コンクリート分野では、高炉スラグ微粉末などの混和材の利用や、コンクリートや骨材への CO₂ 固定、再生骨材の利用などが検討されている。本研究では、炭酸化により改質した低品質再生骨材と高炉スラグ微粉末を併用した硬化体の強度特性に関する検討を行った。高炉スラグ微粉末の添加量により、骨材の改質による強度改善効果の異なる結果が得られた。その原因を解明するため、再生骨材の旧ペースト・モルタル部分に着目し、含水状態や水酸化カルシウム含有量などの条件を変化させた骨材を用いて複数の検証を行った。

キーワード： 高炉スラグ微粉末、再生骨材、炭酸化、強度

1. はじめに

近年、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」の実現に向け、各業界で様々な取り組みが行われている。建設業界では、製造時に大量の CO₂ を排出する普通ポルトランドセメントに、鉄製造時の副産物である高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）などの混和材料を代替することによって、材料由来の CO₂ 排出量削減を目指す検討が行われている¹⁾。また、構造物の解体・更新に伴って発生したコンクリート塊を、再生骨材として有効に再利用し、資源循環を目指す検討も行われている。

再生骨材は、品質によって H、M、L の 3 種類に分類される。再生骨材 H は普通骨材と同等の性能を有するものの、加熱すりもみなどの高度な処理を必要とし、製造に関わるエネルギー・コストは非常に大きくなってしまふ。そのため、再生骨材の普及には低エネルギー・コストで製造できる再生骨材 L 及び L 規格外品（以下、低品質再生骨材）の利用が必要だと考える。しかし、低品質再生骨材には原コンクリートのペーストおよびモルタル（以下、付着ペースト・モルタル）が多く付着し、低密度・高吸水率となることから、コンクリートに適用した際には強度・耐久性を低下させるといった問題がある。筆者らのグループではこれまで、CO₂ ガスを用いた強制炭酸化による再生骨材の改質技術を提案している。強制炭酸化により、再生細骨材、再生粗骨材共に密

度・吸水率を改善することができ、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、強度・耐久性を向上させることが可能であると報告している²⁾。また、低品質再生細骨材においては 20kg-CO₂/t 程度の CO₂ 固定量を確保できる³⁾とされるため、CO₂ 削減効果も期待できる。

以上より、炭酸化により改質し、さらに CO₂ 固定量を確保した低品質再生骨材と GGBS を大量使用したコンクリートを実現することができれば、脱炭素化や資源循環に大きく貢献できると考える。そこで本研究では、改質再生骨材と GGBS を併用した環境配慮型コンクリートの実現に向け、硬化体の強度特性把握を目的に検討を行った。

2. コンクリートの実験概要

2.1 使用材料

使用した骨材の物理的性質を表-1 に示す。本研究で用いた低品質再生細・粗骨材の原コンクリートは、1974 年に竣工した建築構造物（福岡県）の解体ガラである。当時の JASS5 からセメントは普通ポルトランドセメント、呼び強度は 24 と推測した。低品質再生細・粗骨材の製造方法は、乾式破碎であり、ジョークラッシャおよびインパクトクラッシャ、振動ふるい機を用いて製造した。低品質再生骨材の改質によるコンクリートの強度改善効果を評価するため、骨材は、普通細・粗骨材（O）、低品質な未改質再生

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻 修士課程

*2 芝浦工業大学工学部 教授 土木工学課程担当

*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 未来・先端研究部 主席研究員

表-1 使用骨材の物理的性質

記号	骨材種	強制炭酸化	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	空隙率 (%)
OS	普通細骨材 (混合砂)	-	2.61	2.57	1.77	3.85
RS	低品質再生細骨材	なし	2.23	2.00	11.59	23.20
RSC		あり	2.25	2.04	10.29	21.00
OG	普通粗骨材 (碎石 2005)	-	2.68	2.67	0.51	1.34
RG	低品質再生粗骨材	なし	2.38	2.22	7.25	16.10
RGC		あり	2.42	2.28	5.92	13.50

