

再生骨材表層の炭酸化有無が骨材周辺ペーストに与える影響

芝浦工業大学 大学院理工学研究科社会基盤学専攻
芝浦工業大学 工学部土木工学課程

○竹入 陽太
伊代田 岳史

1. はじめ

近年、コンクリート分野における環境負荷低減のために、副産物である高炉スラグ微粉末（以下、GGBS）等の大量使用や、コンクリートやその材料へのCO₂固定、解体コンクリートガラを再生骨材や再生微粉等として再利用する取り組みが行われている。

筆者らは昨年、炭酸化によりCO₂を吸着させた低品質再生骨材とGGBSを併用した環境配慮型コンクリートの強度特性について報告している¹⁾。再生骨材の炭酸化により、骨材自体の絶乾密度および吸水率は改善され、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種と併用した場合、炭酸化前の再生骨材を用いた時と比べ、圧縮強度および空隙率が改善されることを確認している。しかし、高炉セメントC種を用いた場合には、骨材の炭酸化の有無に関わらず、硬化体の圧縮強度および空隙率は同程度であることが確認された。複数の検証により筆者らはこの結果の原因は、炭酸化前の再生骨材に付着する旧ペースト部分（以下、付着ペースト）からのイオン溶出が骨材界面部分を緻密にした可能性があると考えしているが、骨材界面の厚さなどについては検討していない。

そこで本研究では、再生骨材の炭酸化が硬化体中の骨材界面へ与える影響を把握することを目的に、再生骨材を模擬したセメントペーストのブロックを用いた硬化体を作製し、ビッカース硬さ試験を実施し、骨材界面の微小硬さについて検討を行った。

2. 試験概要

2. 1 模擬再生骨材の作製

再生骨材は付着ペーストの量や厚さにばらつきがあると考えられるため、本検討では、セメントペーストで作製したブロックを模擬再生骨材として用いた。模擬再生骨材は、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³）を使用した、水セメント50%のセメントペーストを、16×16×16mmの型枠に打込み、翌日に脱型し、十分に水和させるために材齢28日まで水中養生を行った。その後、気中環境（温度20℃、湿度60%RH）または、炭酸化環境（温度20℃、湿度60%RH、CO₂濃度5%、2日おきに一定量加水）に7日間静置した。7日経過したのち、

各環境4個のブロックを真空にて飽水させ、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乾燥炉（温度40℃、湿度40%RH）で乾燥させ、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。未炭酸化は空隙率37.7%であったのに対し、炭酸化は34.3%となり、3.0%以上空隙率が改善されることが確認された。これより、模擬再生骨材を、未炭酸化のものは「未改質」、炭酸化したものは「改質」と表記する。

2. 2 ビッカース硬さ試験

ビッカース硬度試験用の試験体に使用した材料を表1に、試験体の概要を図1に示す。模擬再生骨材を2日間吸水させ、表面の水分を拭き取った状態で使用した。また、新たに打込むペースト部分（以下、新ペースト）には、普通ポルトランドセメント（OPC）、高炉セメントB種（BB、GGBS置換率：50%）、高炉セメントC種（BC、GGBS置換率：70%）の計3種類のセメントを使用した。以下、配合名は「セメント種－骨材種」とする。試験体の作製方法は、水セメント比50%セメントペーストを、市販の25cm³程度の氷用型枠に高さ半分程度まで流し込み、模擬再生骨材をセメントペースト中に埋め、その上から再びセメントペーストを流し込み、一定時間テーブルバイブレータを用いて打込みを行った。打込みから

表1 使用材料

種類	名称	物性
水	イオン交換水	—
セメント	普通ポルトランドセメント	密度：3.15g/cm ³
	高炉スラグ微粉末4000	密度：2.92g/cm ³
模擬再生骨材	未改質	空隙率：37.7%
	改質	空隙率：34.3%

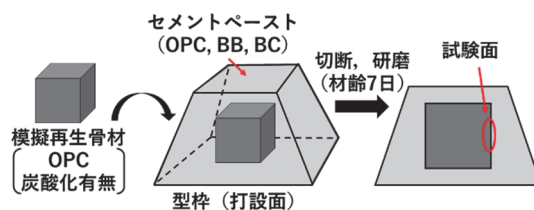


図1 試験体の概要

2 日後に脱型し、材齢 7 日まで封緘養生を行った後、モルタルカッターを用いて、打込み面と垂直となるように切断した。その後、試験体表面を研磨紙#120~10000 を用いてターンテーブル上で鏡面仕上げし、模擬再生骨材界面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：0.2452N、試験力負荷速度 $10 \mu\text{m/s}$ ）を使用し、型枠側面側の模擬再生骨材端部から $20 \mu\text{m}$ 間隔で $300 \mu\text{m}$ まで 3 点ずつ測定し、3 個の試験体の平均値として算出した。

