

実構造物を想定した炭酸化養生方法に関する実験的研究

唐澤 智之^{*1}・岩城 圭介^{*2}・横山 卓之^{*3}

概 要

2050 年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、コンクリート中へ CO₂ を吸収・固定させる研究が盛んになっている。本研究では、小型コンクリート供試体を用いて、最適な初期養生方法、炭酸化しやすい条件を把握し、さらに、CO₂ 注入孔を用いて内部から炭酸化養生する方法について、実際の構造部材を想定し、炭酸化が可能となる条件に関する基礎的なデータを得ることを目的に実験を行った。その結果、炭酸化養生期間中に含水率を低下させること、さらに、コンクリート中の水分や空気を CO₂ ガスと置換させる方法が、炭酸化深さを大きくさせることに繋がる可能性が示唆された。

キーワード：炭酸化養生、炭酸化深さ、二酸化炭素、圧縮強度、含水率、高圧注入

EXPERIMENTAL STUDY ON CARBONATION CURING METHOD ASSUMING ACTUAL STRUCTURE

Tomoyuki Karasawa ^{*1}, Keisuke Iwaki ^{*2}, Takayuki Yokoyama ^{*3}

Abstract

Amid the global acceleration of efforts toward achieving carbon neutrality by 2050, research on the absorption and fixation of CO₂ within concrete has become increasingly active. In this study, experiments were conducted using small-scale concrete specimens to identify optimal initial curing methods and conditions conducive to carbonation. Furthermore, assuming actual structural members, a carbonation curing method utilizing CO₂ injection holes for internal carbonation was examined, with the aim of obtaining fundamental data on conditions that enable carbonation. The results indicated that reducing the moisture content during the carbonation curing period and replacing the moisture and air within the concrete with CO₂ gas could potentially lead to an increase in carbonation depth.

Keywords: Carbonation curing, Carbonation depth, Carbon dioxide, Compressive strength, Moisture content, High pressure injection

^{*1} Deputy General Manager, Research & Development Center

^{*2} General Manager, Research & Development Center

^{*3} Material Group, Research & Development Center

実構造物を想定した炭酸化養生方法に関する実験的研究

唐澤 智之*1・岩城 圭介*2・横山 卓之*3

1. はじめに

2050 年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 CO_2 を排出するため、 CO_2 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。このような背景のもと、コンクリート中のカルシウム成分と外部から取り込んだ CO_2 を反応させて、コンクリート中へ CO_2 を吸収・固定させる研究が盛んになっており、筆者らも研究開発に取り組んでいる¹⁾。

コンクリート中へ CO_2 を吸収・固定させ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 CO_2 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²⁾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。 $\gamma\text{-}\text{C}_2\text{S}$ を用いた炭酸化コンクリートでは、コンクリート外面を高 CO_2 濃度環境とし、外面から炭酸化する方法が多く検討されている³⁾。ただし、この方法では、部材表面の炭酸化は容易に可能である反面、断面の大きい柱状部材など一般的な構造物において、断面の中心部まで炭酸化するには炭酸化養生に時間を要し現実的ではない。また、現場打ちしたコンクリートを現場で炭酸化(以下、現場炭酸化と記す)させた既往の研究³⁾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おり、断面の大きい柱状部材などで内部まで乾燥するには養生期間が長くなるので、実際の構造物で内部の現場炭酸化は難しいと考えられる。

そこで筆者らは、図-1 に示すようにコンクリ

ート打込み前に CO_2 注入用の透気性のあるチューブを設置して CO_2 注入孔を作製し、これらの注入孔から CO_2 を高圧注入することにより、注入孔を中心とした円形の炭酸化エリアを形成する炭酸化養生方法を検討している。 CO_2 高圧注入によりコンクリート内部から炭酸化する方法については、河合ら⁴⁾や田口ら⁵⁾が実験結果を報告している。河合らの実験では、コンクリート打込み後 91 日間、 20°C 、相対湿度 50% の環境下で気中養生した $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体を用いている。また、 CO_2 高圧注入時の供試体の周囲は、外気に開放された状態にあると推察され、断面の大きい柱状部材の内部とは環境条件が異なると考えられる。これらの条件下ではコンクリートは十分に乾燥され、かつ物質移動が容易な状態であると推察され、断面の大きい実際の構造物では河合らの研究よりも炭酸化しにくい状況と考えられる。

本研究では、小型コンクリート供試体を用いて、材齢によるコンクリート含水率、圧縮強度の変化と炭酸化の関係を実験により確認し、炭酸化養生開始までの供試体の最適な養生方法、炭酸化しやすい条件を把握し、さらに、 CO_2 注入孔を用いて