細・粗骨材 (R)，低品質再生細・粗骨材を，強制炭酸化させた改質再生細・粗骨材 (RC) の 3 種類を使用した．強制炭酸化は促進中性化装置にて，20℃，60%RH，CO₂ 濃度 5%の環境下で 7 日間行った．また，再生細・粗骨材は製造後から大気に触れないように保管し，強制炭酸化開始後は，骨材全体に均一に CO₂ が行きわたるように，バット内に 4kg 程度入れた骨材を 1 日 1 回かき混ぜし，霧吹きにて一定量の水分を噴霧した．バットは 3 段に重ねて配置し 1 日ごとに配置を変えた．各骨材の空隙率は，細骨材は「細骨材の密度および吸水率試験方法 (JIS A 1109-2006)」，粗骨材は「粗骨材の密度および吸水率試験方法 (JIS A 1110-2006)」によって，骨材の密度および吸水率を算出する際に得られる，骨材の飽水質量，水中質量，絶乾質量を用いてアルキメデス法により算出した．強制炭酸化前後の再生細・粗骨材の密度および吸水率の変化を図-1，図-2 に，空隙率の変化を図-3 に示す．細骨材，粗骨材ともに強制炭酸化により，密度・吸水率および空隙率も改善し，強制炭酸化により骨材物性を改質できることが確認された．改質前後の再生骨材に関しては，普通骨材と比較して吸水率が高いため，十分に吸水させるために 48 時間プレウェッティングを行った．その後，自然乾燥にて表面乾燥飽和状態（表乾状態）にした．

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す．セメントは，GGBS 混合割合の違いによる強度改善効果への影響を確認するため，普通ポルトランドセメント (N)，高炉セメント B 種 (BB)，高炉セメント C 種 (BC) を使用した．N, BB, BC 各セメントで，普通骨材，

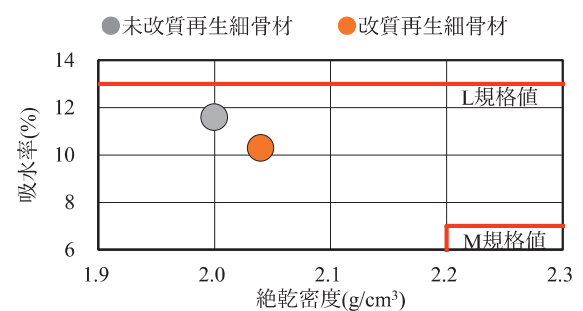


図-1 再生細骨材の密度および吸水率

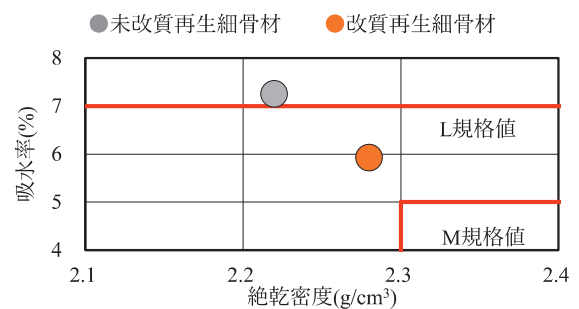


図-2 再生粗骨材の密度および吸水率

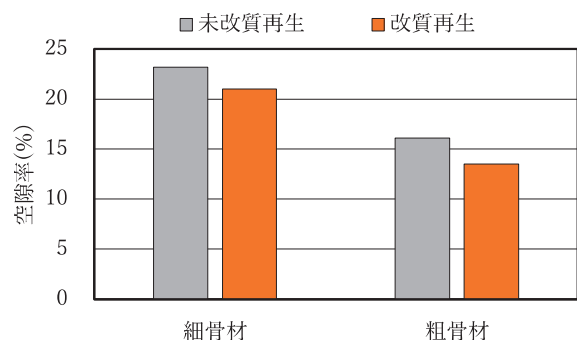


図-3 再生骨材の空隙率

表-2 コンクリートの配合表

配合名	セメント種	骨材種	W/B (%)	s/a (%)	W(kg/m ³)	air (%)
N-O, BB-O, BB-O	N, BB, BC	O	50	48	170	4.5
N-R, BB-R, BC-R		R				
N-RC, BB-RC, BC-RC		RC				

