

論文

炭酸化した改質再生粗骨材周辺の脆弱部に関する検討

田 人瑞*1, 伊代田 岳史*2

Experimental Study on the Fragile Part Around Recycled Coarse Aggregate after Accelerated Carbonation Treatment

Renrui TIAN*1 and Takeshi IYODA*2

要旨：近年、高炉スラグ微粉末（GGBS）などの混和材をセメントの代替品として利用する技術が開発されており、CCU材料化された再生粗骨材（CRG）の使用も検討されている。筆者らは普通ポルトランドセメントを用いた再生骨材コンクリートにおける研究で、再生粗骨材（RG）と比較してCRGを用いると、骨材周辺部における遷移帯（ITZ）を代表とする脆弱部の縮小が確認できることを発見した。今後、カーボンニュートラルの実現に向けて、CRGとGGBSを併用した場合の脆弱部の特性を検討する必要がある。本研究では、高炉セメントを使用した場合のRGとCRG周辺のITZの厚さを調査した。その結果、CRG周辺のITZの厚さがRGと比較して増大する傾向が見られた。
キーワード：再生粗骨材、骨材周辺部、炭酸化、遷移帯、水分逸散

1. はじめに

近年、温室効果ガスの削減や気候変動の影響を抑制し、持続可能な未来を実現するため、世界中でカーボンニュートラルが求められている。日本政府は、2050年までに温室効果ガス排出量を全体的にゼロにすることで、カーボンニュートラルを目指すことを宣言した。そのため、カーボンニュートラルの実現に向けて各分野で様々な対策方法が検討されている。建設分野においても、CO₂排出量の抑制のため、高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）などの混和材をセメントの代替品として利用し、セメントの使用量を抑制することで、セメント生産に由来するCO₂排出量を低減したコンクリートが開発されている。また、CO₂を吸収・固定化したCCU材料化された再生粗骨材（以下、CRG）の使用も検討されている。筆者らのグループは、CO₂固定によってCRGを使用することで、普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を用いた低品質再生骨材コンクリートの強度や物質移動抵抗性を大幅に改善できることを報告している¹⁾。また、ミクロな視点から、再生粗骨材（以下、RG）の炭酸化改質により、再生骨材コンクリートにおいてRGと比較してCRGでは、骨材周辺部で遷移帯（以下、ITZ）を代表とする脆弱部の縮小が確認された²⁾。従って、GGBSを使用したコンクリートにおいて、CO₂固定によってCRGを使用した場合でも十分な硬化体物性を示すことができれば、カーボンニュートラルの実現やCRGの普及に大きく貢献でき

ると考えられる。しかし、これについて検討した研究事例はまだ少ない。

なお、コンクリートの強度や物質移動抵抗性は、粗大な空隙に富む不連続な領域である骨材とセメントペーストの界面部分のITZに大きく依存する³⁾。

そこで、本研究では、ミクロな視点から、CRGとGGBSの併用が低品質再生骨材コンクリートにおける再生粗骨材周辺の脆弱部に与える影響について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 再生骨材の製造

本研究の中、再生骨材の製造に用いたコンクリートを原コンクリートと呼ぶ。原コンクリートおよび再生粗骨材の特性を表-1に示す。セメントはOPCと高炉セメントB種（以下、BB）を使用し、材齢35日、養生方法が標準水中養生に設定した。W/Cが45%、55%、65%配合のコンクリートでφ100×200mmの円柱供試体を作製し、材齢35日に簡易な破碎処理（ハンマーによる手動破碎）によってRGを作製した。また、JIS A 5023 附属書Aを参考にし、RGの粒度範囲を5~20mmに調整し、各ふるいを通過する質量百分率を2.5mm:0%、5mm:9.5%、10mm:45%、20mm:95%、25mm:100%程度に調整した。促進中性化装置（温度20℃、湿度60%、CO₂濃度5%）に1週間静置し、CRGを作製した。

