

セメント硬化体の炭酸化反応を活用した 再生骨材の高品質化に関する研究

高知工科大学 教授 大内 雅博

概要：

本研究の目的は、二酸化炭素を活用して再生骨材の高品質化技術を構築することである。物質循環の行き止まりとなっているコンクリートの現状を改善し、セメント製造に際して燃料以外から排出された分の二酸化炭素をセメント硬化体に吸収・固定させることにより、カーボンニュートラル実現に貢献することを意図している。材料として二酸化炭素のみを用い、日常的にはあり得ない高濃度炭酸水に中品質再生骨材を浸漬し、表面に付着したセメント硬化体を炭酸化して分解・剥離させることによって、もとの骨材の状態に近づける方法である。実験の結果、高濃度炭酸水用のペットボトル内へのゲージ 9 気圧の二酸化炭素注入によるものが最も高い濃度が得られた。これに再生細骨材 M または再生粗骨材 M を 1 週間浸漬させたものが、骨材品質の指標である吸水率の低下量が最も大きかった。ただし、再生骨材 H の基準には到達しなかった。当初目標達成のために、炭酸水の一層の高濃度化または炭酸化反応の促進手法の必要性が明らかになった。

キーワード：再生骨材、炭酸化、炭酸水、高品質化、吸水率

1. 本研究の目的と意義

本研究の目的は、二酸化炭素を活用して再生骨材の品質を高める技術を構築することである。再生骨材の品質を高めるための、原骨材からのセメント硬化体の剥離に際しての加熱処理を不要にする。物質循環の行き止まりとなっているコンクリートの現状を改善し、セメント製造に際して燃料以外から排出された分の二酸化炭素をセメント硬化体に吸収・固定させることにより、カーボンニュートラル実現に貢献する。再生骨材の利用促進と骨材資源の有効利用にも貢献する。

コンクリートの強度をつかさどるセメント硬化体（カルシウムシリケート水和物：C-S-H）は通常環境条件下では炭酸化による分解速度が極めて低く、50～100 年と言われる構造物の供用に不都合は生じない程度である¹⁾。一方、本研究では、材料として二酸化炭素のみを用い、日常的にはあり得ない、市販炭酸水の数倍の高濃度炭酸水に中品質再生骨材（レベル M）を浸漬し、表面に付着したままのセメント硬化体を効率的に炭酸化・剥離させて高品質化する技術を開発する。

コンクリートは常温常圧の大気中において自然エネルギーでは物質循環しない材料である。地球上で何億年もかけて出来上がり、供給量が有限である鉱物由来の資源を用いるコンクリートは、その使用後に原材料に戻る事が出

来ないのが現状である。人類が短期間に消費してしまえば、いずれ材料供給が途絶えることになる。また、コンクリートには処分の問題もある。現状のままでは、いずれ最終処分場が廃棄コンクリートでいっぱいになり、廃コンクリートの行き場がなくなかねない。本研究はコンクリート材料の資源供給と廃棄問題の両方を解決することに役立つ。

既往の類似研究は、コンクリート材料の再利用技術の現状は、原材料に戻すものではなく、コンクリート中のセメント硬化体をそのまま使用するものである。物質循環の行き止まりとなっているコンクリート材料の現状を解決する技術は存在しない。

一方、本研究は、再生骨材表面に付着したセメント硬化体を二酸化炭素により炭酸化し、炭酸カルシウム（石灰石の主成分）に戻すことに新規性がある。セメント硬化体の炭酸カルシウム化は、自然界においてセメント硬化体よりも化学エネルギーの低い、安定した状態に戻すことを意味する。セメント製造の際に石灰石から解放された二酸化炭素をセメント硬化体に固定して戻すことに、合理的なリサイクルである。

2. 研究手法の概要

内部を加圧可能な容器中に、上部に空間を残して水を入れ、再生骨材 M を投入する。密閉した容器内に高圧 CO₂

を注入し、内部の絶対圧を高めることにより、水中の溶存二酸化炭素濃度を高める。

炭酸水中での、コンクリート中のセメント硬化体の成分であるカルシウムシリケート水和物 ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) を炭酸化させて炭酸カルシウム CaCO_3 に変化させ、骨材両面からセメント硬化体を剥離させる。そして、品質の向上効果を定量化する。

