

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 7 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 新潟大学工学部社会基盤工学プログラム

氏 名 : 須田 裕哉

研究課題名 : リアルタイムモニタリング手法を用いたコンクリートの中性化進行に及ぼす環境条件の影響評価

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

リアルタイムモニタリング手法を用いた

コンクリートの中性化進行に及ぼす環境条件の影響評価

Assessment of environmental conditions on carbonation progress due to real-time monitoring method

新潟大学工学部社会基盤工学プログラム 准教授 須田裕哉

（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究ではコンクリートの中性化進行をデジタル画像相関法（以下、DIC）により非破壊かつ連続的にモニタリングできる手法を構築することを目的とした。コンクリートの中性化は大気中の二酸化炭素とセメント水和物の反応によって生じる。中性化はコンクリート内部の鋼材腐食の要因となり、耐久性の観点からこれまで多くの検討が行われてきたが、炭酸化によって、セメントペースト部の組織構造が変質することで巨視的な体積変化である炭酸化収縮が生じることも知られている。近年、脱炭素社会の実現から、混和材を多量に使用した低炭素型のコンクリートの利用が進められており、このようなコンクリートは炭酸化の進行が早く、炭酸化収縮量も大きくなることでコンクリートに微細な損傷が発生することも報告されている¹⁾。一方で、炭酸化収縮は中性化とともに進行することから、収縮による体積変化を捉えることができれば、中性化の進行だけでなく損傷の進展挙動からかぶりコンクリートの変質挙動を明らかにすることが可能と考えられる。そこで、本研究では、材料のひずみ変化を非破壊的に観察することが可能な DIC に着目し、中性化進行に伴うかぶりコンクリートの品質変化を DIC より取得される主ひずみ分布から評価することを目的とした。研究の最終目標は、ケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）の炭酸化進行をマクロな主ひずみ変化として捉え、中性化に伴うかぶりコンクリートの品質変化を非破壊的に評価できる手法を開発することであり、本研究では、基礎的な検討として、中性化進行における材料や配合、環境条件として相対湿度の違いによる主ひずみの変化と中性化進行との関係を調査した。

- 1) Borges, P. H. R. et al.: Carbonation of CH and C-S-H in Composite Cement Pastes Containing High Amounts of BFS. Cement Concrete Research, Vol. 40, pp. 284-292, 2010

実験概要

（1）使用材料・配合および中性化条件

使用材料は、普通ポルトランドセメント（NC）と普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 40% 置換した試料（NB）とし、水結合材比は NC で 50%、80%、NB は 50% とした。表 1 に配合表を示す。試験体はコンクリートとし、 $\Phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体と $75 \times 75 \times 250 \text{mm}$ の角柱供試体を作製し、水中養生下で材齢 1 年以上の養生を行った。その後、コンクリートカッターを使用し、円柱供試体では $\Phi 100 \times 9 \text{mm}$ 、角柱供試体では $75 \times 75 \times 80 \text{mm}$ の試験体を作製した。角柱試験体は、 $75 \times 75 \text{mm}$ の暴露面以外の 5 面をエポキシ樹脂で塗布した。乾燥・炭酸化条件は相対湿度 30%、60%、温度 20℃とし、28 日間の試験体の乾燥を行った。促進中性化試験は CO_2 濃度 5% とし、乾燥時と同一の温湿度条件下で実施された。各試験体の炭酸化日数は、円柱試験体では 56 日間、角柱試験体では 91 日間とした。

表 1 コンクリートの配合

種 類	W/C [%]	G _{max} (mm)	Air [%]	s/a [%]	単位量[kg/m ³]					
					W	C	混和材	S		G
								砕砂	海砂	
NC80	80	20	4.5	44	176	220	-	442	528	918
NC50	50			43	165	330	-	290	504	1032
NB	50		2.9	43	162	194	129	277	481	1027

(2) 試験概要

円柱試験体では、DIC を用いて炭酸化期間中の供試体表面の主ひずみ分布を測定した。円形状の試験体の片面表面に白黒のスペckルパターンを作製し、乾燥および促進炭酸化試験を行った。経時的にスペckルパターンの画像撮影を行い、炭酸化進行に伴う画像の輝度分布を Ncorr より解析することで主ひずみ分布を算出した。解析条件は、Subset radius 25、Subset spacing 5、Strain radius 10 とした。なお、ピクセルあたりの寸法値は、0.023mm/pixel である。また、事前乾燥後および炭酸化期間中にマイクロメータを用いて寸法を経時的に測定し、乾燥前の寸法を基準として収縮ひずみを算出した。供試体の長さの測定は軸方向中心線上に埋め込んだ 4 点の真鍮球を基点とし、マイクロメータで 2 組の標点間距離をそれぞれ測定後、その平均値を標点間距離として算出した。これらに加え、気体の拡散試験装置を用いて、炭酸化前後の酸素の拡散係数を取得した。