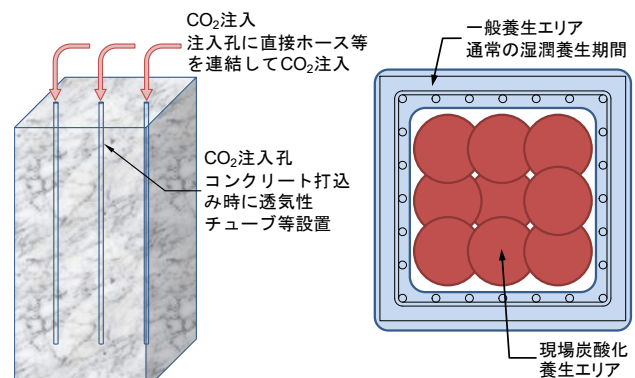


図-1 炭酸化養生のイメージ

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 副所長

*2 建設技術総合センター 研究開発センター 所長

*3 建設技術総合センター 研究開発センター 材料グループ

内部から炭酸化養生する方法について、実際の構造部材を想定し、炭酸化が可能となる条件に関する基礎的なデータを得ることを目的とした。

2. 実験概要

実験は、炭酸化養生槽を用いて供試体外周面から炭酸化させて、材齢によるコンクリートの含水率、圧縮強度の変化と炭酸化の関係を確認する Phase1 と、供試体内部に CO₂ 注入孔を設けて内部から炭酸化させて、注入孔による炭酸化の可否、および炭酸化可能な条件を確認する Phase2 に分けて行った。

2.1 Phase1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

実験は、湿潤養生終了後(型枠脱型後)の炭酸化養生開始までの気乾養生期間と配合(γ -C₂S 量)を実験要因とした。実験の要因と水準を表-1 に示す。気乾養生期間は、0 日、1 日、3 日、5 日、 γ -C₂S 量は、無混入、20kg/m³、40kg/m³、80kg/m³とした。

(2) 供試体の作製方法

炭酸化深さ測定用の供試体は、JIS A 1153 に準じ 100×100×400mm とし、各配合、気乾養生期間ごとに供試体数を 1 体とした。湿潤養生期間は

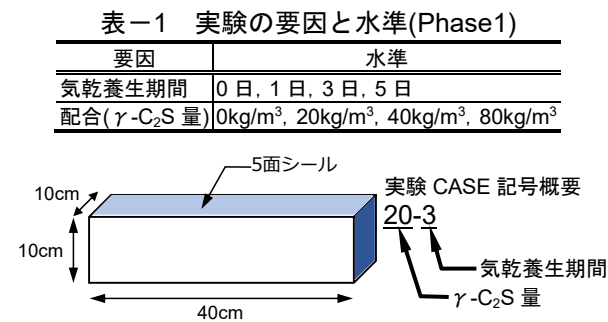


表-2 コンクリートの配合(Phase1 および 2)											
配合 記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								
			W	B			S		G		SP
				C	BF	γ	S1	S2	G1	G2	
00	50.0	45.0	175	105	245	0	546	234	488	488	2.450※ 2.625※
20	50.0	44.9	175	99	231	20	545	234	488	488	2.625
40	50.0	44.9	175	93	217	40	545	233	488	488	2.625
80	50.0	44.9	175	81	189	80	544	233	488	488	2.625

※1：Phase1、※2：Phase2

全ての実験 CASE とも 2 日間とし、材齢 2 日で型枠解体後、気乾養生および炭酸化養生の対象面を打込み時の 1 側面とし、残りの 1 側面、打込み面、底面および両端面はアルミ付きプチルテープによりシールした。気乾養生は、温度 20℃、相対湿度 60%の環境下で 1 面解放により行った。Phase1 実験の供試体の概要、実験 CASE 記号の概要を図-2 に示す。含水率測定用の供試体は、100×100×200mm とし、各配合、気乾養生期間ごとに供試体数を 1 体とした。シールの方法は、炭酸化深さ測定用の供試体と同一とした。

(3) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に、使用材料を表-3 に示す。基本となる配合 00 は、呼び強度 33、スランプ 15cm 程度のレディーミクストコンクリートの配合を参考に、単位セメント量の 70%を高炉スラグ微粉末に置換した配合とした。配合 20、40、80 は、配合 00 に対してセメントと高炉スラグ微粉末の割合を 30：70 とした上で、 γ -C₂S 量をそれぞれ 20kg/m³、40kg/m³、80kg/m³ 粉体置

表-3 使用材料(Phase1 および 2)

