

モルタルを用いた初期養生方法の違いが炭酸化深さに及ぼす影響に関する実験的研究

唐沢 智之*1・岩城 圭介*2

概 要

2050年のカーボンニュートラルの実現を目指す動きが世界的に加速するなか、コンクリートへCO₂を吸収・固定化してカーボンリサイクルする技術が開発されている。本研究では、材齢初期の養生方法の違いによるモルタルの含水率、圧縮強度の変化が炭酸化深さに及ぼす影響を実験により確認し、実際の現場で炭酸化養生を行う場合における初期養生時の最適な圧縮強度、含水率を把握することを目的に実験を行った。その結果、湿潤養生期間を極力短くして、さらに湿潤養生後も乾燥養生を施して含水率を低下させると、炭酸化深さが大きくなる可能性を有することが示唆された。

キーワード：炭酸化養生、炭酸化深さ、初期養生、圧縮強度、含水率、モルタル

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DIFFERENT INITIAL CURING METHODS
USING MORTAR ON CARBONATION DEPTH

Tomoyuki KARASAWA*1, Keisuke IWAKI*2

Abstract

In the context of the global acceleration of initiatives to achieve carbon neutrality by 2050, technologies have been developed to recycle carbon through absorption and fixation of CO₂ in concrete. In this study, experiments were conducted to confirm the effects on carbonation depth of changes in moisture content and compressive strength of mortar due to different curing methods in the early stages of material age, and to determine the optimal compressive strength and moisture content during the early stage of carbonation curing in practical field applications. The results suggest that if the duration of wet curing is minimized and dry curing is applied after wet curing to reduce the moisture content, the carbonation depth may increase.

Keywords: Carbonation curing, Carbonation depth, Initial curing, Compressive strength, Moisture content, Mortar

*1 Manager, Material Group, Research & Development Center

*2 Deputy General Manager, Research & Development Center

モルタルを用いた初期養生方法の違いが炭酸化深さに及ぼす影響に関する実験的研究

唐沢 智之*1・岩城 圭介*2

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルの実現を目指す動きが世界的に加速するなか、建設材料として広く使用されるコンクリートは、製造過程で大量の CO₂ を排出するため、CO₂ 排出量を削減したコンクリートの開発が急務となっている。このような中、『革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発』が、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のグリーンイノベーション基金事業に採択され、筆者らもコンソーシアム「CUCO」の一員として、研究開発に取り組んでいる。

カーボンネガティブコンクリートの実現に向けて、混和材等の副産物を積極的に使用する技術^{1),2)}や、CCU(Carbon Dioxide Capture and Utilization)材料の一つである軽質炭酸カルシウムを用いてコンクリートの CO₂ 排出量を削減する技術³⁾の開発が行われてきた。さらに、コンクリートへ CO₂ を吸収・固定化してカーボンリサイクルする技術の一つとして、普通ポルトランドセメントの一部を $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (以下、 $\gamma\text{-}\text{C}_2\text{S}$ と記す)に置換したコンクリートを高 CO₂ 濃度環境で養生(以下、炭酸化養生と記す)することで、緻密で化学的安定性に優れた炭酸化コンクリートを製造する技術⁴⁾が開発され、プレキャストコンクリートへの適用が実用化されている。一方、建設現場において打込むコンクリートを現場で炭酸化養生する技術は、未だ適用事例が少ない。この場合、炭酸化養生は、コンクリート打込み後、ある程度コンクリートが硬化した後に開始することになる。既往の研究では、コンクリート打込み後、炭酸化養生を開始するまでの期間が長く、炭酸化養生開始時の圧縮強度が大きい程、炭酸化深さが

小さくなると報告されている⁵⁾。この報告では、このような現象は圧縮強度が大きくなる程、セメントマトリックスが緻密化するため、炭酸ガスの侵入が妨げられ、炭酸化速度が低下することが原因と考察している。一方、現場炭酸化に関する研究では、試験体内部の湿度が低下しづらかったため炭酸化深さが小さくなったと考察している⁶⁾。これらの報告を鑑みると、セメントの水和反応が進み圧縮強度が大きくなりセメントマトリックスが緻密化する前に炭酸化養生を開始した方が CO₂ の固定量は多くなるものの、材齢初期は含水率が高い状態にあり CO₂ の固定が進まない条件下でもある。実現場での施工環境や工程を考慮した場合、炭酸化養生を開始できる材齢は各種構造物や施工条件で異なってくると考えられる。