未改質再生骨材、改質再生骨材を用いた場合の配合を検討した。水結合材比 $W/B=50\%$ 、細骨材率 $s/a=48\%$ 、単位水量 $W=170\text{kg/m}^3$ 、空気量 $\text{air}=4.5\%$ で一定とした。配合名は「セメント種-骨材種」とする。

2.3 試験項目および試験方法

(1) 圧縮強度試験

$\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて JIS A 1108 に準拠し、材齢 28 日に圧縮強度試験を実施した。なお、供試体は打ち込みから 2 日後に脱型し、脱型後は温度 20°C で封緘養生を行った。

(2) 空隙率試験

$\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を材齢 28 日まで温度 20°C で封緘養生したのち、コンクリート供試体切断機を用いて高さ 50mm 程度のサイズに切断し、直ちに水で満たした容器に入れ、真空状態で飽水させ飽水質量と水中質量を測定した。その後質量が恒量となるまで約 50 日程度 40°C の乾燥炉に静置し、絶乾質量を測定し、アルキメデス法により空隙率を算出した。

2.4 試験結果

(1) 圧縮強度

図-4 に圧縮強度と、各セメントにおける普通骨材コンクリートに対する圧縮強度比を示す。まず、各セメントにおける、再生骨材の改質による圧縮強度改善効果に着目する。N では、N-RC が N-R の圧縮強度を上回り、BB でも BB-RC が BB-R の圧縮強度を上回ることから、骨材の改質による圧縮強度改善効果が確認された。BC では、BC-R と BC-RC の圧縮強度が同程度となり、骨材の改質による圧縮強度改善効果が認められなかった。次に普通骨材コンクリートに対する圧縮強度比に着目する。改質再生骨材を用いた時は、いずれのセメント種でも 8 割程度の圧縮強度を発現することが確認された。一方、未改質再生骨材を用いた時は、GGBS 混合割合の増加に従い、67%、73%、82%と圧縮強度比が増加していくことが確認された。以上の結果から、N を用いた場合、再生骨材の改質によりコンクリートの圧縮強度は改善するが、GGBS 混合割合を増加させた場合、再生骨材コンクリート、あるいは改質再生骨材コンクリートの強度特性が変化するのではないかと考えられる。

(2) 空隙率

図-5 にコンクリートの総空隙率を、細骨材部分、粗骨材部分、遷移帯を含むセメントペースト (CP) 部分の空隙率に分類して示す。この時、骨材部分の空隙率は、骨材の空隙がコンクリート内でも変化しないと仮定し、骨材の空隙率と単位体積との積から算出した。遷移帯および CP 部分の空隙率は、総空