*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先進国際課程（兼任土木工学科） 教授

表-1 原コンクリート及び再生粗骨材の特性

| 骨材記号 | 原コンクリート | | | 再生粗骨材 | | |
|---------|---------|---------|---------------------------|-------|---------------------------|---------|
| | セメント種類 | W/C (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 炭酸化状況 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) |
| N65RG | OPC | 65 | 20.7 | なし | 2.25 | 6.06 |
| N65CRG | | | | あり | 2.27 | 5.50 |
| N55RG | | 55 | 33.9 | なし | 2.24 | 4.80 |
| N55CRG | | | | あり | 2.27 | 4.62 |
| N45RG | | 45 | 41.3 | なし | 2.28 | 4.72 |
| N45CRG | | | | あり | 2.34 | 4.58 |
| BB65RG | BB | 65 | 22.5 | なし | 2.24 | 5.25 |
| BB65CRG | | | | あり | 2.28 | 5.91 |
| BB55RG | | 55 | 30.9 | なし | 2.21 | 5.16 |
| BB55CRG | | | | あり | 2.33 | 5.47 |
| BB45RG | | 45 | 39.1 | なし | 2.25 | 5.13 |
| BB45CRG | | | | あり | 2.27 | 5.25 |

ここで骨材記号は、原コンクリートにおいて使用したセメント種類と W/C を示しており、炭酸化改質の有無については、RG と CRG で示している。

(2)再生骨材コンクリートを模擬した供試体の製造

供試体の作製について、セメントは、OPC の 0%、50%、70%を GGBS で置換した N、BB、BC セメントを使用した。配合は、W/C は 50%で一定し、RG を用いた配合と CRG を用いた配合とした。また、骨材周辺部の観察をしやすくするため、細骨材を利用していない。粒度分布を調整した RG および CRG は真空飽水処理を行い、続いて表面水を除去し、表乾状態とした後、JIS A 1138 コンクリートの作り方を参考にし、再生骨材コンクリートを模擬した供試体（以下、模擬コンクリート）を作製した。また、微小硬度試験機の試料台のサイズ要件を満たすため、供試体を φ50×100mm の円柱供試体に設定した。

2.2 試験項目と試験方法

(1) 再生粗骨材からの水分逸散試験

再生粗骨材の高い吸水率が再生骨材コンクリートの強度および物質移動抵抗性に悪影響を及ぼすと考えられる。ミクロな視点から、CRG を使用するとき、ITZ に与える影響を検討するため、まず再生粗骨材から骨材周辺の ITZ への水の挙動の把握が必要である。そこで、RG と CRG は真空飽水処理を行い、続いてウェスで表面水を除去し、表乾状態とした。その後、20℃の恒温恒湿室で静置し、時間経過に伴う脱水による質量変化を3週間まで測定し、水分逸散度を測定した。結果に沿って、再生粗骨材の強制炭酸化処理（以下、炭酸化）により原コンクリートに OPC を用いた再生粗骨材（以下、OPC 再生粗骨材）と原コンクリートに BB を用いた再生粗骨材（以下、BB 再生粗骨材）の水分逸散度の変化を考察した。本研究中では、水分の逸散度は再生粗骨材の単位質量あ

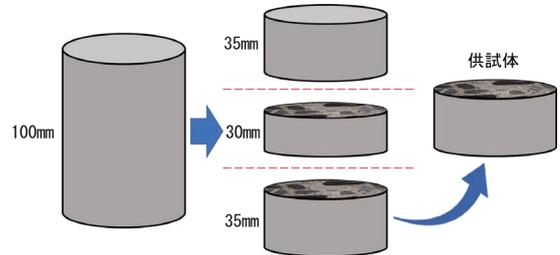


図-1 ビッカーズ硬さ試験の供試体の製作

りの骨材から出る水の重量と定義した。すなわち、1 キログラムの骨材から何グラムの水が出るかの平均値であり、単位は g/kg である。

(2) 模擬コンクリートビッカーズ硬さ試験

打設後 2 日で脱型し、20℃にて材齢 14 日まで水中養生した供試体を用い、以下の試験を実施した。

図-1 に示したように、円柱供試体両端から 35mm 程度切り取り、厚さ 35mm 程度の供試体を作製した。続いて供試体表面を研磨紙 # 120~15000 を用いてターンテーブルで鏡面仕上げした。供試体を 3 日ほど 40℃乾燥炉で静置し、乾燥させた後、再生粗骨材界面のビッカーズ硬さを測定した。