そこで、本研究では、炭酸化養生開始までの期間におけるモルタルの含水率、圧縮強さの変化が炭酸化深さに及ぼす影響を実験により確認し、実際の現場炭酸化養生開始時の最適な圧縮強度、含水率を把握することを目的に実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験では、表-1 に示すように炭酸化養生開始まで(以下、初期養生と記す)の期間、初期養生期間中の湿潤養生期間、気乾養生期間、および強制乾燥養生期間を実験要因とした。初期養生期間は、

表-1 実験の要因と水準

要因		水準
初期養生期間		1 日, 3 日, 5 日
初期養生期間 の内訳	湿潤養生期間	1 日, 2 日, 3 日, 5 日
	気乾養生期間	無, 1 日, 2 日, 3 日, 4 日
	強制乾燥養生期間	無, 1 日, 2 日, 3 日, 4 日

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ グループリーダー

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 副所長

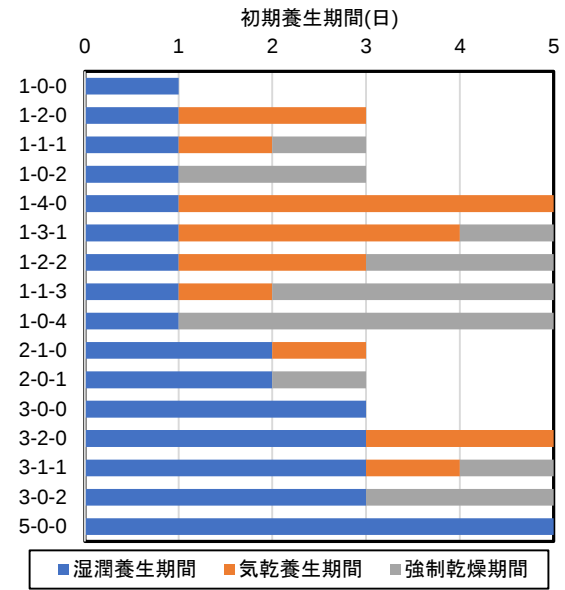
1 日，3 日，5 日とした。初期養生期間中の湿潤養生期間は 1 日～5 日，気乾養生期間は 0 日～4 日，強制乾燥養生期間は 0 日～4 日とした。各試験 CASE の初期養生の内訳と試験 CASE 記号の概要を図-1 に示す。

2.2 供試体の作製方法と初期養生の方法

供試体の寸法は 40×40×80mm とし，各試験 CASE において 12 体作製した。JIS R 5201 用のモルタル供試体成形用型を用い，テフロン板により中仕切りを設けて供試体長さを 80mm とした。モルタルの詰め方は，1 層詰めとし，突き棒と木槌のたたきにより充填した。12 体のうち，含水率測定に 2 体，圧縮強さ測定に 6 体(初期養生終了時(炭酸化養生開始前)：3 体，材齢 28 日：3 体)，炭酸化養生による炭酸化深さ測定に 4 体(1 材齢あたり 1 体)用いた。なお，含水率測定用の供試体については，後述する電気抵抗式水分計のプローブ

挿入孔を設けた。含水率測定用供試体の概要を図-2 に示す。プローブは，先端から 10mm の間が測定範囲となっており，測定範囲の中心(先端から 5mm の位置)が供試体の深さ方向の中間(深さ 20mm)になるようにプローブ孔の深さを設定した。プローブ挿入孔は，含水率測定時以外はシリコンゴム栓で封印した。

供試体の作製手順を図-3 に示す。供試体は，モルタル打込み後，材齢 1 日で型枠を解体し，1 側面のみを乾燥面として残りの 5 面はアルミ付きプチルテープによりシールした。なお，圧縮強さ測定用供試体については，5 面のうち 4 面をアルミ付きプチルテープで，他の 1 面をラップとビニールテープでシールし，圧縮強さ試験時にはラップとビニールテープのシールを除去して試験を行った。湿潤養生期間を 2 日，3 日，5 日とした供試体については，一旦ラップとビニールテープ



