結合材の主体を高炉スラグ微粉末としたモルタルの炭酸化に関する一検討

A Study on the Carbonation of Mortar Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag as the Main Binder Component

坂本　遼*1，鶴田　葵*1，佐々木　亘*1
RYO SAKAMOTO, AOI TSURUDA, WATARU SASAKI

結合材の主体を高炉スラグ微粉末としたモルタルに水酸化カルシウムを添加し，炭酸化深さおよび炭酸化後の空隙率を確認した。その結果，水酸化カルシウムによって炭酸化抵抗性が向上し，炭酸化による毛細管空隙率の増加が抑制された。また，水酸化カルシウムを他の材料と一括で練り混ぜるよりも，練り上がったモルタルに添加した方が炭酸化の進行はより抑制された。さらに，炭酸化の進行は炭酸カルシウムの生成量の増加に伴って抑制される傾向を示した。

キーワード：高炉スラグ微粉末，炭酸化，水酸化カルシウム

Ground granulated blast-furnace slag based mortar was mixed with calcium hydroxide, and the carbonation depth and porosity after carbonation were evaluated. As a result, it was found that the addition of calcium hydroxide improved carbonation resistance and suppressed the increase in capillary porosity caused by carbonation. Furthermore, the progression of carbonation was more effectively inhibited when calcium hydroxide was added to freshly mixed mortar than when it was premixed with the other dry constituents. In addition, carbonation tended to be further suppressed as the amount of calcium carbonate produced during carbonation increased.

Keywords: Ground granulated blast-furnace slag, Carbonation, Calcium hydroxide

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け，温室効果ガスの一つである二酸化炭素（以下，CO_2）の排出削減に関する技術開発が様々な産業分野で推進されている。セメント・コンクリート分野における方策の一つとして，CO_2 排出量原単位が大きいポルトランドセメント（以下，セメント）の使用量を削減した環境配慮型コンクリートの開発が盛んに進められている。筆者らも産業副産物である高炉スラグ微粉末（以下，GGBS：Ground Granulated Blast-furnace Slag）を利用したセメントを用いないコンクリートを開発している [1)]。GGBS は，セメントの代替材料として用いられることが多いが，GGBS の使用によって炭酸化に対する抵抗性が低下することや炭酸化による組織の多孔質化が確認されている [2)]。その要因としては，ケイ酸カルシウム水和物（以下，C-S-H）の Ca/Si モル比（以下，Ca/Si 比）の低さが指摘されており，Ca/Si 比が低いほうが，より早く炭酸化が進行し [3)]，組織が多孔質になる [4)]とされている。

筆者らもこれまで，セメントを用いずに GGBS を主体としたペーストにて，セメントを用いた場合よりも水結合材比（以下，W/B）が低い条件で炭酸化が進行することや，炭酸化によって空隙構造が粗大化して連続的な空隙構造になることを報告している [5),6)]。また，セメントを主体とした条件よりも C-S-H の Ca/Si 比は低いことが推察され，炭酸化の進行速度や空隙構造の粗大化に大きく影響していると考えられたが，その検討までは至っていない。そこで本研究では，セメントを用いずに結合材の主体を GGBS としたモルタルを対象として，Ca^{2+}を付与する材料として水酸化カルシウム（以下，CH）を使用した際の，圧縮強度，炭酸化深さおよび炭酸化後の空隙構造を確認した。

*1 技術研究所技術開発推進部

2. 実験概要

(1) 使用材料および配（調）合

使用材料を**表-1** に示す。GGBS には石膏が添加された高炉スラグ微粉末 4000（以下，B4）および 6000（以下，B6）を用い，その他の結合材として，シリカフューム（以下，SF）および石灰系膨張材（以下，EX）を用いた。CH は市販の試薬特級とした。モルタル配（調）合を**表-2** に示す。セメント不使用の条件では単位水量と水結合材容積比を同一とした。各粉体の容積比率は既報 [7),8)]の検討より GGBS：SF：EX＝82.5：15：2.5 とし，炭酸化を進行させやすくする目的で既報よりも W/B を高く設定した。また，普通セメントを使用した条件（以下，N）を設け，炭酸化の進行や空隙率を比較した。N は，W/B と単位水量をセメント不使用の条件と同一とした。