ビッカーズ硬さの測定には、微小硬度試験機を使用し、荷重 0.9807N、試験力負荷速度 10 μm/s の条件で、骨材端部から 20μm 間隔で 200μm まで測定した。後藤ら⁴⁾の方法を参考にし、ビッカーズ硬さが 80N/mm²以下の範囲を ITZ と定義して ITZ の厚さを求める。また、測定は、骨材の上下左右 4 つ方向で行い、平均値として算出した。

3. 試験結果および考察

3.1 再生粗骨材からの水分の逸散速度の考察

図-2 に RG と CRG の 3 週間までの水分逸散度を示した。W/C に関わらず、OPC の場合に炭酸化によ

って逸散度が減少したが、BB の場合に炭酸化によって逸散度が増加した。また、最初の24時間では、水分が再生粗骨材の表層から急速に蒸発し、その後1週間まで、水分は再生粗骨材内部の空隙から徐々に逸散すると考えられる。そして、一般的に、空隙構造がこの水分の逸散速度に影響を与えられられる。そこで、再生粗骨材の空隙特性（以下、空隙特性）の変化と逸散度の関連性を検討するため、24時間から1週間まで逸散度の経時変化を図-3と図-4に示している。OPCの場合、CRGはRGと比較して水分の逸散速度が小さくなった。これは、CRGは水分逸散を抑制する空隙構造が存在しているためと考えられる。一方、BBの場合、CRGはRGと比較して水分の逸散速度が急激に増加した。これは、BBの場合に炭酸化する水和物は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ よりC-S-Hの炭酸化が卓越するため、炭酸化によってC-S-Hが CaCO_3 と SiO_2 に分解され、水が逸散しにくく、複雑な空隙構造から、水が逸散しやすく、単純な空隙構造に変化した⁵⁾。そして、水分逸散が促進されたためと考えられる。

3.2 模擬コンクリート

図-5～図-10に、ビッカース硬さ試験で測定したITZの厚さと吸水率の関係を示す。凡例では、配合条件を「骨材種類-セメント種類」で示している。

OPC再生粗骨材の場合、原コンクリートのW/Cに関わらず、図-5に示したように、Nと併用した場合、炭酸化改質による吸水率の低下に伴い、ITZの厚さが縮小した。これは、既報の文献と同様に再生粗骨材から骨材周辺部に逸散する水分の量の減少に伴い、ITZの厚さが減少することが示唆された⁶⁾。図-6に示したように、BBと併用した場合、炭酸化改質による吸水率の低下に伴い、ITZの厚さの変化が不明確である。図-7に示したように、BCと併用した場合、炭酸化改質による吸水率の低下に伴い、ITZの厚さが増大した傾向があった。従って、CRGとBB、BCと併用した場合、CRGとNと併用した場合より、骨材の周辺に広く脆弱部が形成したことが示唆された。一方、この相違が生じる原因はまだ不明確であるので、今後続いて研究する必要がある。

BB再生粗骨材の場合に、図-8、図-9および図-10に示したように、原コンクリートのW/Cを問わず、CRGとN、BB、BCと併用した場合、炭酸化改質による吸水率の増大に伴い、ITZの厚さが増大した。これは、BB再生粗骨材の場合に前述の通り炭酸化改質により空隙が粗大化し、吸水率が増大することで、骨材周辺部へ逸散する水の量が大きくなり、骨材周辺の水の量が他のペースト部のより高くなり、セメント粒子がイオンとなり拡散した。これらのイ