試験 CASE 記号の概要 1-2-2
湿潤養生期間 強制乾燥養生期間 気乾養生期間

図-1 各試験 CASE の初期養生の内訳と試験 CASE 記号の概要

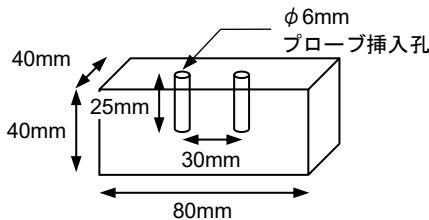


図-2 含水率測定用供試体の概要

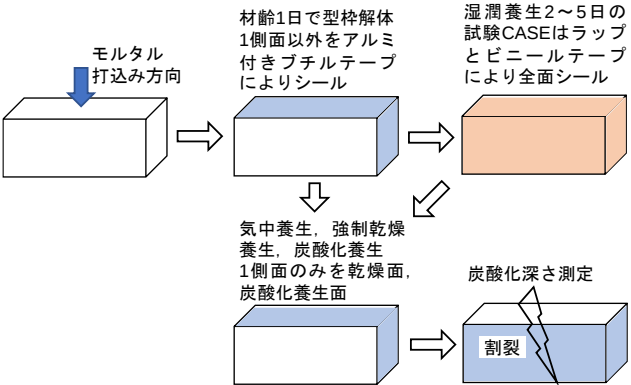


図-3 供試体作製手順

表-2 モルタルの配合とフレッシュ試験の結果

W/B (%)	単位量(kg/m³)						SP
	W	B			S		
		C	BF	γ	S1	S2	
50.0	283	141	328	97	880	377	3.11※

※：B×0.55%
◆フレッシュ試験の結果(JIS A 1171 による)
ミニスランブ：123mm，ミニスランブフロー：239mm，空気量：1.8%

表-3 使用材料

材料	記号	種類	物性
セメント	C	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	BF	4000 ブレーン 石膏添加品	密度 2.89g/cm ³
炭酸化混和材	γ	ダイカルシウム シリケート γ 相 γ-C ₂ S	密度 2.85g/cm ³
細骨材 1	S1	茨城県鹿嶋市産砂	表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.29%，粗粒率 2.40
細骨材 2	S2	栃木県佐野市産砕砂	表乾密度 2.68g/cm ³ 吸水率 0.89%，粗粒率 3.20
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物

により全面シールし、湿潤養生終了時に除去した。

供試体にシールを施した後、図-1 に示す初期養生期間に従い湿潤養生、気乾養生、強制乾燥養生を行った。各養生の条件は、湿潤養生では温度 20℃、封かん状態、気乾養生では温度 20℃、相対湿度 60%状態、強制乾燥養生では温度 20℃の真空乾燥器内で、真空状態とした。

2.3 モルタルの配合

モルタルの配合、およびモルタルのフレッシュ試験の結果を表-2に、使用材料を表-3に示す。モルタルの配合は、水結合材比を 50%とし、結合材中のセメント、高炉スラグ微粉末、 γ -C2S の割合は、それぞれ 25%、58%、17%とした。モルタルの練混ぜは、空練り 10 秒+低速練り 30 秒+高速練り 30 秒+低速練り 30 秒とした。

2.4 試験項目と試験方法

試験項目と試験方法を表-4 に示す。試験項目は、炭酸化深さ、圧縮強さ、含水率とし、圧縮強さについては初期養生終了時と材齢 28 日に、含水率については初期養生終了時に測定を行った。炭酸化養生の条件は、温度 20℃、相対湿度 60%、平均 CO₂ 濃度 65%とし、乾燥面と同一面の 1 側面のみを炭酸化養生面とした。炭酸化深さは、炭酸化養生期間を 1 日、2 日、3 日、5 日として、各々の期間経過時に測定した。供試体の数量は表-4 に示す通りとした。

実験に先立ち含水率測定に用いる電気抵抗式水分計のキャリブレーション実験を行った。キャリブレーション実験は、図-2 に示す供試体を用いた。配合は、表-2 の配合(No.1)の他、結合材中のセメント、高炉スラグ微粉末、 γ -C₂S の割合を 27%、64%、9%とした配合(No.2)、30%、70%、0%とした配合(No.3)の 3 種類とした。実際の実験時と同様に水和による水の消費と乾燥による水分の逸散が同時に進行する硬化過程の状況を再現し、モルタル打込み後、温度 20℃で 1 日間封かん養生した後、プローブ挿入孔に測定用プローブを装着した状態で、温度 20℃、相対湿度 60%で気乾養生し、材齢経過に伴う電気抵抗式水分計によるカウント値と供試体重量の推移を測定間隔 1 日

で測定した。その後、105℃の乾燥炉にて供試体重量が恒量になるまで乾燥させて絶乾重量を求め、各測定時の重量含水率を算出して電気抵抗式水分計によるカウント値との関係を求めた。電気抵抗式水分計によるカウント値と絶乾重量より算出した重量含水率の関係を図-4 に示す。カウント値と重量含水率の関係は、配合に関係なく同様の傾向を示し、両者には高い相関が認められた。以降の検討では、両者の関係より求めた回帰式(式(1))を用い、カウント値から重量含水率を算出した。

$$\text{重量含水率(\%)} = 2.56 \times e^{0.0014 \times \text{カウント値}} \quad (1)$$

3. 実験結果と考察

3.1 炭酸化深さの比較

全ての試験 CASE の炭酸化深さの測定結果を図-5 に示す。湿潤養生期間 1 日の試験 CASE では、炭酸化養生 5 日間の炭酸化深さが全て 40mm(全断面)に達している。一方、湿潤養生期間 1 日以外の試験 CASE では、炭酸化養生 5 日間の