CH の使用量はモルタル 1 m^3 に対して 50 kg とし，容積計算には算入せず使用した。単位結合材量に対する CH 量の割合は約 6%である。セメントの水和反応による CH の生成量はセメントに対して 20%程度であり [9)]，約 6%という値は結合材の約 3 割がセメントで構成された条件（高炉セメント C 種相当）を想定している。CH の添加時期は，空練りから添加（CH 一括と表記），後述のフロー値が最大付近に達した注水から約 1 時間後に添加（CH1h と表記），フロー値が練上り直後の値程度まで低下した注水から約 6 時間後に添加（CH6h と表記）の 3 つとした。CH1h は結合材の粒子間の水量が多い状態と仮定し，CH から溶出する Ca^{2+} が最大となる条件を想定して設けた。CH6h は水和反応がある程度進行した状態と仮定し，水和生成物に Ca^{2+} が供給される条件を想定して設け，供試体の採取に支障が無いよう練上り直後のフロー値を基準とした。練混ぜにはモルタルミキサ（公称容量 15 L）を使用し，練混ぜ量は 5.5 L とした。練混ぜ時間は空練りを 30 秒，練混ぜ水の投入から 3 分とした。

表-1 使用材料

材料	記号		種類	物性値
水	W		上水道水	-
結合材	B	B4	高炉スラグ微粉末4000	密度:2.88g/cm³, SO_3量:2.0%, 比表面積:4,470cm²/g
		B6	高炉スラグ微粉末6000	密度:2.86g/cm³, SO3量:3.2%, 比表面積:5,910cm²/g
		SF	シリカフューム	密度:2.25g/cm³, 比表面積(BET法):17.0m²/g
		EX	膨張材	密度:3.15g/cm³, 比表面積：5,280cm²/g
細骨材	S		珪砂5号	絶乾密度:2.58g/cm³, 吸水率:1.33%
水酸化カルシウム	CH		試薬特級	密度:2.21g/cm³
化学混和剤	SP		高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 モルタル配（調）合

配(調)合名	W/B [%]	s/mor※ [%]	単位量[kg/m³] W	B					S	CH※※	SP [B×%]
					OPC	B4	B6	SF	EX			
B4-Base	35	40.2	295	846	-	720	-	102	24	1037	-	0.7
B4-CH一括											50	
B4-CH1h											50	
B4-CH6h											50	
B6-Base				841		-	715	102	24		-	
B6-CH一括											50	
B6-CH1h											50	
B6-CH6h											50	
N		43.7		844	844	-	-	-	-	1127	-	0.7

※モルタル容積に対する細骨材の容積比　※※容積計算に算入せず

表-3 促進炭酸化の条件

0週	→	2日	→	1週	→	4週	→	8週	→	
供試体作製	20℃封かん	脱型	標準水中				温度20℃，60%RH		促進炭酸化	CO_2濃度5%
										CO_2濃度50%
			温度20℃，60%RH		促進炭酸化 CO_2濃度50%					

(2) 測定項目

a) フレッシュ性状

JIS R 5201 に準じて落下振動を与えないフロー値を測定した。練上り後から継続してフロー値の確認を行ったバッチでは，温度 20℃環境に試料を静置し，注水から約 1 時間毎にさじで 30 回かき混ぜた後に試験を行った。

b) 圧縮強度

φ50×100 mm の円柱供試体を用い JIS A 1108 に準じて圧縮強度を測定した。試験は材齢 2 日（20℃封かん），1 週および 4 週（標準養生），1 週および 8 週（後述する促進炭酸化開始時）に実施した。また，促進炭酸化後の圧縮強度の確認を目的に，材齢 1 週または 8 週から材齢 23 週まで CO_2 濃度 50%で促進炭酸化を行った B4-Base，B4-CH 一括，B6-Base および B6-CH 一括（**表-2** 参照）で試験を実施した。