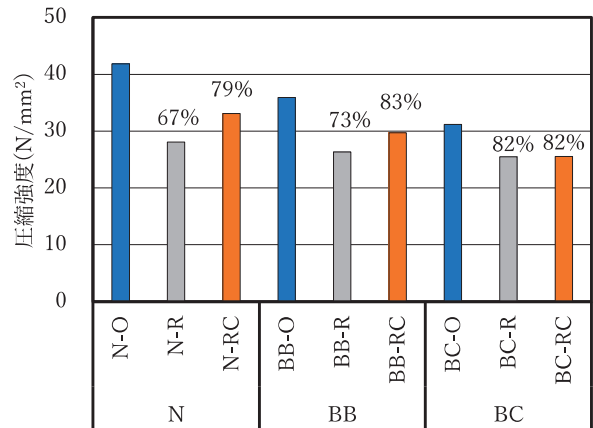


図-4 コンクリートの圧縮強度

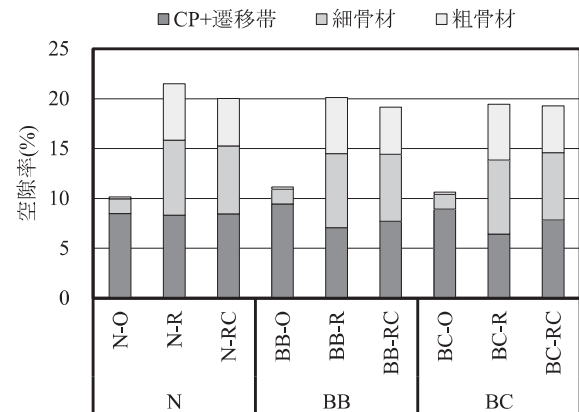


図-5 コンクリートの空隙率

隙率から骨材部分の空隙率を引くことにより算出した。まず、コンクリートの総空隙率に着目する。N では、N-RC が N-R の総空隙率を下回った。BB でも、BB-RC が BB-R の総空隙率を下回ったが、N よりも減少度合いは小さい。BC では、BB-RC と BB-R の総空隙率は同程度となった。図-3 で示すように骨材の改質により、骨材自体の空隙率は減少しているのに関わらず、コンクリートの総空隙率は同程度となった。そこで、次に 遷移帯および CP 部分の空隙率に着目する。N ではいずれの骨材種でも同程度の空隙率であった。これに対し、BB、BC では共に、普通骨材、改質再生骨材、未改質再生骨材の順に空隙率が減少することが確認された。

以上の圧縮強度試験結果と空隙率試験結果から、GGBS 混合割合が増加した際、再生骨材の改質による圧縮強度改善効果が異なることが確認され。これは、未改質再生骨材と GGBS を併用することで、遷移帯および CP 部分の空隙が緻密化したことにより、圧縮強度が増進し、改質再生骨材を用いた時と同程度の圧縮強度になるのではないかと考えられる。

3. 改質再生骨材と GGBS 併用時の強度発現メカニズムの検討

GGBS 混合割合の増加により、再生骨材の改質による強度改善効果が異なる要因として、改質前後の再生骨材の付着ペースト・モルタル部分に着目した。表-3 に TG-DTA を用いて測定した改質前後の再生骨材の水酸化カルシウム (CH) および炭酸カルシウム (CC) の割合を示す。なお、測定に使用した試料は、ランダムサンプリングし、縮分して 500g 以上採取し、粉砕機を使用して骨材を全量 150 μ m 以下に微粉砕したものを使用した。CH の割合は再生骨材の改質により減少し、CC の割合は改質により増加していることが確認できる。骨材をプレウェッティングしたことで、付着ペースト・モルタルの空隙内の水分中には Ca^{2+} が溶け出していると考えられるが、骨材の改質前後で溶け出す量や、硬化体に与える影響が異なると考えられることから、 Ca^{2+} が硬化体の強度特性に与える影響を整理するため、3 つの検証を行った。

3.1 骨材中の Ca^{2+} 溶出試験

(1) 試験概要

まず、改質前後の再生骨材から硬化体中の液相への Ca^{2+} の溶出を確認するため、図-6 に示すように純水に NaOH を添加することで pH を調整した 300mL の模擬溶液に、ランダムサンプリングした 100g の粗骨材 (表-1 の RG, RGC) を浸漬し、ビーカー内の溶液が逸散しないようラップで密封し 1 週間静置した。1 週間静置後にコンパクト Ca^{2+} メーターで上澄み溶液中の Ca^{2+} 濃度を測定した。なお、測定値は 3 回の試験結果の平均値とした。模擬溶液は、普通ポルトランドセメント (N)、高炉セメント A 種 (BA)、高炉セメント B 種 (BB)、高炉セメント C 種 (BC) を使用した、W/C: 50% のコンクリート中の細孔溶液と同等と考えられる pH の溶液作製した。各セメントの模擬溶液の pH、OH-濃度は表-4 の通りであり、各値の設定は以下のように行った。既往の知見によると、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ はコンクリートの pH を高アルカリに維持する働きがあり、N セメントを用いたコンクリートでは pH は 13 程度の値である⁴⁾が、結合材中の GGBS の混合割合が多くなるに従い、生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量は線形的に減少し、pH が低下する⁵⁾と報告されている。また GGBS の混合割合の増加に従い、OH-濃度が低減すること⁶⁾などが報告されている。これらの知見を参考に、本検討では N, BA, BB, BC の pH を 13.0, 12.5, 12.0, 11.5 に設定した。この pH に達する OH-濃度を表-5 に示す通りに算出し、NaOH を添加することによって設定した pH (OH-濃度) になるよう溶液を作製した。そして、異なる pH