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	供試体
炭酸化深さ	打込み時の 1 側面を炭酸化養生対象面とし、残り 5 面をアルミ付きプチルテープによりシールする。所定材齢にて供試体を切断し、切断面に 1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧して表面から赤色部分までの距離を 6 点測定し、その平均値を炭酸化深さとする。(炭酸化養生期間 1 日、2 日、3 日、5 日)	40mm×40mm×80mm 各材齢 1 体
圧縮強さ	JIS R 5201 セメントの物理試験方法 11.7.1 圧縮強さ(初期養生終了時、材齢 28 日)	40mm×40mm×80mm 各材齢 3 体
含水率	電気抵抗式水分計による含水率を測定する(初期養生終了時)	40mm×40mm×80mm 2 体

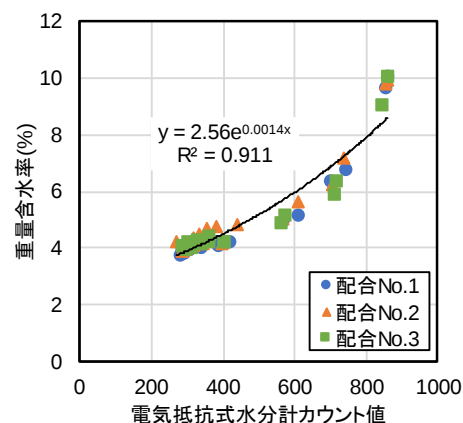


図-4 カウント値と重量含水率の関係

炭酸化深さが 40mm(全断面)に達しているのは No.3-2-0 のみであり、湿潤養生後の気乾養生期間、強制乾燥養生期間の日数に関わらず、湿潤養生期間 2 日、3 日、5 日の試験 CASE と比較して湿潤養生期間 1 日の試験 CASE の炭酸化深さが大きい傾向を示した。従って、湿潤養生期間を極力短くすると、炭酸化養生による炭酸化深さが大きくなるのがうかがえる。

3.2 炭酸化深さと圧縮強さの関係

初期養生期間 3 日、5 日の試験 CASE について、炭酸化深さと初期養生終了時の圧縮強さの比較を図-6 に示す。ここでは、圧縮強さ試験の材齢を統一するために、初期養生期間ごとに分けて比較を行った。初期養生期間を 3 日とした場合、5 日とした場合とも、初期養生終了時の圧縮強さが大きい試験 CASE ほど、炭酸化深さが小さい傾向が認められ、この傾向は初期養生期間を 5 日とした場合に、より顕著に認められる。また、乾燥養生を行わず強制乾燥養生のみで乾燥させた試験

CASE は、著しく初期養生終了時の圧縮強さが小さく、炭酸化養生期間 1 日で全断面(40mm)が炭酸化した。初期養生終了時の圧縮強さが小さい試験 CASE はほぼ全て湿潤養生期間を 1 日とした試験 CASE であることから、湿潤養生期間 1 日の試験 CASE の炭酸化深さが大きくなるのは、初期養生終了時の圧縮強さが小さく、セメントマトリックスが粗な状態で炭酸化養生したため、炭酸ガスが浸透しやすかったことが原因と推察される。これは、セメントマトリックスが緻密化すると炭酸ガスの侵入が妨げられ、炭酸化速度が低下すると考察している既往の研究結果⁵⁾とも一致する。

全ての試験 CASE の炭酸化深さと材齢 28 日の圧縮強さの比較を図-7 に示す。湿潤養生期間を 1 日とした試験 CASE は炭酸化深さが大きいものの、材齢 28 日の圧縮強さが他の試験 CASE と比較して小さい傾向が認められる。また、乾燥養生を行わず強制乾燥養生のみで乾燥させた試験 CASE は、炭酸化養生期間 1 日で全断面(40mm)