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
粗骨材 1	G1	茨城県笠間市産砕石 2005	表乾密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.84%、実積率 60.1%
粗骨材 2	G2	栃木県佐野市産砕石 2005	表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.64%、実積率 60.2%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系化合物

表-4 コンクリート試験結果

配合 記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	各材齢の圧縮強度(N/mm ²)					備考
			2 日	3 日	5 日	7 日	28 日	
00	12.5	3.6	11.3	16.7	21.4	24.6	31.2	Phase1
	16.5	4.7	—	—	—	24.2	31.3	Phase2
20	14.0	5.1	8.8	14.6	19.2	22.3	29.4	Phase1
	16.5	4.9	—	—	—	22.0	28.1	Phase2
	15.5	5.7	—	—	—	—	—	Phase2 D,N シリーズ
40	15.0	5.6	7.8	13.4	18.1	20.9	27.7	Phase1
80	13.5	4.8	5.9	10.3	15.2	17.4	23.7	Phase1
	13.5	5.3	—	—	—	25.3	24.5	Phase1 CO ₂ 養生 Phase2

圧縮強度の材齢は、湿潤養生 2 日間と上下 2 面開放気乾養生日数を加えた日数を表す。材齢 28 日の養生方法は、湿潤養生 2 日間+上下 2 面開放気乾養生 26 日間、CO₂ 養生と記載があるものは、湿潤養生 2 日間+上下 2 面開放炭酸化養生 26 日間である。

換して単位粉体量は同一の配合とした。コンクリートの目標品質は、スランプ $15.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

(4) コンクリート試験結果

コンクリートの試験結果を表-4 に示す。なお、圧縮強度試験用の供試体は、 $\phi 100 \times H200\text{mm}$ とし、2日間湿潤養生(20°C 封かん養生)を行い、炭酸化深さ測定用の供試体の炭酸化養生面の V/S に近づけるために材齢 2 日で上面、下面を開放し、上下 2 面を気乾養生面、炭酸化養生面(Phase1 配合 20, 80 のみ 7 日間炭酸化養生)とした。圧縮強度試験は、各配合とも炭酸化養生開始前と材齢 28 日に実施した。Phase1 実験の配合 20 と 80 については、炭酸化養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度試験も実施した。フレッシュ性状は、目標品質を満足していた。圧縮強度は、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ が気中では強度発現に寄与しないため、 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ の単位量が多い配合ほど小さかった。また、材齢 28 日の気中養生供試体と炭酸化養生供試体では、炭酸化養生供試体の方が若干強度が大きくなった。

(5) 炭酸化養生の方法および試験項目と方法

炭酸化養生は、温度 20°C 、相対湿度 80%、 CO_2 濃度 80%の環境下で 1 面解放により行った。試験

項目は炭酸化深さと含水率であり、炭酸化養生期間 1 日、3 日、5 日、7 日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 5 点測定し、その平均値を炭酸化深さとした。含水率は、湿潤養生終了時(型枠脱型後)、気乾養生終了時(炭酸化養生開始前)、炭酸化養生終了時に高周波容量式水分計により測定した。

2.2 Phase2 実験方法

(1) 実験の要因と水準

実験は、表-5 に示すように型枠脱型後の乾燥養生の方法、炭酸化養生方法、および配合($\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 量)を実験要因とした。乾燥養生方法は、a)真空吸引を 3 日間(V シリーズ)、b) 20°C 、相対湿度 60% 条件で 28 日間気乾養生(D シリーズ)、および c)乾燥期間を設けない(N シリーズ)、の 3 つの方法とした。炭酸化養生方法は、 CO_2 の注入方法、通風孔、吸引孔の有無、供試体外周部の養生方法を水準として表-6 に示す方法によった。 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 量は、無混入、 20kg/m^3 、 80kg/m^3 の 3 水準とした。実験 CASE の一覧、実験 CASE 記号の概要を表-7 に示す。

(2) 供試体の作製方法

注入孔を 1 本のみ用いた供試体は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とし、実験 CASE ごとに供試体を 4 体作製し、炭酸化養生期間ごとに 1 体ずつ(炭酸化養生

表-5 実験の要因と水準(Phase2)

要因	水準
乾燥養生方法	無、真空吸引 20°C 、相対湿度 60% 気乾養生 28 日間
炭酸化養生方法	表-6 による
配合($\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 量)	0kg/m^3 、 20kg/m^3 、 80kg/m^3

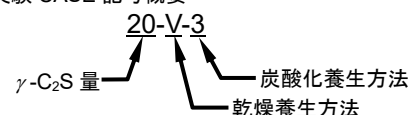
表-6 炭酸化養生方法(Phase2)