3. 高濃度炭酸水の調製方法の構築

最初に、本研究の鍵となる高濃度炭酸水の調製方法とその効果を調べた (図-1)。炭酸濃度は CarboQC (Anton Pear 製) の体積膨張法によった。最も水中炭酸濃度が高かったのは、絶対 10 気圧まで耐えることのできる市販高濃度炭酸水用のペットボトル (容量 1 L) に逆止弁を取り付けたものであった。二酸化炭素注入後ろに手で 100 往復の振とう作業を行った結果、市販炭酸水 (アサヒ飲料・ウィルキンソン) の濃度 1.5 倍以上の炭酸水を調製可能であった。一方、汎用加圧容器は、最大耐圧力がゲージ 4 気圧であることに加えて、その大きさと重さから振とうが不可能であり、炭酸濃度が市販炭酸水の 4 分の 1 程度に留まった。

以上から、本研究では、逆止弁を取り付けたペットボトル内への絶対 9 気圧の二酸化炭素を注入し、振とうすることにより調製した高濃度炭酸水へ再生骨材を浸漬することにより調製した高濃度炭酸水へ再生骨材を浸漬することを基本的手段とした (図-2)。

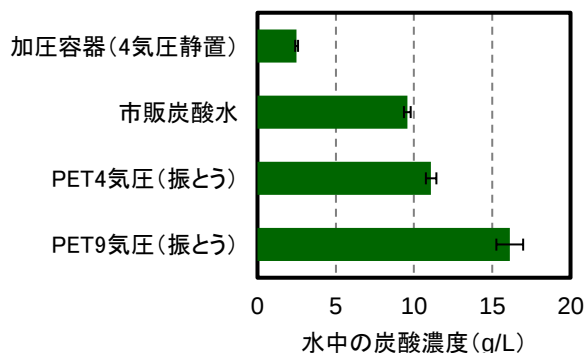


図-1 各炭酸水の濃度 (体積膨張法による測定; 各 3 回の平均値と標準偏差を示した)



図-2 ペットボトルに逆止弁を取り付けて調整した高濃度炭酸水への再生骨材の浸漬

4. 粗骨材の品質向上効果

再生粗骨材 M を 1 週間浸漬した結果を示す (図-3)。なお、「PET9 気圧」は毎日手で 100 往復振とうしたものの結果である。骨材の吸水率は骨材の品質を示す重要な指標であり、値の低い方が高品質と評価される。

用いた再生粗骨材 M の吸水率は 4.3% であったが、最も効果の高かったものでも 3.9% にしか低下しなかった (図-3)。再生粗骨材 H の規格は 3.0% 以下である。加圧容器により調製した比較的低濃度の炭酸水では、むしろ吸水率が増加する結果となった。

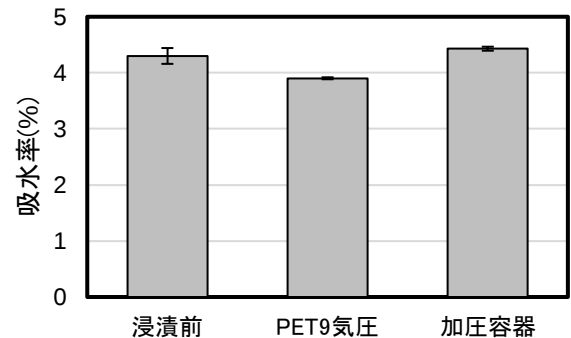


図-3 炭酸水浸漬による再生粗骨材 M の変化

5. 細骨材の品質向上効果

再生細骨材 M を 1 週間浸漬した結果を示す (図-4)。なお、「PET9 気圧」は毎日手で 100 往復振とうしたものの結果である。

用いた再生細骨材 M の吸水率は 5.2% であったが、最も効果の高かったものでも 4.6% にしか低下しなかった (図-4)。再生細骨材 H の規格は 3.5% 以下である。