角柱試験体では、一次元方向の主ひずみ分布を取得するため、暴露面から垂直方向にコンクリートカッターで 5mm 程度切断し、骨材面を露出させた。その後、エポキシ樹脂を塗布し、骨材の露出面に対してスペckルパターンを作製した。この面を炭酸化期間中に経時的に撮影し、暴露面から深さ方向の主ひずみ分布を DIC により解析した。解析は、円柱の試験体と同条件とした。また中性化領域測定のため、フェノールフタレインの噴霧により、呈色を確認できない箇所を中性化領域とした。

(実験調査によって得られた新しい知見)

(1) 炭酸化進行に伴うひずみの経時変化

図 1 に相対湿度 60%、30%の炭酸化期間中（56 日間）にマイクロメータを用いて寸法値を経時的に測定し、乾燥前の寸法を基準として算出した収縮ひずみの経時変化の結果を示す。図中の 84 日は事前乾燥 28 日と炭酸化 56 日の合計の日数であり、取得されたひずみは乾燥収縮と炭酸化に伴うひずみの合算値として示されている。したがって、28 日目では乾燥収縮ひずみとして示される。図より、乾燥 28 日後では、各試料間で大きな差は確認されず、湿度 30%のひずみが湿度 60%よりも大きく、炭酸化条件に移行すると各湿度でのひずみは大きく増加した。炭酸化後の試料間で比較すると、NC50 と NC80 の収縮ひずみは湿度が同一の場合、大きな差は示されなかった。一方で、NB の収縮ひずみは最も大きい値を示し、いずれの材料においても湿度 30%での炭酸化条件のひずみが大きい値となった。また、炭酸化 28 日（図中 56 日）以降のひずみは大きく変化しておらず、試験体断面内において炭酸化が十分に進行したものと推察される。

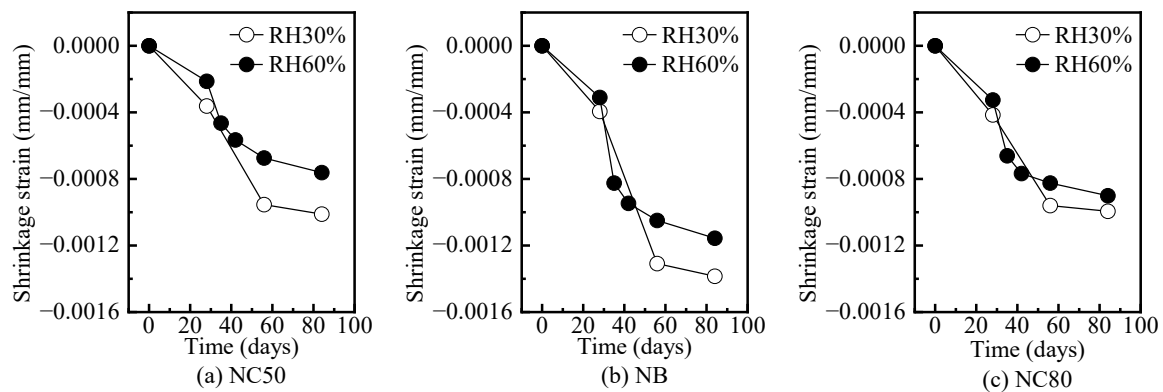


図 1 収縮ひずみの経時変化

(2) 炭酸化前後の酸素の拡散係数

図 2 に円柱試験体の乾燥 28 日間（炭酸化 0 日）と炭酸化 56 日目における酸素の拡散係数を示す。炭酸化前の酸素の拡散係数に着目すると、水結合材比が大きい NC80 の酸素の拡散係数をもっとも大きく、同じ水結合材比である NC50 と NB を比較すると、相対湿度 60% において、NB の拡散係数が NC よりもわずかに小さくなった。炭酸化後の酸素の拡散係数では、相対湿度 30% の NC80 を除いて、いずれの試験体とも炭酸化を行うことで酸素の拡散係数は増加し、特に NB では炭酸化前と比較して、2 倍以上拡散係数が増加した。