番号	炭酸ガス注入方法	孔の概要	外周部養生
①	(1 時間真空吸引+6 時間炭酸化) × 1 サイクル/日	注入孔のみ	ラップ封かん
②	(1 時間真空吸引+2 時間炭酸化) × 3 サイクル/日		
③	(1 時間真空吸引+2 時間炭酸化) × 3 サイクル/日		4 面解放
④	(1 時間真空吸引+2 時間炭酸化) × 3 サイクル/日		1 面解放
⑤	20°C 、RH60%、 CO_2 濃度 80%炭酸化養生槽で 6 時間/日 注入孔両端開放	ブチルテープ養生	
⑥	20°C 、RH60%、 CO_2 濃度 80%炭酸化養生槽で 6 時間/日 注入孔片端開放		
⑦	(1 時間真空吸引+2 時間炭酸化) × 3 サイクル/日	注入孔+通風孔	ラップ封かん
⑧	(1 時間真空吸引+2 時間炭酸化) × 3 サイクル/日	注入孔+吸引孔	

表-7 実験 CASE 一覧(Phase2)

実験 CASE	$\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 量	乾燥養生方法		炭酸化養生方法
		期間	方法	
00-V-1	0kg/m^3	3 日	真空吸引	①
00-V-2				②
20-V-1	20kg/m^3	3 日	真空吸引	①
20-V-2				②
80-V-1	80kg/m^3	3 日	真空吸引	①
80-V-2				②
20-D-2	20kg/m^3	28 日	20°C 、RH60%	②
20-D-6				⑥
20-N-3		0 日	—	③
20-N-4				④
20-N-5				⑤
20-N-6				⑥
20-N-7				⑦
20-N-8				⑧

実験 CASE 記号概要



期間 4 材齢)実験に供した。図-3 に示すように供試体の中央部に炭酸化養生用ホースを配置し、かぶり部分は長ニップルを用いて漏気対策を施した。炭酸化養生用ホースは、排水性舗装用の導水管を用いた。端部の一方を注入口、他方を排気口とし、注入口には注入ホース接続用のワンタッチ継手を、排気口には内部の空気や CO₂ ガスの排出用としてボールバルブを取り付けた。CO₂ 注入孔と真空吸引孔、通風孔をセットで配置した供試体は図-3 に示す 150×100×400mm とし、実験 CASE ごとに供試体数を 2 体(炭酸化養生期間 2 材齢)とした。供試体の中央部に炭酸化養生用ホースと吸引・通風用ホースを 50mm 間隔で配置した。

湿潤養生期間は全ての実験 CASE とも 2 日間とし、材齢 2 日で型枠解体後、D シリーズ以外は表-6 に示す外周部の養生を施し、その後、表-7 の乾燥養生および炭酸化養生を行った。

(3) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、前述した表-2 の配合 00, 20, 80 とし、使用材料は表-3 と同一とした。

(4) 炭酸化養生の方法および試験項目と方法

表-7 に示した供試体の乾燥は、V シリーズでは、温度 20℃の室内にて、ダイアフラム式真空ポンプを用い、1 日あたり 9 時間連続真空吸引を計 3 日間行った。D シリーズでは、供試体外面のラップによる封かん養生を施さずに、20℃、相対湿度 60%の条件で 28 日間気乾養生した。炭酸化養生は、温度 20℃の室内にて、CO₂ ガスボンベより

配管を並列分岐させ、直接 CO₂ ガスを注入圧力 0.6MPa で圧力注入した。炭酸化養生における CO₂ ガスの注入方法は、表-6 に示す方法によった。炭酸化養生中の乾燥促進のための真空吸引と、CO₂ ガス注入による炭酸化養生を 1 日の中で数回繰り返して炭酸化養生を実施した(炭酸化養生方法①～④, ⑦, ⑧)。炭酸化養生方法⑤, ⑥では、20℃、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 80%の炭酸化養生槽で、高圧注入ではなく高 CO₂ 濃度環境条件で炭酸化養生を実施した。注入孔については、注入孔を 1 本のみ用いた炭酸化養生を基本としたが、炭酸化養生方法⑦, ⑧では、注入孔の他に通風孔あるいは吸引孔を設け、CO₂ ガス注入と通風あるいは吸引を同時に行うことで炭酸化養生中の乾燥を促進させた。いずれの方法においても、1 日の炭酸化養生時間は 6 時間とした。供試体外周部の養生方法は、柱状部材の中心部分を模擬して、外周部からの水分逸散が発生しないようにラップあるいはアルミブチルテープによる封かん養生を基本とした(炭酸化養生方法①～②, ⑤～⑧)。炭酸化養生方法③, ④では、外周部からの水分逸散の影響を比較するために、外周 4 面あるいは 1 面を解放した状態で CO₂ ガスを注入して炭酸化養生を行った。