表-3 再生骨材中の CH および CC の割合

骨材種	CH 量(%)	CC 量(%)
RS	3.04	8.05
RSC	2.05	15.05
RG	2.80	6.88
RGC	2.20	10.63

表-4 作製した模擬溶液

模擬したセメント種	pH	OH-濃度(mol/L)
N	13.0	0.10000
BA	12.5	0.03160
BB	12.0	0.01000
BC	11.5	0.00316

表-5 OH-濃度の算出方法

セメント種(pH)	pOH	OH-濃度(mol/L)
N(13.0)	14.0-13.0=1.0	$10^{-1.0}=0.10000$
BA(12.5)	14.0-12.5=1.5	$10^{-1.5}=0.03160$
BB(12.0)	14.0-12.0=2.0	$10^{-2.0}=0.01000$
BC(11.5)	14.0-11.5=2.5	$10^{-2.5}=0.00316$



図-6 Ca^{2+} 溶出試験の手順

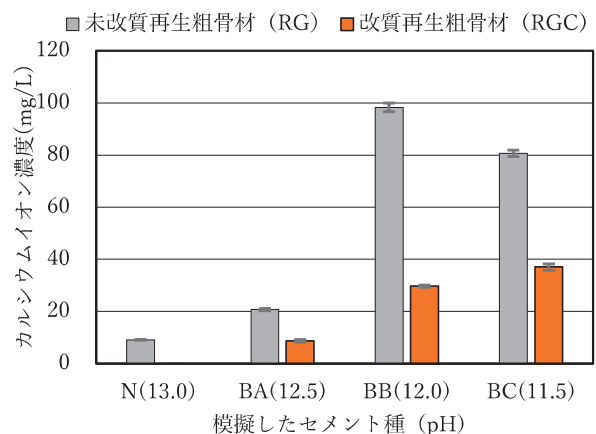


図-7 模擬溶液中の Ca^{2+} 濃度

の溶液における骨材からの Ca^{2+} の溶出量を検討した。

(2) 試験結果および考察

図-7 に各セメントの模擬溶液中の Ca^{2+} 濃度を示す。まず、骨材の改質の有無による Ca^{2+} 濃度の違いに着目する。いずれのセメント種においても、改質再生粗骨材よりも未改質再生粗骨材のときの Ca^{2+} 濃

度が高い結果となった。これは、骨材の炭酸化によって再生粗骨材の CH 量が減少したことや、付着ペースト・モルタルの空隙が緻密になったことが要因だと考えられる。次に GGBS 混合割合の変化による Ca^{2+} 濃度の違いに着目する。骨材の改質の有無にかかわらず、N と比較して、GGBS の混合割合が高い BB や BC で Ca^{2+} 濃度が高くなることが確認された。これは、GGBS 混合割合の増加により模擬溶液の pH が減少し、付着ペースト・モルタルの空隙内と、模擬溶液中との濃度勾配が大きくなり、 Ca^{2+} が溶出し易くなったためだと考えられる。これより、骨材の空隙構造の違いや濃度勾配の大小により、再生骨材中の Ca^{2+} の移動のし易さが異なると推察される。

3.2 付着ペースト中の Ca^{2+} が強度に与える影響

(1) 試験概要

次に、GGBS 使用時に再生骨材中の Ca^{2+} が硬化体の強度に与える影響について確認するため、CH 量を変化させた未改質再生細骨材を使用したモルタルを用いて検討を行った。セメントは N、BC を使用し、骨材は表-1 の RS を、48 時間プレウェッティング後に自然乾燥にて表乾状態にした場合 (RS)、飽和 CH 溶液に真空中で 6 時間含浸後に表乾状態にした場合 (RS-CH) の 2 種類を使用した。W/B : 55%，結合材と砂の質量比を 1:3 で一定とした。そして、40×40×160mm サイズの角柱供試体を作製し、JIS R 5201 に準拠し圧縮強さ試験を実施した。供試体は打ち込みから 2 日後に脱型し、脱材齢 28 日まで封緘養生を行った。