c) 炭酸化深さ

促進炭酸化および促進前の養生条件は**表-3** に示す 3 条件とし，促進炭酸化中の温湿度は 20℃，60%RH で同一とした。炭酸化深さの測定は 40×40×160 mm の角柱供試体で行い，炭酸化進行の程度に応じて測定を実施し，材齢 1 週促進開始条件では促進期間 7 週まで，材齢 8 週促進開始条件では促進期間 15 週までとした。なお，促進期間 15 週の測定のみ φ100×125 mm の円柱供試体を使用した。試験時に開放する面（以下，促進面）は**表-4** に示すように，角柱供試体では打込み側面の片側，円柱供試体では打込み底面とした。促進前の温度 20℃，60%RH 環

境での養生（以下，気中養生）を開始した日に促進面以外をアルミテープで覆い，気中養生期間中における促進面以外の面の炭酸化を防いだ。供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し，促進面から赤紫色に呈色した部分までの距離を 7 か所測定してその平均値を炭酸化深さとし，炭酸化深さの最終測定値とその促進期間から$\sqrt{t}$則に基づき炭酸化速度係数を算出した。

表-4　促進面および割裂面の位置

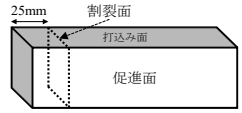
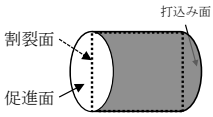
供試体寸法	40×40×160mm	φ100×125mm
促進面および割裂面の位置		

表-5　XRD 分析および示差熱熱重量分析の条件

測定項目	示差熱熱重量分析		XRD
試料採取条件 / 配(調)合	材齢1, 4週 標準水中	材齢1週からCO_2濃度 50%, 促進期間4週	
B4-Base, B4-CH一括 B4-CH1h, B4-CH6h	圧縮強度試験後の供試体の中心部から試料を採取 (材齢1週:B4使用条件は除く)	炭酸化領域の 中心部から採取	
B6-Base, B6-CH一括 B6-CH1h, B6-CH6h		炭酸化領域の 中心部から採取	―
N		―	

d）空隙率

空隙率の測定はアルキメデス法により行った。測定には，各促進条件にて材齢 23 週まで促進炭酸化環境に置いた供試体の炭酸化領域および未炭酸化領域の中心位置から 5～7 mm 角に切り出した 3～4 g の試料を用いた。採取後すぐに蒸留水で真空飽和処理を行った後，水中質量と表乾質量を 0.01 g の精度で測定した。その後，既往研究[9]を参考に，40℃および 105℃乾燥質量を測定し，40℃乾燥で逸散する水を毛管水，40℃から 105℃での逸散水をゲル水と定義し，毛細管空隙率およびゲル空隙率を算出した。

e）化学分析

炭酸カルシウムの結晶構造の確認を目的に**表-5** に示す条件で XRD 分析を行った。供試体の中心部から約 5 mm 角に切り出して試料を採取し，アセトンに 24 時間浸漬した後，乾燥炉を用いて 40℃の大気に触れる条件で 24 時間乾燥させ，メノウ乳鉢と乳棒を用いて粉砕して得た粉末試料を用いた。分析条件はターゲット CuKα，管電圧 40 kV，管電流 7.5 mA，走査範囲 2θ＝5～80°，ステップ幅 0.02° とした。

また，CH および炭酸カルシウムの定量を目的に示差熱熱重量分析を**表-5** に示す条件で実施し，それぞれ，脱水反応および脱炭酸反応による質量減少から定量値を算出した。試料には XRD 分析と同様の手順で作製した粉末試料を用いた。10℃/min で室温から 1000 ℃まで昇温させ，測定中の N_2 流量は 100 mL/min とした。