試験項目は炭酸化深さであり、炭酸化養生期間 1 日(V シリーズのみ)、3 日、5 日(V シリーズのみ)、7 日にて供試体を図-3 に示す A 面および B 面の 2 ヶ所で切断し、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炭酸化養生用ホース周囲から赤色部分までの距離を 4 点測定し、2 断面合計 8 点の平均値を炭酸化深さとした。

3. 実験結果と考察

3.1 Phase1 実験

(1) 炭酸化深さ

各実験 CASE の炭酸化深さの推移を図-4 に示す。全ての実験 CASE とも炭酸化養生期間が長くなるにつれて炭酸化深さが大きくなるものの、炭酸化養生期間 1 日までの炭酸化深さの進行が大きかった。また、炭酸化養生期間 7 日の炭酸化深さ

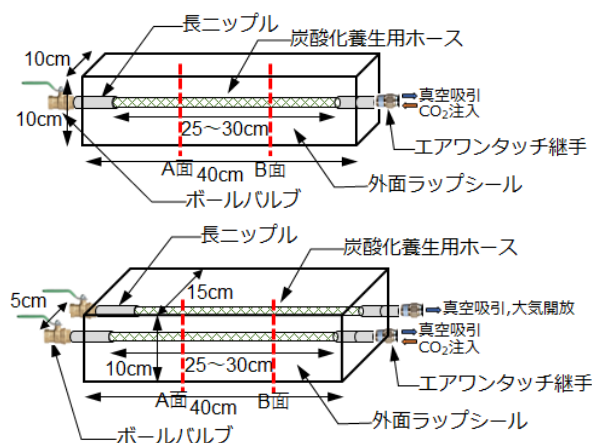


図-3 Phase2 実験供試体概要

は、25～30mm 程度であった。 γ -C₂S 量に関わらず、全ての配合において、湿潤養生終了後、気乾養生をせずに炭酸化養生した実験 CASE の炭酸化深さが最も大きくなる傾向を示した。従って、必ずしも気乾養生期間を確保することが炭酸化深さの進行を大きくするとは限らないことが明らかになった。この要因として、気乾養生期間を設けることで乾燥が進む一方、材齢の経過に伴い水和による緻密化が進行したためと考えられる。

同一気乾養生期間の実験 CASE の炭酸化深さの推移の比較を図-5 に示す。ここでは、気乾養生期間を 0 日、3 日とした結果を示す。 γ -C₂S 量の違いに関わらず、同一の気乾養生期間であれば、炭酸化深さの進行は同様の傾向であった。この傾向は、他の γ -C₂S 量の水準でも同様であった。本実験結果では、 γ -C₂S 無添加の配合も含めて γ -C₂S

量の違いによる炭酸化深さへの影響は小さかった。一方、既往の研究では、 γ -C₂S を添加することにより CO₂ 固定化率が高くなることが報告されている⁶⁾。本研究でも、 γ -C₂S 量の違いによる炭酸化深さの差は明確でないが、CO₂ 固定量には違いがある可能性もある。

(2) 炭酸化養生開始時の含水率、圧縮強度の影響

同一 γ -C₂S 量の実験 CASE の含水率の推移の比較を図-6 に示す。ここでは、 γ -C₂S 無添加と 40kg/m³ 添加した結果を示す。なお、含水率計の測定上限値 12%を超えたものについては、13%と表記している。含水率は、湿潤養生終了時には、10%以上となるが、その後気乾養生(20℃, 60%R.H.)した場合では気乾養生中に、炭酸化養生(20℃, 80%R.H.)した場合では炭酸化養生後 1～3 日までに 5%程度に低下し、その後は平衡状態で