3. 試験結果および考察

図 2 に OPC 配合のビッカース硬さを示す。模擬再生骨材界面から離れた部分においては、OPC-未改質、OPC-改質で大きな差は確認されなかった。模擬再生骨材界面付近においては、硬さが一定になるまでの距離（以下、脆弱部の厚さ）は OPC-未改質では $100 \mu\text{m}$ 程度、硬さの最小値は 20N/mm^2 程度であった。OPC-改質では脆弱部の厚さは $50 \mu\text{m}$ 程度、硬さの最小値は、 60N/mm^2 程度であることが確認された。図 3 に BB 配合のビッカース硬さを示す。OPC 配合と同様に脆弱部の厚さは、BB-未改質が上回り、硬さの最小値は BB-改質が上回ることが確認された。しかし、OPC 配合と比べ、改質前後での差が小さくなる傾向が確認された。図 4 に BC 配合のビッカース硬さを示す。全体として BC-改質が BC-未改質を下回り、OPC 配合や BB 配合とは異なる結果となった。脆弱部の厚さに関しては、BC-未改質が $80 \mu\text{m}$ 程度、BC-改質が $120 \mu\text{m}$ 程度であり、硬さの最小値は、BC-未改質が 60N/mm^2 程度、BC-改質は 30N/mm^2 程度であり、OPC 配合とは反対の結果であった。

そこで、図 5 に GGBS 置換率と、脆弱部の厚さおよび硬さの最小値の関係を示す。まず、未改質の場合に着目する。GGBS 置換率の増加に伴い、硬さの最小値は増加し、脆弱部の厚さは GGBS 置換率が 70% の時に顕著に減少することが分かる。これは、GGBS 置換率 0% の時は、空隙率の大きい模擬再生骨材内部の水分が、新ペースト中に滲出し、実質水セメント比が増大したことで、脆弱部分が大きくなったと考えられる。一方、GGBS 置換率が増大した場合には、滲出した水分が高炉スラグ微粉末の反応に利用されたのではないかと推察される。次に、改質の場合に着目する。GGBS 置換率 0% の時は、模擬再生骨材を炭酸化させたことで空隙率が減少し、滲出する水分も減少したことで、脆弱部分が小さく、硬さの最小値も大きくなったと考えられる。一方、GGBS 置換率の増大に伴い、脆弱部は厚く、硬さの最小値も減少することが分かる。これは、模擬再生骨材を炭酸化させたことにより、骨材界面の水和を阻害した可能性などが考えられるが、原因については今後さらなる検討を行う必要がある。

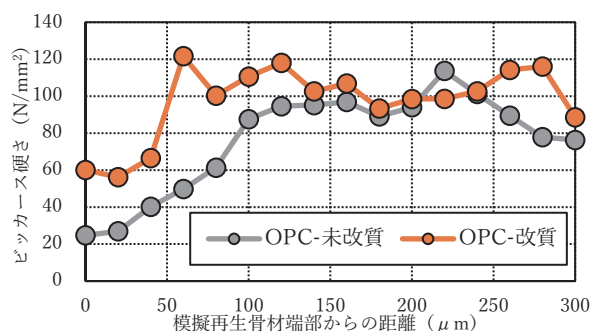


図 2 ビッカース硬さ (OPC)

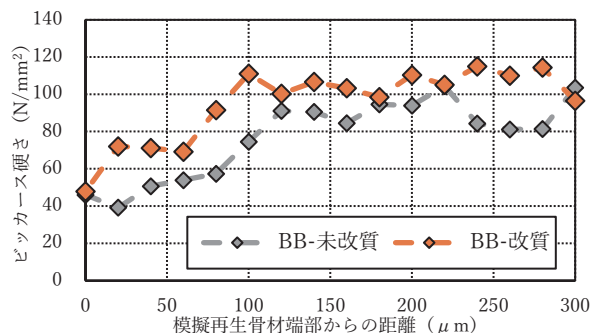


図 3 ビッカース硬さ (BB)

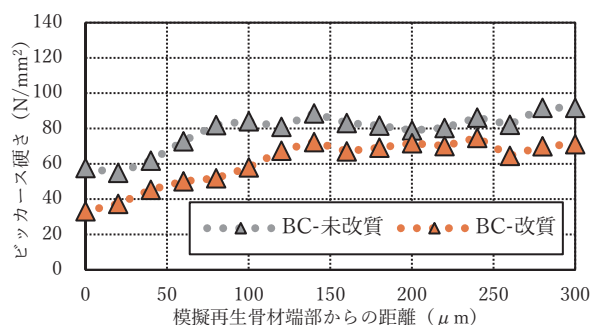


図 4 ビッカース硬さ (BC)

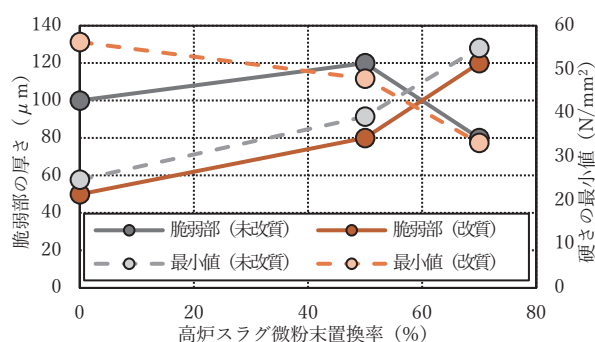


図 5 GGBS 置換率と脆弱部の厚さ・硬さの最小値

【参考文献】

- 1) 竹入陽太、伊代田岳史、池尾陽作：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、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 24 巻、pp.45-50、2024. 10