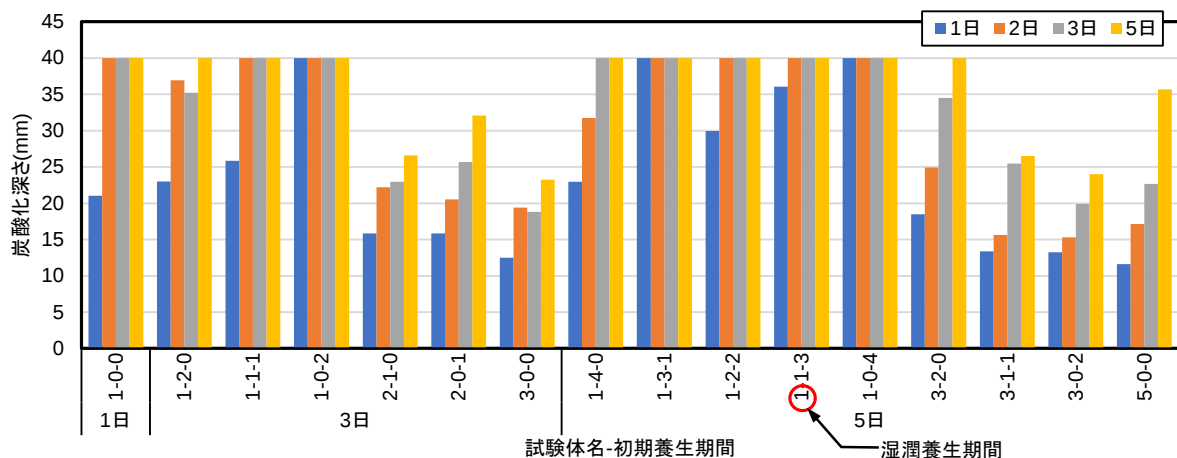


図-5 各試験 CASE の炭酸化深さ

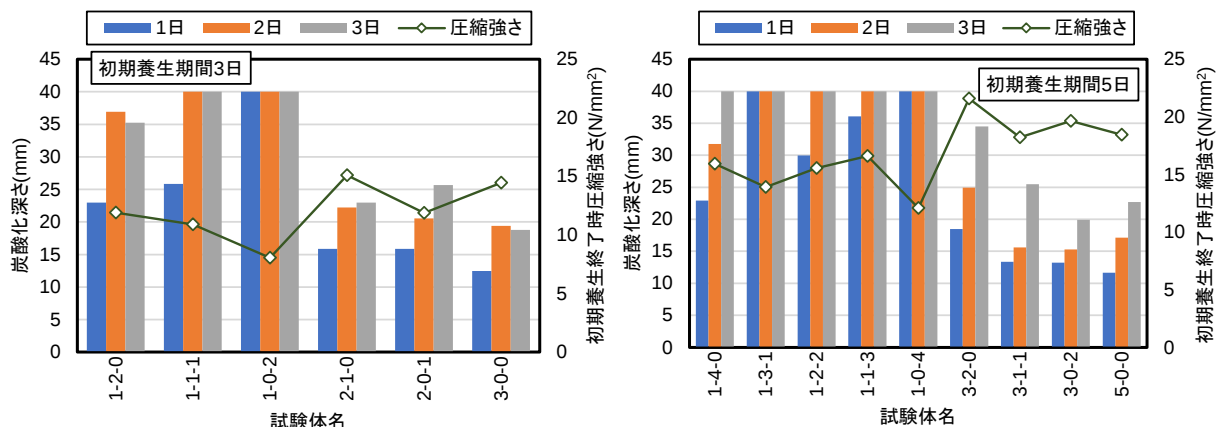


図-6 炭酸化深さと初期養生終了時の圧縮強さの比較(初期養生期間ごと)

が炭酸化したものの、材齢 28 日の圧縮強さも著しく小さかった。湿潤養生期間を 1 日とすると、セメントマトリックスが粗な状態で炭酸化養生を開始するため、炭酸ガスが浸透しやすく炭酸化深さも大きくなるが、その後の強度増進も小さい。既往の研究では、 γ -C₂S の炭酸化により強度増進することが報告されている⁴⁾が、本実験ではその効果が認められなかった。材齢 28 日の圧縮強さを確保しつつ炭酸化深さを大きくする方法については、 γ -C₂S の炭酸化による強度増進の影響も含めて更なる検討が必要と考えられる。

以上より、初期養生期間中の湿潤養生期間を短くして水和反応が緩慢になると、炭酸化養生による炭酸化深さが大きくなるものの、材齢 28 日の圧縮強さも小さくなる傾向であることが分かった。

3.3 炭酸化深さと含水率の関係

初期養生期間 3 日、5 日の試験 CASE について、

炭酸化深さと初期養生終了時の含水率の比較を図-8 に示す。同一の初期養生期間で比較すると、初期養生期間 3 日については、初期養生終了時の含水率が高い試験 CASE で炭酸化深さが小さい傾向が若干認められるものの、全体的には、初期養生終了時の含水率と炭酸化深さの関係は明確ではなかった。初期養生期間 5 日については、湿潤養生期間を 5 日とした CASE、および気乾養生期間を 4 日とした CASE 以外は、初期養生終了時の含水率に大きな差がないため、初期養生終了時の含水率と炭酸化深さの関係は明確ではなかった。