(2) 試験結果

図-8 に CH 含浸の有無が圧縮強さに及ぼす影響を示す。N では、CH 含浸の有無にかかわらず圧縮強さは同程度だったものの、BC では CH 含浸によって圧縮強さが向上した。これより、GGBS 硬化体において、付着ペーストの空隙内の Ca^{2+} が強度に影響を与えている可能性があると考えられる。これは、骨材の空隙内の Ca^{2+} が遷移帯やその周辺の空隙に移動し、GGBS の反応に寄与し、遷移帯やその周辺の空隙が緻密化し強度が増進したと推察される。

3.3 硬化体内での Ca^{2+} の溶出効果の確認

(1) 試験概要

最後に、硬化体内で再生骨材内から Ca^{2+} が溶出するには、水分の連続性が必要で、含水状態を調整した骨材を使用することで Ca^{2+} の溶出効果が間接的に把握できると考えた。そこで、改質前後の再生細骨材を、表乾状態から自然乾燥することによって含水状態を表-6 に示す通りに、A~C の状態に調整し、N、BC でこれらの骨材を用いてモルタルを作製し、3.2 と同様の方法で圧縮強さ試験を実施した。配合

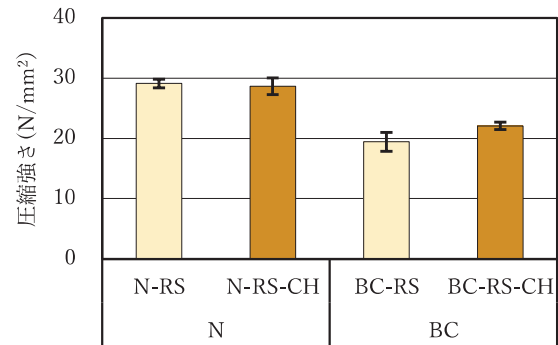


図-8 CH 含浸の有無が圧縮強さに与える影響

表-6 再生細骨材の含水状態

記号	含水状態	A からの質量変化率(%)	含水率 (%)
RS-A	A	-	11.6
RS-B	B	-3.5	8.1
RS-C	C	-6.6	5.0
RSC-A	A	-	10.3
RSC-B	B	-3.3	7.0
RSC-C	C	-6.3	4.0

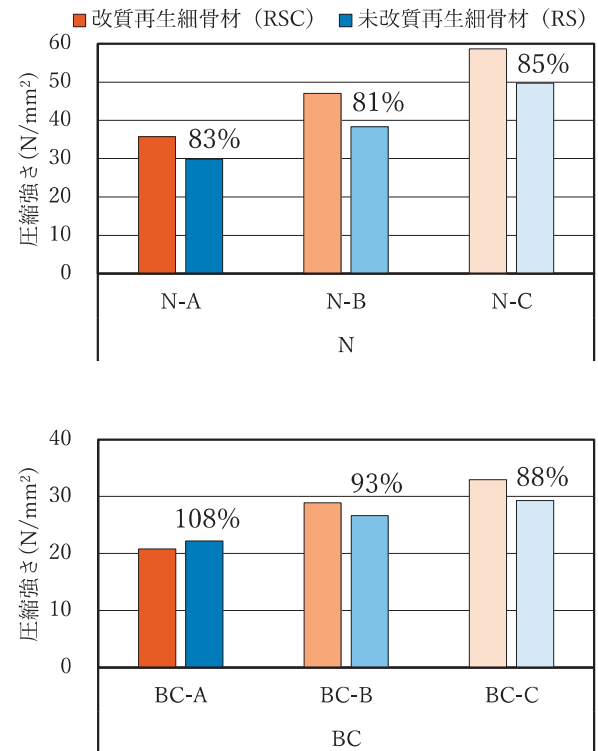


図-9 各含水状態の圧縮強さと強度比 (RS/RSC)