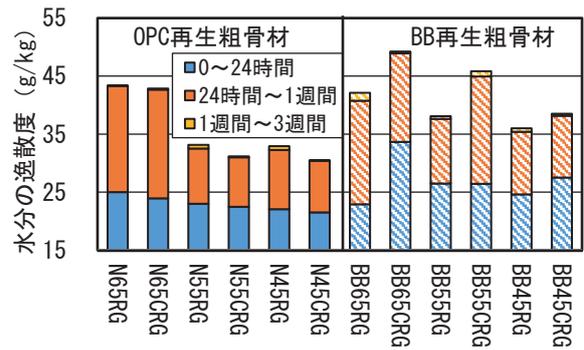


図-2 3週間までの水分逸散度

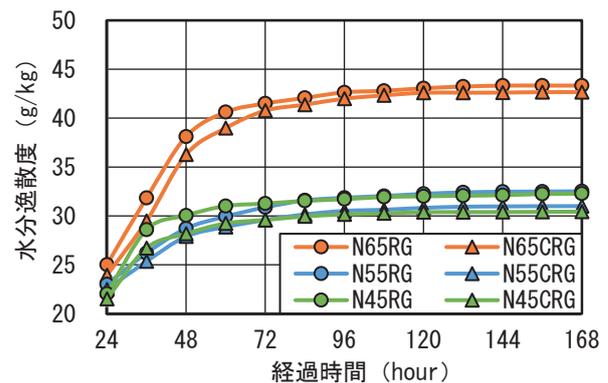


図-3 24時間~1週間まで逸散度の経時変化 (OPC)

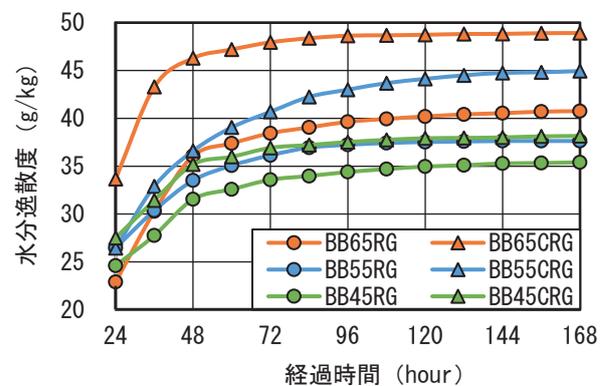


図-4 24時間~1週間まで逸散度の経時変化 (BB)

オンは、界面領域の空隙量が多く結晶の生成のための空間が大きいことから、他のペースト部分よりも大きな結晶となって凝集し⁷⁾、再生粗骨材周辺に厚いITZを形成したことが示唆された。一方、水がITZに影響を与えるメカニズムはまだ不明確であるので、今後続いて研究する必要がある。

また、RGとCRGを比較して吸水率の変化率が同じ程度であれば、ITZの厚さの変化量はOPC再生粗骨材よりBB再生粗骨材の方が顕著に大きくなった。従って、炭酸化によってBB再生粗骨材は同じ時間あたりの水分の逸散度（水分の逸散速度）の増加量がOPC再生粗骨材のより大きくなる可能性があったことが示唆された。