3. 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

フロー値の測定結果を**図-1** に示す。フロー値は注水から約 1 時間後に最大となり，約 6 時間後には練混ぜ直後の値を下回った。CH を混合することでその添加時期によらずフロー値は大きく低下したものの，充填不足などの不具合はなく各供試体の作製を実施できた。また，B6 を用いるよりも B4 を用いたほうがフロー値は大きく，比表面積の違いが流動性に影響したものと考えられる。経時によるフロー値の低下の程度は B4 と B6 で同様の傾向であった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を**図-2** に示す。CH を添加することでいずれの条件においても圧縮強度は増加した。しかし，その添加時期の違いによる明確な差はなかった。また，B4 に比べて B6 を用いたほうが高い圧縮強度を示し，GGBS の比表面積の違いによって強度発現性に差が生じることが確認された。

材齢 2 日から気中養生または標準養生を行った材齢 1 週の圧縮強度を比較すると，N では標準養生のほうが高かった一方で，セメント不使用の条件ではその差はほとんどなかった。セメントに対して GGBS

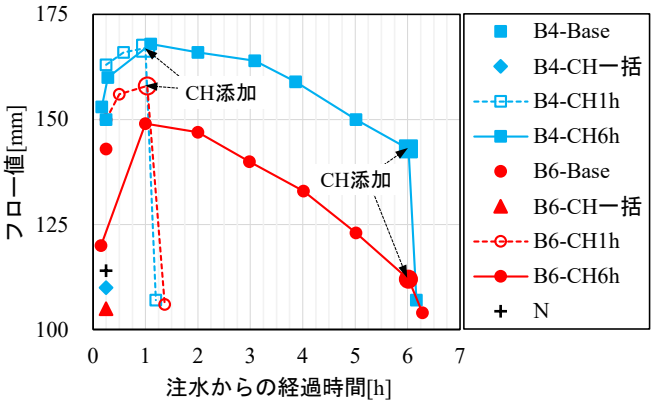


図-1　フロー値

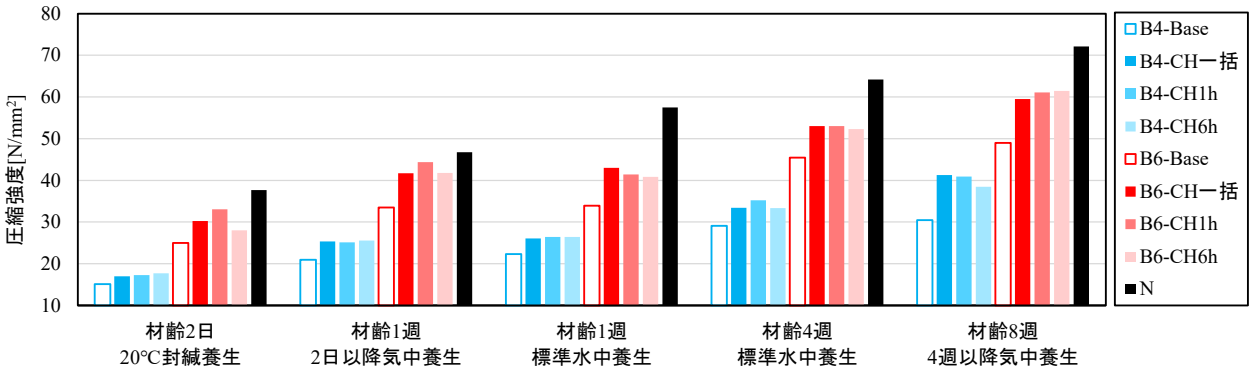


図-2　圧縮強度試験結果

を置換した場合，初期材齢から乾燥を与えると強度発現が緩慢になるが，本モルタルではそのような傾向は確認されなかった。初期材齢での水和反応に要する水量が少ないため，圧縮強度が同等になったと推察されるが，今後，水分の逸散や気中養生を行った長期の強度発現性について検討したい。