は W/B : 55%，結合材と砂の質量比を 1:3 とし、供試体は打ち込みから 2 日後に脱型し、材齢 28 日まで封緘養生を行った。

(2) 試験結果および考察

図-5 に各含水状態におけるモルタルの圧縮強さと、改質再生細骨材使用時に対する未改質再生細骨材使用時の圧縮強さ比を示す。N では、各状態で改質再生骨材に対して 8 割程度の圧縮強さであるのに対し、BC では状態 A（表乾状態）では 1.1 倍、状態 C では 9 割弱であった。これより、未改質再生骨材が十分に水分を含んでいる表乾状態では、骨材の空隙中から Ca^{2+} が遷移帯やその周辺の空隙に溶出し、GGBS と反応したことで、骨材界面を緻密にしたのではないかと推察される。

4. まとめ

本研究では、炭酸化により改質した低品質再生骨材と GGBS を併用した硬化体の強度特性の把握するため、GGBS 混合割合によるコンクリートの強度・空隙率への影響の検討や、再生骨材の付着ペースト・モルタルに着目し、含水状態や空隙内の CH 含有量などの条件を変化させた場合の検討を行った。以下に本研究から得られた知見を示す。

- (1) N を用いた場合、再生骨材の改質によりコンクリートの圧縮強度は改善するが、GGBS 混合割合を増加させた BC では、再生骨材の改質前後で同程度の圧縮強度であった。空隙率試験の結果から、未改質再生骨材と GGBS の併用により、遷移帯を含む CP の空隙が緻密になり、強度が増進したためだと推察された。
- (2) 各セメントの模擬溶液に改質前後の再生粗骨材を浸漬させた場合の Ca^{2+} 溶出量は、骨材種では改質再生粗骨材よりも未改質再生粗骨材が多く、模擬溶液のセメント種では pH の低い BB、BC が多かった。これは改質前後で骨材の付着ペースト・モルタル部分の空隙構造が異なることや、空隙中と模擬溶液中との濃度勾配により、 Ca^{2+} の移動し易さが異なるためだと推察された。
- (3) 未改質再生細骨材と、CH 含侵した未改質再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強さは、N の場合、CH 含侵の有無にかかわらず同程度の圧縮強さであったが、BC では CH 含侵により圧縮強さが向上することが確認された。これは、骨材の空隙内の Ca^{2+} が遷移帯やその周辺の空隙に移動し、GGBS の反応に寄与し、遷移帯やその周辺の空隙が緻密化し強度が増進したとためだと推察された。

- (4) 含水状態を 3 種類に調整した改質前後の再生細骨材を用いたモルタルの圧縮強さは、N の場合いずれの含水状態でも、未改質に対して改質は 8 割程度であったが、BC の場合、改質に対して未改質は、表乾状態のとき 1.1 倍、乾燥した状態では 9 割弱であった。これは、表乾状態の未改質再生骨材は、付着ペースト・モルタルの空隙中から Ca^{2+} が遷移帯やその周辺の空隙に溶出し、GGBS の反応を促進し、骨材界面を緻密にしたためだと推察された。

謝辞

本成果は、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(JPNP21014)を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発プロジェクトで得られたものです。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 取達剛，森泰一郎，小島正朗：革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術および品質評価技術の開発、コンクリートテクノ、Vol.42, No.1, pp.58-64, 2023.1
- 2) 松田信広，亀山敬宏，松田美奈，伊代田岳史： CO_2 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
- 3) 松田信広，井上優作，伊代田岳史：炭酸化処理による低品質再生細骨材の効果的な改質手法に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 23 巻，pp.23-28, 2023.10
- 4) 太田貴士，橘高義典，松沢晃一：鉄筋を有するコンクリートの中性化による pH の変化と鉄筋腐食に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.652-657, 2012
- 5) 郭度連，國府勝郎，宇治公隆：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの中性化進行速度の評価，土木学会論文集，No.802/V-69, pp.49-59, 2005.11
- 6) 川端雄一郎，山田一夫，松下博通：セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.69, No.4, pp.402-420, 2013