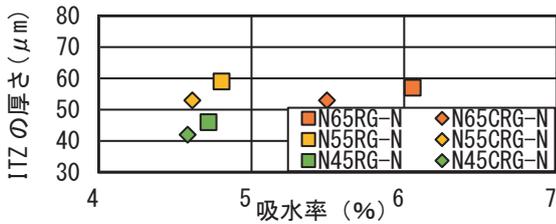


図-5 OPC 再生粗骨材と N を併用した場合の ITZ の厚さ

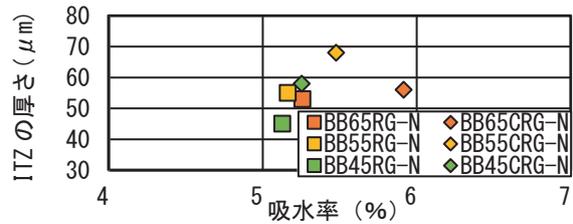


図-8 BB 再生粗骨材と N を併用した場合の ITZ の厚さ

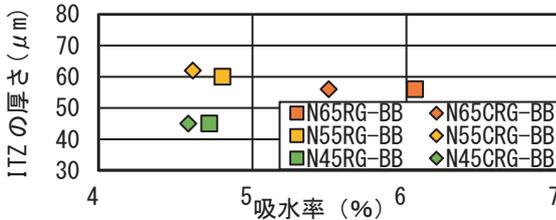


図-6 OPC 再生粗骨材と BB を併用した場合の ITZ の厚さ

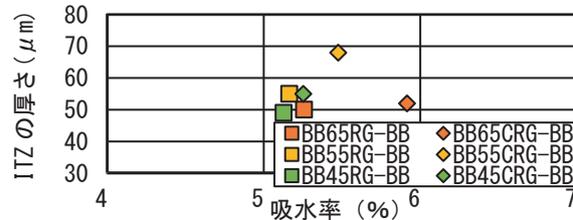


図-9 BB 再生粗骨材と BB を併用した場合の ITZ の厚さ

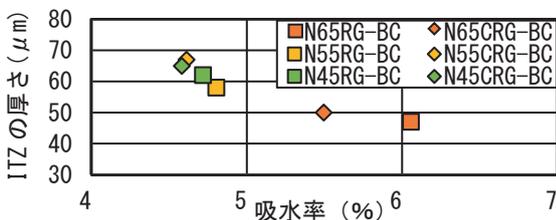


図-7 OPC 再生粗骨材と BC を併用した場合の ITZ の厚さ

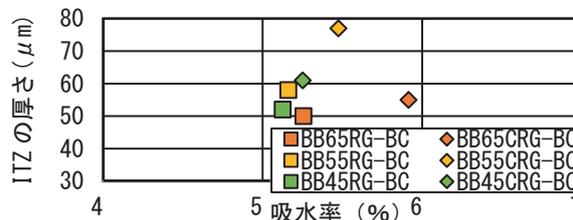


図-10 BB 再生粗骨材と BC を併用した場合の ITZ の厚さ

4. まとめ

- (1) 原コンクリートにおいて OPC セメントを用いた再生粗骨材と普通ポルトランドセメントを併用した場合、炭酸化改質により、吸水率が改善し、ITZ の厚さが縮小することを確認した。
- (2) 原コンクリートにおいて OPC セメントを用いた再生粗骨材と高炉セメント C 種を併用した場合、炭酸化改質により、吸水率が低下したが、ITZ の厚さが増大する傾向がある。
- (3) 原コンクリートにおいて BB セメントを用いた再生粗骨材と普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および高炉セメント C 種を併用した場合、炭酸化改質により、吸水率が増大し、ITZ の厚さが増大することがわかった。
- (4) 炭酸化により BB 再生粗骨材の水分の逸散速度は OPC 再生粗骨材の水分の逸散速度と比較して顕著に増加し、ITZ の厚さの変化量が大きくなった。

参考文献

- 1) 松田信広, 伊代田岳史: 炭酸化による低品質再生コンクリートに与える影響, コンクリート工学論文集, Vol.30, No.1, pp.65-76, 2019
- 2) Jian Liu, Kunlin Ma, Jingtao Shen, Youjun Xie,

Guangcheng Long : Influence of CO₂ enhancement of recycled aggregate on microstructure of ITZs in recycled concrete , Construction and Building Materials, Vol.65, pp.1-17, 2023

- 3) 内川浩: セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995
- 4) 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, 土木学会東北技術研究発表会, V-40, pp.604-605, 1998
- 5) 水野博貴, 伊代田岳史: 炭酸化した高炉セメント硬化体の空隙構造変化が水分浸透性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.665-670, 2019
- 6) 大即信明, 西田孝宏, Pitiwat Wattanachai , 陳旭: 骨材周辺の境界相がコンクリートの Cl⁻拡散係数に与える影響に関する実験的研究, 「材料」(Journal of Society of Materials Science, Japan), Vol.55, No.10, pp.899-904, 2006
- 7) 加藤佳孝, 西村次男, 魚本健人: 骨材周囲の遷移帯厚さ及び空隙率の簡易算定手法の提案, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.308-315, 2009