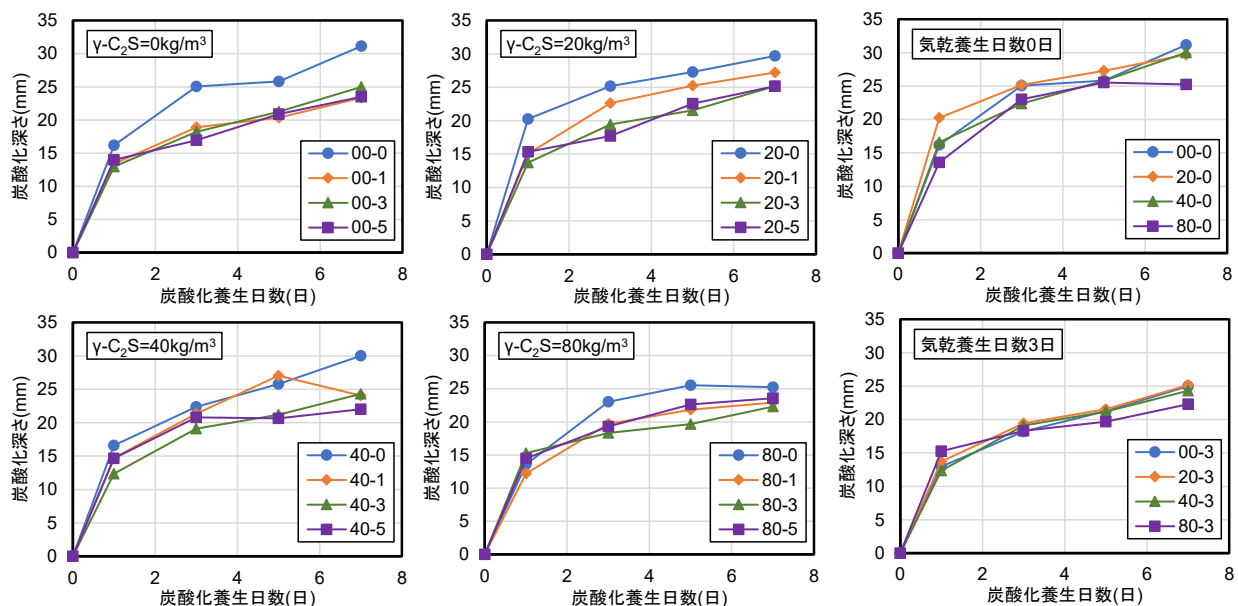


図-4 炭酸化深さの推移(γ -C₂S 量ごとの比較)(Phase1)

図-5 炭酸化深さの推移(気乾養生期間ごとの比較)(Phase1)

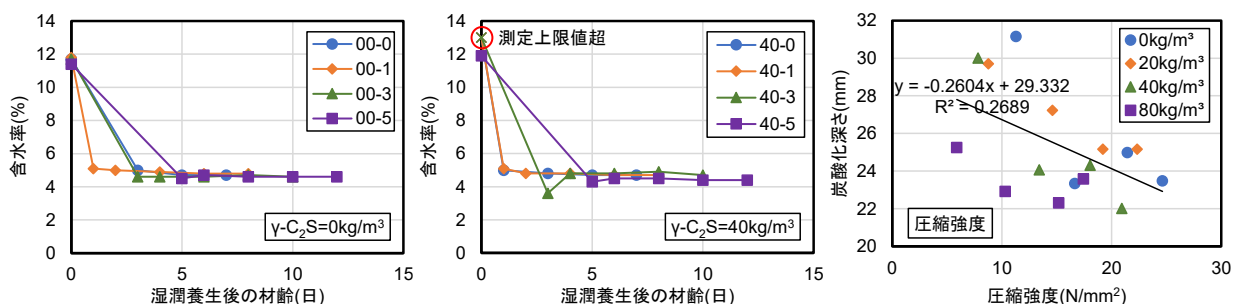


図-6 含水率の推移(γ -C₂S 量ごとの比較)(Phase1)

図-7 炭酸化養生開始時の圧縮強度と炭酸化養生期間 7 日の炭酸化深さの関係(Phase1)

あった。一方、図-4 のとおり湿潤養生終了後、気乾養生をせずに炭酸化養生した実験 CASE の炭酸化深さが最も大きかったことから、炭酸化養生開始時の含水率が高くても、その後の炭酸化養生で含水率が低下すれば、炭酸化が進行することが明らかになった。

炭酸化養生開始時の圧縮強度と炭酸化養生期間 7 日の炭酸化深さの関係を図-7 に示す。両者の相関はそれ程高くはないが、同一配合であれば炭酸化養生開始時の圧縮強度が小さいほど炭酸化深さが大きくなる傾向を示し、事前検討としてモルタルで実施した実験結果と符合した。以上より、若材齢時の圧縮強度が発現していない時点で炭酸化養生を開始することで炭酸化深さが大きくなり、炭酸化養生開始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や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と推察される。

3.2 Phase2 実験

各実験 CASE の炭酸化養生期間 7 日時点の炭酸化の状況を写真-1 に、炭酸化深さの測定結果を図-8 に示す。

V シリーズについては、00-V-1 と 00-V-2 では A 面で若干炭酸化しているが、B 面ではあまり炭酸化していなかった。供試体中の粗な状態の弱部で炭酸化が進行したと思われる。00-V-1、00-V-2