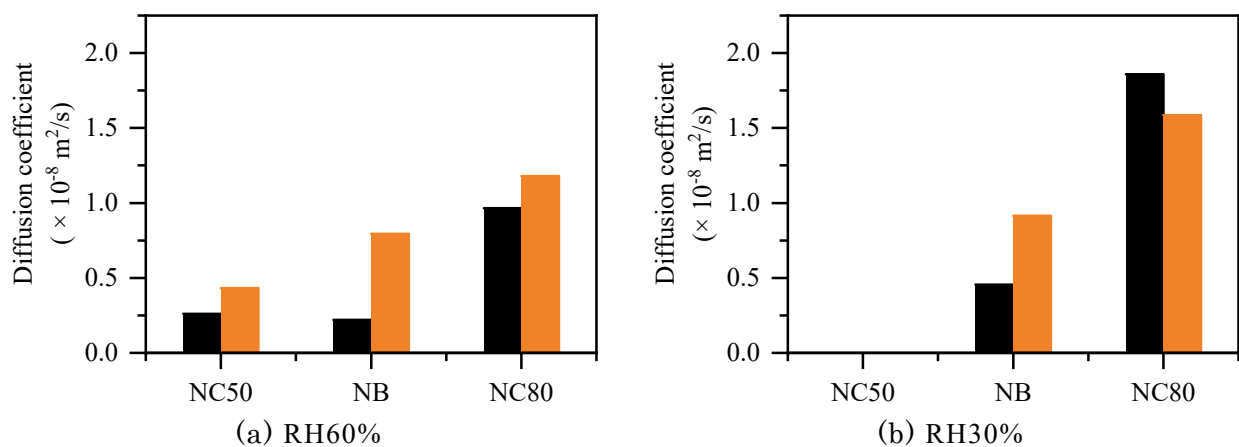


図 2 炭酸化前後の酸素の拡散係数（※相対湿度 30% の NC50 は未測定）

(2) 円柱供試体の主ひずみ分布

相対湿度 60% の環境下で炭酸化を 56 日間行った円柱試験体の DIC による表面の主ひずみ分布の画像と塗布前の円柱試験体の写真を図 3 に示す。粗骨材とモルタルの界面部周辺には正の値で示される引張側の最大主ひずみが分布しており、モルタル部では負の値で示される圧縮側の最大主ひずみが観察された。同水結合比である NC50 と NB の主ひずみ分布を比較すると、高炉スラグ微粉末を置換した供試体において、圧縮側および引張側の主ひずみが大きい傾向を示した。そこで、最大主ひずみの経時変化を定量的に評価するため、引張側と圧縮側の最大主ひずみのそれぞれの平均値を算出した。図 3 に炭酸化 28 日と 56 日における平均最大圧縮ひずみとマイクロメータから求めた収縮ひずみの関係を示す。図より、炭酸化時の湿度が低いほど収縮ひずみと平均最大圧縮ひずみは大きくなり、高炉スラグ微粉末を置換

した試験体では両者の値が大きく、炭酸化時の体積変化が顕著となる結果となった。最大圧縮主ひずみは主にモルタル部に発生しており、マイクロメータで取得された収縮ひずみと圧縮側の主ひずみとの間には材料や炭酸化時の湿度条件の違いによらず正の相関が認められたことから、モルタル部に生じた圧縮側の主ひずみは主として炭酸化に伴う収縮挙動を反映していると考えられる。