(3) 炭酸化深さ

各促進条件における炭酸化深さを**図-3** に，フェノールフタレイン溶液噴霧後の様子の一例を**写真-1** に示す。N ではいずれの条件においても炭酸化は進行せず，セメント不使用の条件との差が明確に確認された。つぎに B4 および B6 を用いた条件では，CH の添加により炭酸化の進行が抑制された。また，一括 CH よりも CH1h および CH6h のほうが炭酸化の進行は遅く，CH の添加時期によって炭酸化の進行速度に差が生じたことが分かる。CH の添加時期の違いによって圧縮強度に明確な差はなかったことから，圧縮強度に寄与しない細孔溶液中の Ca^{2+} 量や溶解せずに残存する CH の量の違いが炭酸化の進行に影響したと考えられる。GGBS の違いによる差を見ると，B4 よりも B6 を用いたほうが炭酸化の進行は遅く，比表面積の違いによって差が生じたと考えられる。

図-4 に，材齢 8 週から促進炭酸化を開始した条件の促進開始時の圧縮強度と炭酸化速度係数との関係を示す。本実験条件において，両者には高い相関性があることがわかる。

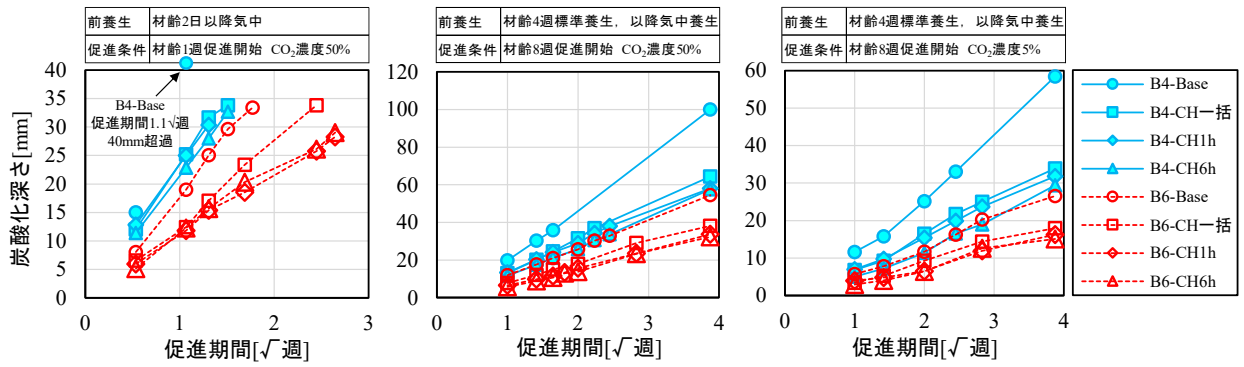


図-3　各促進条件における炭酸化深さ



写真-1　促進 15 週測定時のフェノールフタレイン溶液噴霧後の様子
（左：B4-CH1h　右：B6-CH1h）

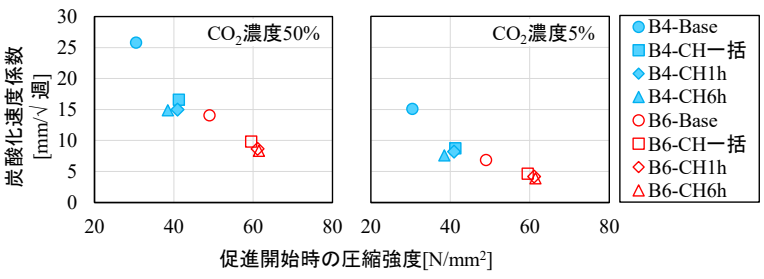


図-4　圧縮強度と炭酸化速度係数との関係

(4) 空隙率

毛細管空隙率およびゲル空隙率を**図-5** に示す。未炭酸化領域では B4 よりも B6 を用いたほうがゲル空隙率は大きく毛細管空隙率は小さいことから，より緻密な構造を有していることがわかる。先述した B4 および B6 における圧縮強度と炭酸化の進行の差は，空隙構造の違いが一つの要因と考えられる。また，CH の添加による空隙率への影響は未炭酸化領域ではほとんど見られなかった。