の B 面や 20-V-1、20-V-2、80-V-1、80-V-2 の炭酸化深さはわずかであり、全体的には、V シリーズの炭酸化深さは小さかった。

28 日間気乾養生した D シリーズについては、20-D-2 では外周部が十分に乾燥していると推察され、その部分が炭酸化しているが、どのように外周部に CO_2 ガスが拡散したかは明らかでない。いずれにしても 20-D-2、20-D-6 とも、 CO_2 注入孔周囲の炭酸化エリアはほとんど発生しなかった。V シリーズ、D シリーズの結果より、ある程度断面の大きさがある実際の構造物では、ただ注入孔より CO_2 ガスを注入しても炭酸化が進行しにくいことが明らかになった。

外周 4 面を開放している 20-N-3 では、ほぼ全断面が炭酸化した。これは、河合ら⁴⁾や田口ら⁵⁾の研究と同様の結果であり、外周部が開放されている、言い換えれば極薄い部材であれば注入孔よ

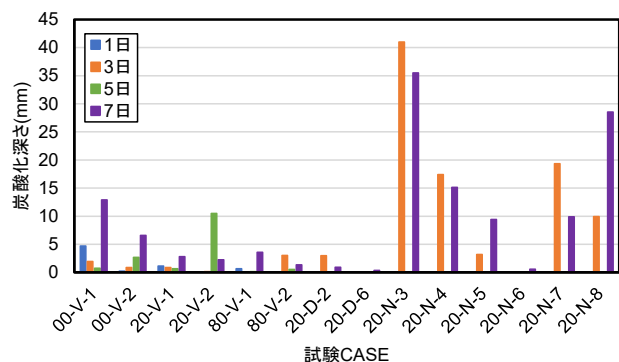


図-8 各実験 CASE の炭酸化深さ(Phase2)

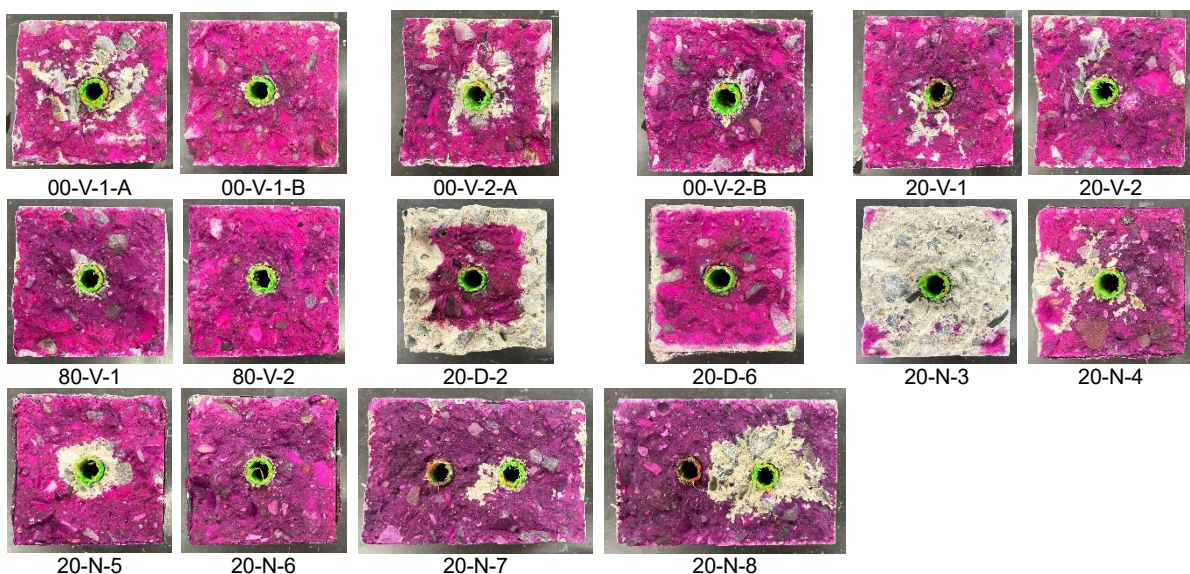


写真-1 炭酸化の状況(炭酸化養生期間 7 日)

り CO_2 ガスを注入すれば炭酸化すると推察される。一方、外周 1 面開放している 20-N-4 では、20-N-3 よりも炭酸化深さが小さいものの、開放面に向かって炭酸化エリアが発生していた。