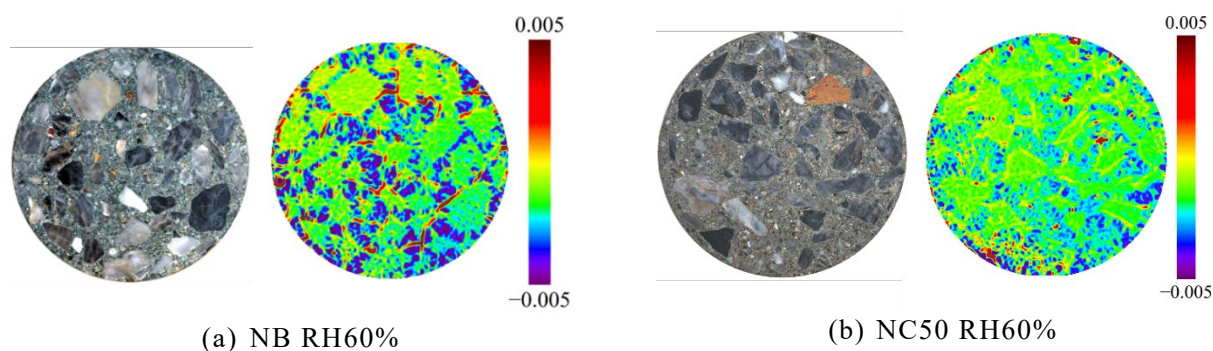


図 3 DIC による円柱供試体の最大主ひずみ分布

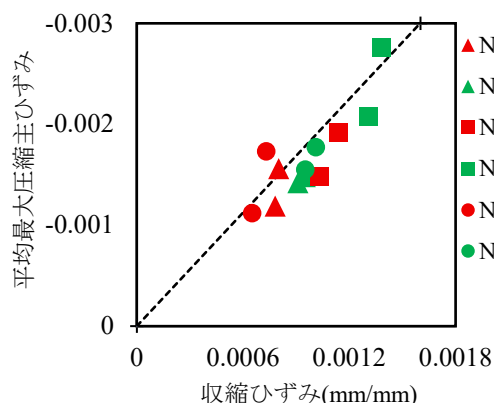


図 4 収縮ひずみと平均最大圧縮主ひずみの関係

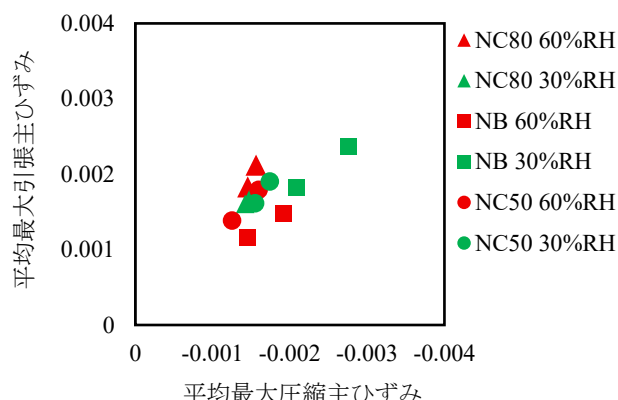


図 5 平均最大主ひずみの圧縮側と引張側の関係

次に、図 5 に DIC より取得された平均最大圧縮主ひずみと平均最大引張主ひずみの関係を示す。両者の間に正の相関が確認されたが、材料間で異なる傾向を示した。図 3 より最大引張主ひずみは主として骨材界面部に発生していることが観察されており、このことからモルタル部の炭酸化収縮により骨材の拘束条件によって界面部で微細な損傷が発生し、引張側の最大主ひずみが観察されたと考えられる²⁾。

図 6 に相対湿度 30%で 28 日、91 日間炭酸化を行った NB と NC80 の角柱試験体の主ひずみ分布とフェノールフタレイン溶液を噴霧後の中性化領域の関係を示す。DIC による主ひずみの結果より、炭酸化の期間が 28 日から 91 日へ進行すると、圧縮側の主ひずみが供試体の暴露面（図中上部）から内部へ分布した。また、中性化領域内では圧縮側の主ひずみが大きく、未中性化領域においても主ひずみが進展していることから、未中性化領域においても炭酸化が生じていると推察される。図 7 に、サブセット間隔（0.138mm 間隔）で整理した曝露面から供試体の深さ方向の圧縮側主ひずみの中央値の分布を示す。NB の結果より、深さ 3mm 以内の領域において、主ひずみの値が大きく、深さ方向に対して主ひずみの値は減少した。炭酸化期間が 28 日から 91 日へ進行すると、深さ 10mm の位置の主ひずみが増加しており、セメントペースト部での炭酸化が進行しているものと考えられる。次に、相対湿度の違いに

着目すると、炭酸화를 91 日間行った NB および NC80 とともに中性化領域内では、相対湿度 30%の方が 60%よりも主ひずみが大きくなり、この傾向は図 1 の収縮ひずみの傾向と一致した。湿度が低い環境下では、セメント水和物である水酸化カルシウムの炭酸化が停滞し、C-S-H の炭酸化が進むことが報告されている³⁾。今後は、セメント水和物の炭酸化状況を踏まえた調査から、かぶりコンクリートの品質変化に関する各種環境条件の影響について検討を進める予定である。

