

## 論 文 要 旨

## Thesis Abstract

(yyyy/mm/dd) 2025 年 09 月 02 日

※報告番号	甲第373号	氏名 (Name)	益永カレンみどり Karen Midori MASUNAGA
Mechanisms behind Microstructural Changes Induced by Accelerated Carbonation in GGBS-Blended Hardened Cementitious Materials (促進炭酸化による GGBS 混合セメント硬化体の微細構造変化のメカニズムに関する研究)			
(Abstract) Carbonation mechanisms have been widely investigated in the past, as natural carbonation can cause deterioration of reinforced concrete structures. Previously, the accelerated carbonation was used to predict long-term effects of natural carbonation. However, with the growing interest in Net-Zero emissions and sustainability issues, the use of supplementary cementitious materials (SCM) in combination with Carbon Capture Utilization & Storage (CCUS) strategies creates a new scenario for the carbonation mechanisms' investigation. The combination of accelerated carbonation and SCM, such as ground granulated blast furnace slag (GGBS), presents a promising approach for mitigating CO <sub>2</sub> emissions and enhancing circularity in the cement and concrete industry. Despite extensive research in recent years on accelerated carbonation of cement-based materials, much of the focus has been on maximizing and quantifying CO <sub>2</sub> uptake, mainly assessing CC formation. This emphasis has often overshadowed other critical phenomena such as the decalcification of calcium silicate hydrates (C-S-H) and the behavior of water release during carbonation. It is well known that, for carbonation reactions to occur in cementitious materials, calcium ions must react with CO <sub>2</sub> to form CC. However, in hydrated cement-based materials, this also implies the gradual (partial or total) decomposition of the hydrate phases, a process that is often overlooked. Moreover, after the hydrates' decomposition, water is generated as an additional carbonation product, alongside CC. This aspect has also received limited attention in the study of accelerated carbonation. Considering this background, this study explores accelerated carbonation from a new perspective, focusing on the mechanisms underlying microstructural changes induced by accelerated carbonation in Ordinary Portland Cement (OPC) and GGBS-blended hardened cementitious materials. Through analysis of phase assemblage, comparing OPC and GGBS-blended system, it was found that the decomposition of different hydrates during the reaction with CO <sub>2</sub> and the formation of different carbonation products are responsible for the microstructural transformations, reflected in measurable porosity, mass and dimensional changes. While the formation of CC is largely responsible for mass gain			

※official use only

## 論 文 要 旨

## Thesis Abstract

(yyyy/mm/dd)

2025 年 6 月 20 日

※ 報告番号	甲第 373 号	氏 名 (Name)	益永カレンみどり Karen Midori MASUNAGA
<p>during carbonation, the already reported C-S-H decalcification shrinkage (polymerization of silica chains) appears to be the main factor influencing dimensional change induced by accelerated carbonation, resulting in macroscopic shrinkage, especially in GGBS-blended systems. However, the water behavior (formation and release) upon carbonation seems also to be a significant mechanism governing the microstructural changes and should not be disregarded.</p> <p>Therefore, this research highlights the importance of evaluating microstructural changes induced by accelerated carbonation through an integrated assessment of hydrated phases, carbonation products and water behavior. A comprehensive understanding of these mechanisms is essential for achieving the full potential of accelerated carbonation technologies, particularly in conjunction with SCM, to help drive the cement and concrete industry toward Net-Zero emissions.</p> <p>(内容の要旨)</p> <p>自然炭酸化が鉄筋コンクリート構造物の劣化を引き起こす可能性があることから、炭酸化メカニズムはこれまで広く研究されてきました。これまで、促進炭酸化は自然炭酸化を予測する手法として用いられてきましたが、ネット・ゼロ・エミッションおよびサステナビリティへの関心の高まりを背景に、混和材 (SCM) と Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) 技術の組み合わせによって、炭酸化メカニズムに関する新たな研究のシナリオが生まれつつあります。</p> <p>促進炭酸化と、高炉スラグ微粉末 (GGBS) などの SCM との組み合わせは、セメント・コンクリート業界における CO<sub>2</sub>排出削減および循環性の向上に大きな可能性を有していると考えられます。近年のセメント系材料の促進炭酸化に関する研究の多くは、CO<sub>2</sub>の最大吸収量の定量化、特に炭酸カルシウム (CC) 生成に焦点を当てていますが、C-S-H の脱カルシウム化や、水の挙動 (変化・移動・放出) など、他の重要な現象については十分に検討されていないのが現状です。炭酸化反応の対象が硬化体中のセメント水和物である場合、それらの水和物相は徐々に (部分的あるいは完全に) 崩壊していきませんが、この現象は十分に考慮されないことがあります。さらに、CC に加えて水も炭酸化反応の生成物であることから、この点も促進炭酸化研究においては見過ごされがちです。</p> <p>このような背景のもと、本研究では促進炭酸化によって引き起こされる微細構造の変化メカニズムを新たな視点から検討することを目的とし、普通ポルトランドセメント (OPC) と GGBS を混合したセメント硬化体の促進炭酸化を比較しました。相組成の分析により、OPC 系と GGBS 混合系では、CO<sub>2</sub>との反応に伴って異なる水和物が崩壊し、それにより生成される炭酸化物も異なることが確認されました。これが空隙率や質量変化、長さ変化といった微細構造を工学的アプローチから評価する項目の変化を引き起こす要因となっていることが明らかになりました。CC の生成は主に質量増加に寄与しますが、既に報告されている C-S-H の脱カルシウム化 (シリカゲルの重合収縮) は、特に GGBS 混合系における長さ変化の主な要因と考えられます。一方で、炭酸化に伴う水の挙動も、促進炭酸化による微細構造変化に大きく影響する重要なメカニズムであり、軽視すべきではありません。</p> <p>したがって本研究では、促進炭酸化による微細構造変化を、水和物相、炭酸化生成物、水の挙動という 3 つの要素を統合的に評価することの重要性を強調しています。これらのメカニズムに対する総合的な理解は、特に SCM との併用によって促進炭酸化技術の可能性を最大限に引き出し、セメント・コンクリート業界におけるネット・ゼロ・エミッションの達成に貢献することが期待されます。</p>			