湿潤養生期間 1 日、3 日の試験 CASE について、炭酸化深さと初期養生終了時の含水率の比較を図-9 に示す。また、初期養生終了時の質量減少率と炭酸化深さの関係を図-10 に示す。図中におけるプロットは炭酸化養生期間を表している。同一の湿潤養生期間で比較すると、湿潤養生期間

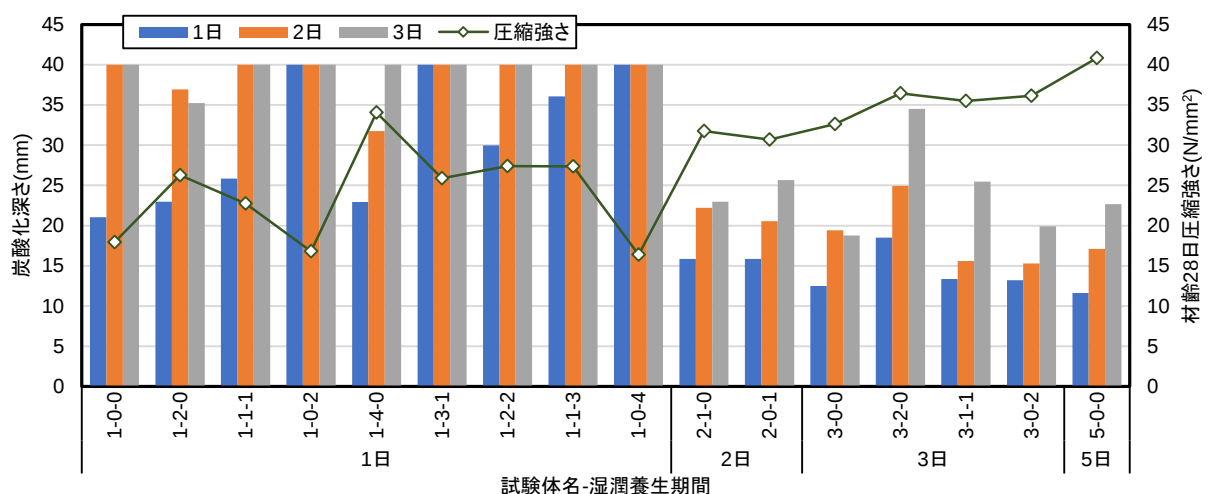


図-7 炭酸化深さと材齢 28 日の圧縮強さの比較(湿潤養生期間ごと)

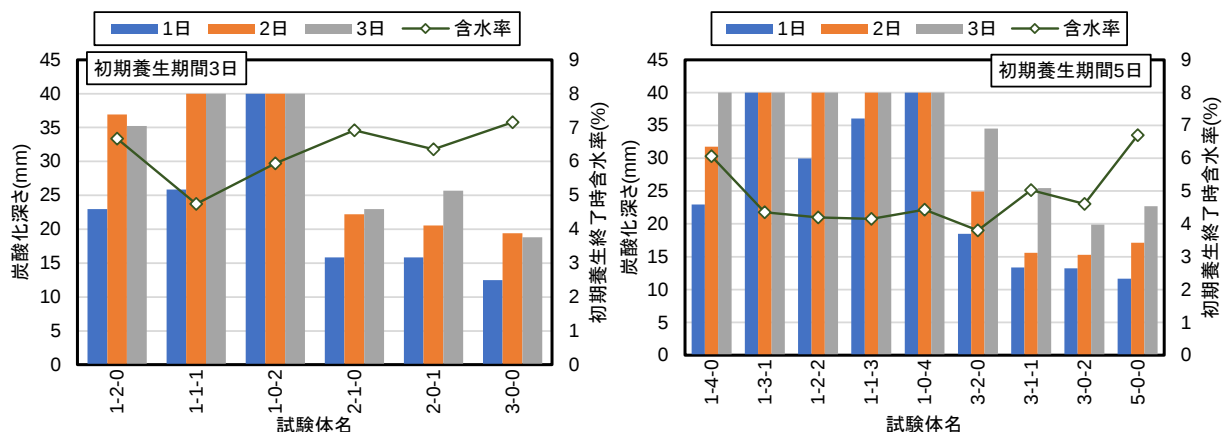


図-8 炭酸化深さと初期養生終了時の含水率の比較(初期養生期間ごと)