高圧注入ではなく高 CO_2 濃度環境で養生した 20-N-5、20-N-6 については、 CO_2 注入孔の両端を開放している 20-N-5 では、 CO_2 注入孔周辺に炭酸化エリアが発生したが、片端を開放している 20-N-6 では、ほとんど炭酸化エリアが発生しなかった。これは、20-N-5 では注入孔からコンクリート内部の水分や空気が出入りしやすい条件であり、それらの物質と CO_2 ガスが置換されたため、炭酸化したと推察される。片端開放では、両端開放と比較すると出口が一つとなることにより CO_2 ガスとの置換が十分に行われなかったことが考えられる。Phase1 のように水分や空気と CO_2 が面で置換される場合、最も炭酸化しやすく、両端開放、片端開放と置換条件が厳しくなるにつれて炭酸化しにくくなっていると考えられる。

CO_2 注入孔の隣に通風孔を設けた 20-N-7 では、 CO_2 注入孔周辺に小さい炭酸化エリアが発生した。一方、 CO_2 注入孔の隣に吸引孔を設け、 CO_2 ガス注入と真空吸引を同時に行った 20-N-8 では、 CO_2 注入孔周辺に大きな炭酸化エリアが発生した。吸引孔からコンクリート内部の水分や空気は排出され、 CO_2 注入孔から注入された CO_2 ガスがそれらの物質と置換されたため、炭酸化したと推察される。しかし、吸引孔の対面(注入孔の外周側)でも炭酸化が発生しており、コンクリート内部の水分や空気の移動がどのように起きているのかは、明らかでないため、更なる検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、炭酸化養生開始までの供試体の最適な養生方法、炭酸化しやすい条件を把握し、さらに、 CO_2 注入孔を用いて内部から炭酸化養生する方法について、実際の構造部材を想定し、炭酸化が可能となる条件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) 若材齢時の圧縮強度が発現していない時点で

炭酸化養生を開始することで、炭酸化深さが大きくなる。

- 2) 炭酸化養生開始時の含水率よりも、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。
- 3) 断面の大きい柱状部材などの構造物では、注入孔のみにより CO_2 ガスを注入しても炭酸化が進行しない。一方、部材厚さが薄い壁状部材であれば注入孔より CO_2 ガスを注入すれば炭酸化すると推察される。
- 4) コンクリート内部の水分や空気が排出され、注入した CO_2 ガスがそれらの物質と置換される条件であれば、注入孔周辺に炭酸化エリアが発生する。 CO_2 注入孔の隣に吸引孔を設け、 CO_2 ガス注入と真空吸引を同時に行う方法が、これらの条件を効率よく実現する。

本研究の範囲では、20-N-8 のように、コンクリート内部に設置した対面する 2 孔で CO_2 注入と真空吸引を行うことで、 CO_2 注入孔周辺の炭酸化が促進される可能性が示唆された。よって、柱状部材のような比較的大きな断面の構造物を対象とした炭酸化養生では、図-9 に示すように CO_2 注入孔と真空吸引孔を交互に設けた炭酸化養生システムを実現することで、断面全体の効率的な炭酸化が期待される。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産

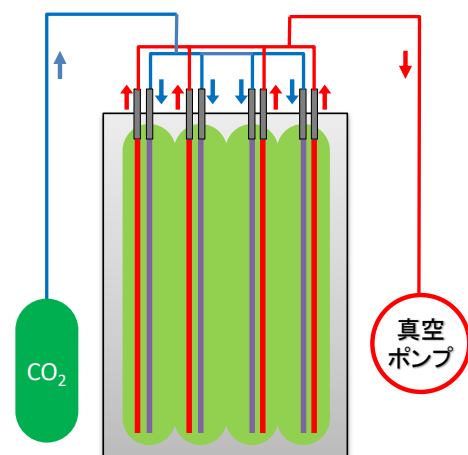


図-9 炭酸化養生システム案

業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

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) 唐沢智之, 岩城圭介, 関健吾, 坂井吾郎: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.46, No.1, pp.1339-1344, 2024.7
- 2) 渡邊賢三, 横関康祐, 取違剛, 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
- 3) 小林聖, 取違剛, 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
- 4) 河合奎亮, 藤倉裕介, Sanjay PAREEK, 荒木慶一: 高圧注入試験装置によるコンクリートの CO₂ 固定化の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.44, No.1, pp.436-441, 2022.7
- 5) 田口翔也, 関健吾, 水野健, 取違剛: 埋込みパイプを用いたコンクリート内部からの CO₂ 固定方法に関する一検討, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, V-290, 2023.9
- 6) 石川英里香, 伊代田岳史, 江口康平, 小島正朗: 高炉スラグ微粉末及び γ -C₂S を添加したセメント硬化体の CO₂ 固定性能の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.45, No.1, pp.88-93, 2023.7
- 7) 唐沢智之, 岩城圭介, 関健吾, 坂井吾郎: 実構造物を想定した炭酸化養生方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.47, No.1, pp.120-125, 2025.7