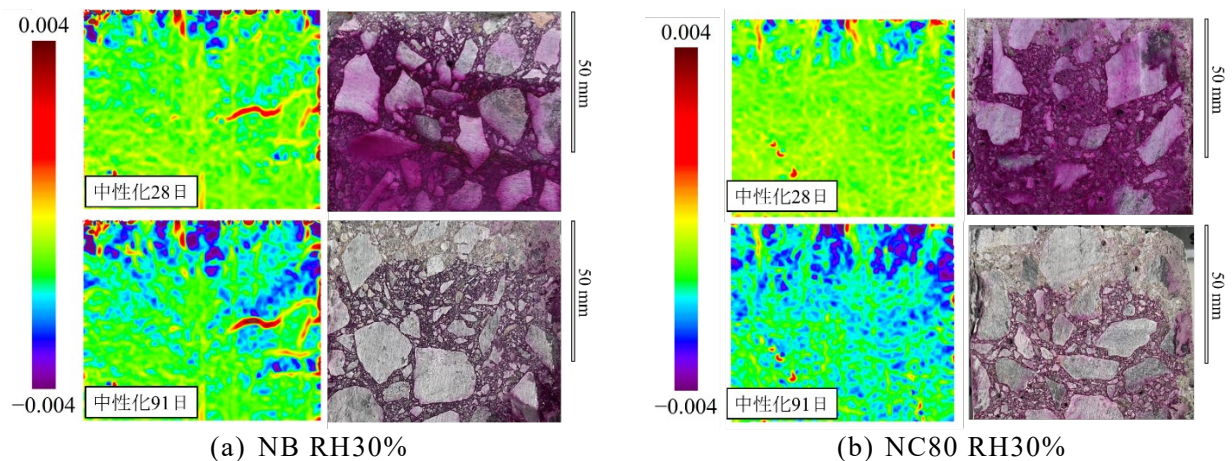


図 7 最大主ひずみの分布と中性化領域の関係

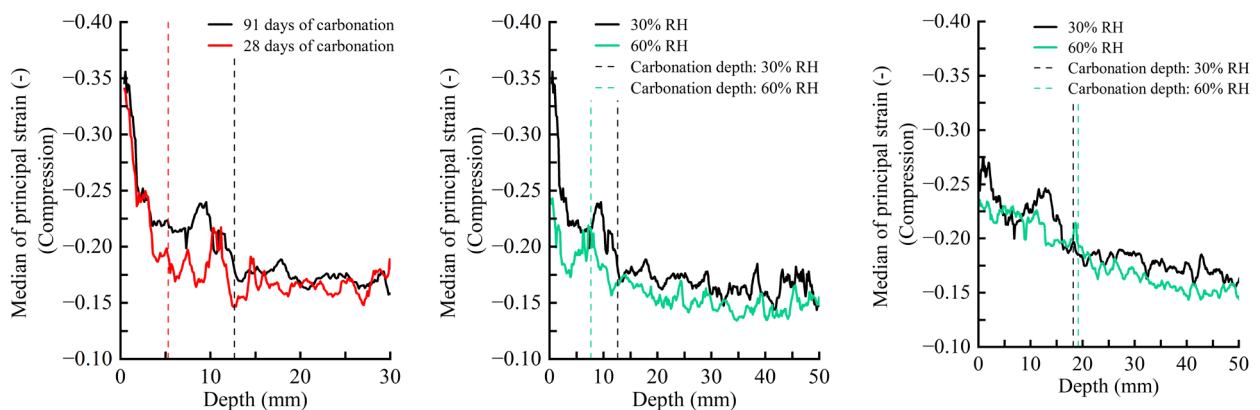


図 7 中性化による圧縮側の主ひずみの中央値の分布

- 2) 篠野宏、堀口直也、丸山一平:コンクリートの乾燥により生じるひずみ分布と微細ひび割れ性状の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp454-459、2012
- 3) Suda, Y., Tomiyama, J., Saito, T. & Saeki, T. Phase Assemblage, Microstructure and Shrinkage of Cement Paste during Carbonation at Different Relative Humidities. J Adv Concr Technol 19, 687–699 (2021).

(発 表 論 文)

- 1) 須田裕哉、佐伯竜彦、嶋田拓人：デジタル画像相関法を用いたコンクリートの中性化に伴う変質挙動の評価手法の構築、令和 8 年度土木学会全国大会、第 V 部門、2026（投稿済）