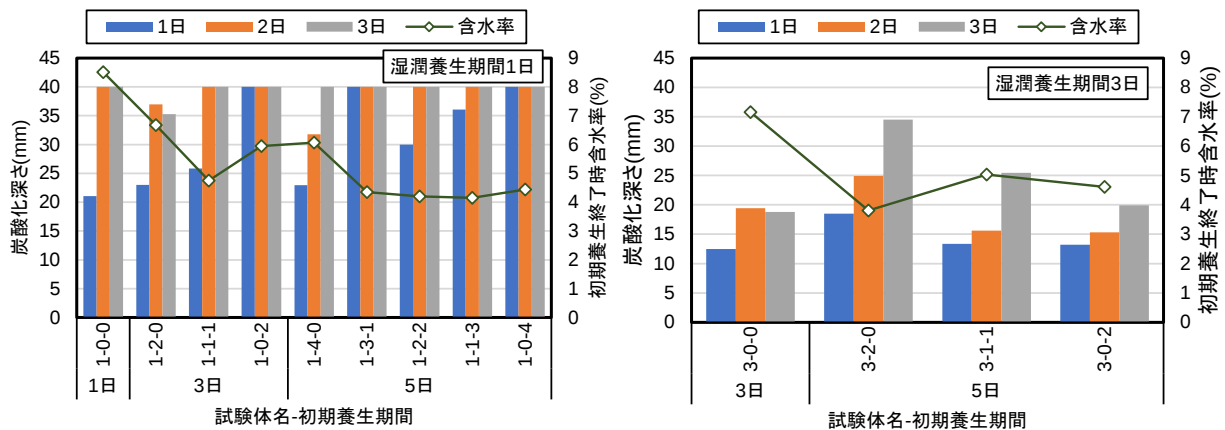


図-9 炭酸化深さと初期養生終了時の含水率の比較(湿潤養生期間ごと)

1 日の場合, 3 日の場合とも, 初期養生終了時において含水率が小さかった試験 CASE については, 炭酸化深さが大きい傾向が認められる。また, 初期養生終了時の質量減少率が大きいほど, 炭酸化深さが大きかった。特に, 炭酸化養生期間 1 日については, 両者に相関関係が認められた。以上より, 湿潤養生期間終了後, 乾燥養生を施し含水率を低下させると, 炭酸化養生による炭酸化深さが大きくなり, 特に炭酸化養生初期の炭酸化深さが大きくなるのがうかがえる。なお, 本研究では, 同一の湿潤養生期間, 初期養生期間の試験 CASE で含水率を比較すると, 気乾養生期間と強制乾燥期間の違いにより, 含水率に大きな差が生じなかった。これは, 本実験では供試体が小さかったために, 強制乾燥養生を行っていない試験 CASE でも初期養生終了時の含水率が比較的小さくなっており, 強制乾燥の効果が明確に現れなかったことが要因と考えられる。

初期養生期間 3 日, 5 日の試験 CASE について, 初期養生終了時の含水率と炭酸化深さの関係を図-11 に示す。図中におけるプロットは炭酸化養生期間を表している。初期養生期間 3 日では, 初期養生終了時の含水率が小さくなるほど炭酸化深さが大きくなる傾向が若干認められる。初期養生期間 5 日では, 初期養生期間 3 日と比較すると明確な傾向ではなかった。初期養生終了時の含水率が炭酸化養生による炭酸化深さに与える影響は顕著ではない可能性もあるが, 本研究では供試体寸法が 40mm であったためそれ以上の炭酸化