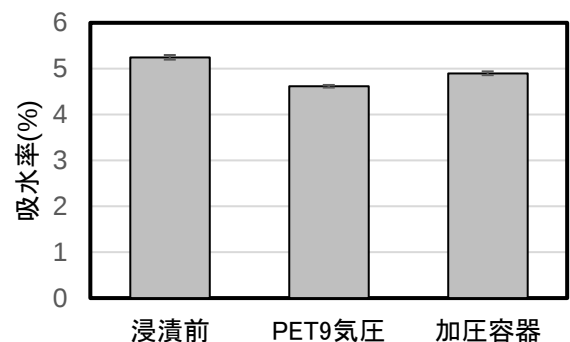


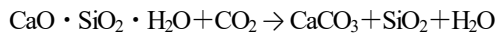
図-4 炭酸水浸漬による再生細骨材 M の吸水率低下効果

6. セメント硬化体の分解が生じていることの確認

熱分析により、再生骨材製造の際の副産物である「再生微粉」の、各方法により調整した炭酸水等 (PET 9 気圧毎日振とう, PET 9 気圧静置, 加圧容器, 水道水浸漬, 大気中静置の 5 ケース) への浸漬前後の炭酸カルシウムおよび水酸化カルシウムの含有率を測定し、その変化を求めた (図-4)。「再生微粉」は主にセメント硬化体由来のものであり、再生骨材表面への付着物と共通の成分である。

その結果、水酸化カルシウム量の変化と炭酸カルシウムの変化には関係が無く、1 桁違う量の大きさから、炭酸カルシウム量の増加は、水酸化カルシウムの炭酸化ではなく、その他の成分、例えばケイ酸カルシウムの炭酸化により生じている可能性を示唆していると言える。

(炭酸化により生じた可能性が高い現象)



(炭酸カルシウムを生じさせたとは言い難い現象)

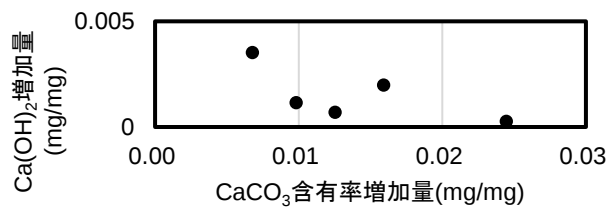
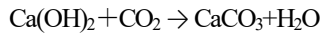


図-4 炭酸水浸漬による再生微粉中の炭酸カルシウムと水酸化カルシウム量の変化

7. まとめ

高濃度炭酸水用のペットボトル内への絶対 10 気圧の二酸化炭素注入によるものが最も高い濃度が得られた。これに再生細骨材 M または再生粗骨材 M を 1 週間浸漬させたものが、骨材品質の指標である吸水率の低下量が最も大きかった。

なお、細骨材の方が比表面積が大きいために炭酸化反応量が大きかったため、同炭酸濃度での粗骨材よりも吸水率低下量が大きかったものと推察した (図-5)。

ただし、再生骨材 H の基準には到達しなかった。当初目標達成のために、炭酸水の一層の高濃度化または炭酸化反応の促進手法の必要性が明らかになった。

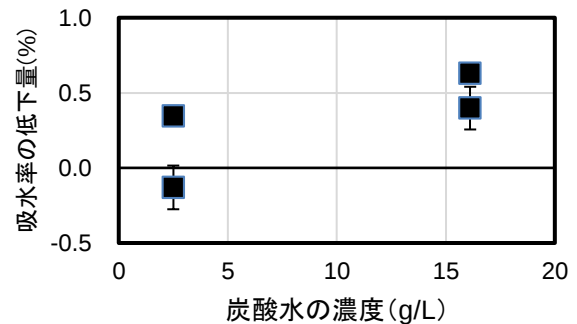


図-5 炭酸水の濃度と再生骨材の吸水率低下量との関係 (各濃度上のプロット：細骨材；下：粗骨材)

謝辞

本研究で使用した再生骨材 M は株式会社京星より御提供いただきました。御高配を賜った取締役 柴谷啓一様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.1～14，1991.
- 2) 石田剛朗，市場大伍，河合研至：C-S-H の炭酸化に及ぼす二酸化炭素ガス濃度の影響，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.347-353，2009.
- 3) 野口貴文，小山明男，鈴木康範：再生骨材および再生骨材コンクリートに関する JIS 規格，コンクリート工学，Vol. 45，No. 7，pp.5-12，2007.