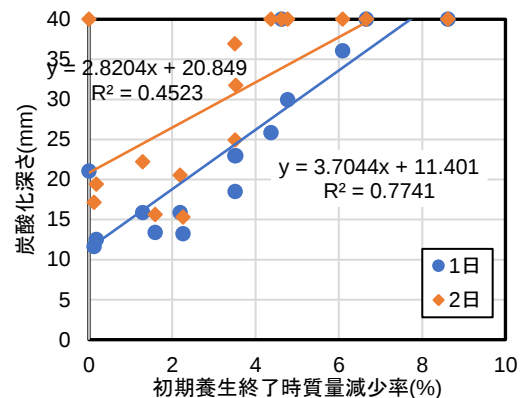


図-10 質量減少率と炭酸化深さの関係

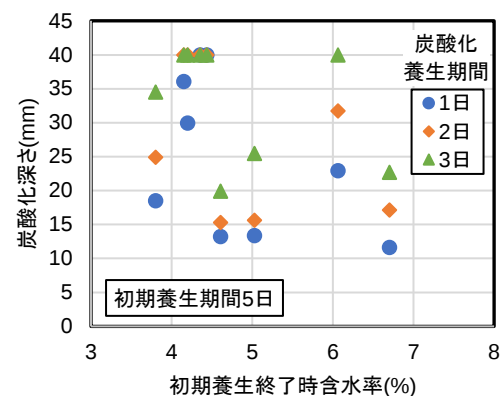
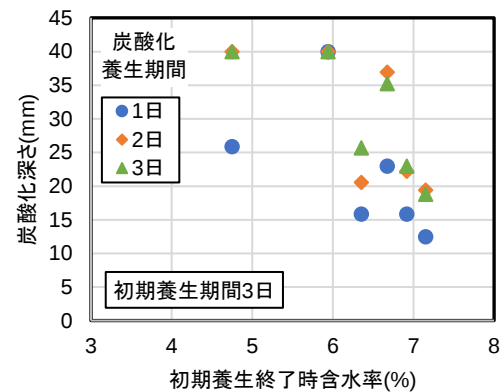


図-11 含水率と炭酸化深さの関係

深さは測定できておらず, 40mm を超える領域での炭酸化へ及ぼす影響については明らかではな

い。既往の研究結果⁶⁾では、炭酸化養生期間中における試験体内部の湿度が低下しづらかったため炭酸化深さが小さくなったと考察していることから、初期養生終了時の含水率よりも、その後の炭酸化養生期間中の含水率の低下、乾燥の程度が炭酸化深さに及ぼす影響が相対的に大きいことも推察される。

炭酸化深さが 30mm 以上と比較的炭酸化深さが大きくなった試験 CASE に着目すると、初期養生期間 3 日では、そもそも乾燥期間が短いため初期養生終了時の含水率があまり低下しておらず明確な傾向が認められない。一方、初期養生期間 5 日では、初期養生終了時の含水率が 4.5%程度以下の場合に炭酸化深さが 30mm 以上となる試験 CASE が全データの 48%になっている。試験 CASE が少ないため今後データの蓄積が必要ではあるが、湿潤養生期間終了後に乾燥養生を施して、初期養生終了時の含水率を 4.5%程度以下まで低下させることで、炭酸化養生による炭酸化深さは大きくなる傾向にあると考えられる。

4. まとめ

本研究では、炭酸化養生開始までの初期養生期間におけるモルタルの含水率、圧縮強さの変化が炭酸化深さに及ぼす影響を実験により確認した。得られた知見を以下にまとめて記す。

- (1) 湿潤養生期間を極力短くすると、初期養生終了時の圧縮強さが小さく、マトリックスが粗な状態で炭酸化養生されるため、炭酸ガスが浸透しやすく、炭酸化養生による炭酸化深さが大きくなる。
- (2) 初期養生期間中の湿潤養生期間を短くして水和反応が緩慢になると、炭酸化養生による炭酸化深さが大きくなるものの、材齢 28 日の圧縮強さも小さくなる。
- (3) 湿潤養生期間終了後、乾燥養生を施し初期養生終了時の含水率を 4.5%程度以下まで低下させることで、炭酸化養生による炭酸化深さは大きくなる傾向であると考えられる。また、初期養

生終了後の炭酸化養生期間中の含水率の低下、乾燥の程度が炭酸化深さに及ぼす影響が相対的に大きい。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP21023)を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発で得られた成果である。

また、研究を進めるにあたり、鹿島建設㈱の関係者にご助言・ご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: エネルギー・CO₂ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021.9
- 2) 金子樹, 河野政典, 高橋祐一, 古川雄: 各種の使用率で高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの諸性状及び環境配慮性, コンクリート工学, Vol.59, No.3, pp.247-254, 2021.3
- 3) 坂井吾郎, 坂田昇, 渡邊賢三, 関健吾, 八木利之: CCU材料の炭酸カルシウム微粉末を用いたコンクリートのCO₂固定量, 土木学会第77回年次学術講演会, V-519, 2022.9
- 4) 渡邊賢三, 横関康祐, 取達剛, 坂田昇: 炭酸化養生によるコンクリートの高耐久化技術, コンクリート工学, Vol.45, No.7, pp.31-37, 2007.7
- 5) 小林聖, 横関康祐, 渡邊賢三, 取達剛: 供試体寸法および初期養生条件がコンクリートの炭酸化深さに与える影響, 土木学会第65回年次学術講演会, V-694, pp.1387-1388, 2010.9
- 6) 小林聖, 取達剛, 渡邊賢三, 横関康祐: コンクリートの現場炭酸化養生技術に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.42, No.1, pp.1348-1353, 2020.7