つぎに，炭酸化による空隙率の変化に着目すると，いずれの条件においてもゲル空隙率は減少し，毛細管空隙率は同等または増大したことから，粗大な空隙構造へ変化したことがわかる。CH の添加に着目すると，その添加時期や促進条件によらず毛細管空隙率は若干低下する傾向が見られた。

材齢 8 週から CO_2 濃度 5%または 50%で促進した条件で比較すると，CO_2 濃度が低いほうが炭酸化後のゲル空隙率は小さく，毛細管空隙率は大きくなっており，作用する CO_2 濃度によって炭酸化後の空隙構造は異なることがわかった。また，材齢 1 週または 8 週から CO_2 濃度 50%で促進した B4-Base，B4-CH 一括，B6-Base および B6-CH 一括で比較すると，早期に炭酸化が生じたほうが毛細管空隙率は大きくなっている。**図-6** は，これらの供試体をピックアップして促進開始時の圧縮強度と炭酸化後の毛細管空隙率の関係を示したものであるが，両者には一定の相関があることが分かる。一般に圧縮強度と毛細管空隙率には高い相関があるとされることから，炭酸化によって毛細管空隙率が大きくなると圧縮強度の低下に繋がる可能性が考えられる。そこで，**図-6** に示した促進条件と同じ，材齢 1 週または 8 週から材齢 23 週まで CO_2 濃度 50%で促進炭酸化を行った供試体の圧縮強度を炭酸化前の圧縮強度と併せて**図-7** に示す。試験後の各供試体の破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧したところ中心部においても呈色は確認されず，供試体全体が炭酸化した状態であった。促進開始材齢によらず炭酸化後の圧縮強度は炭酸化前の圧縮強度を下回っており，炭酸化によって脆弱な組織に変化したことが確認された。

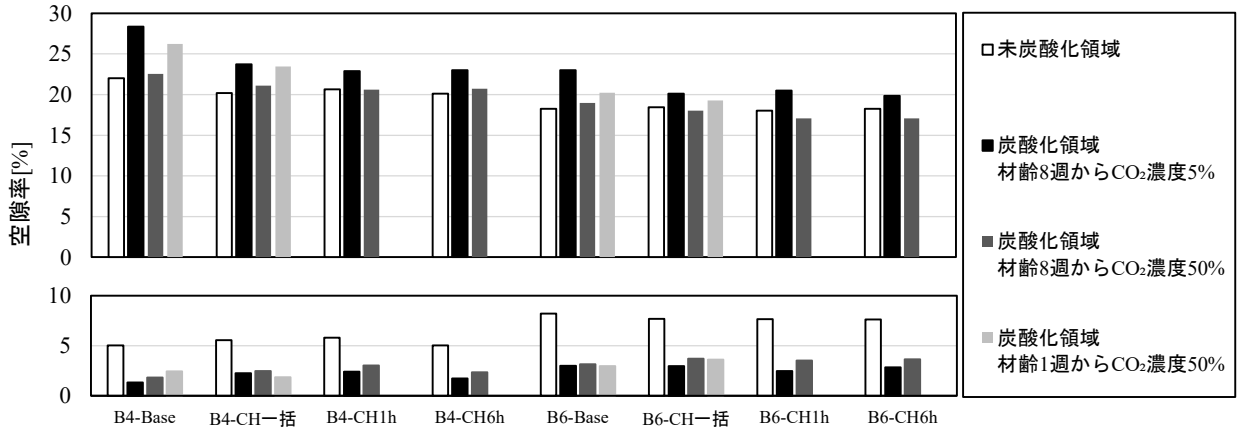


図-5 空隙率（上段：毛細管空隙率　下段：ゲル空隙率）

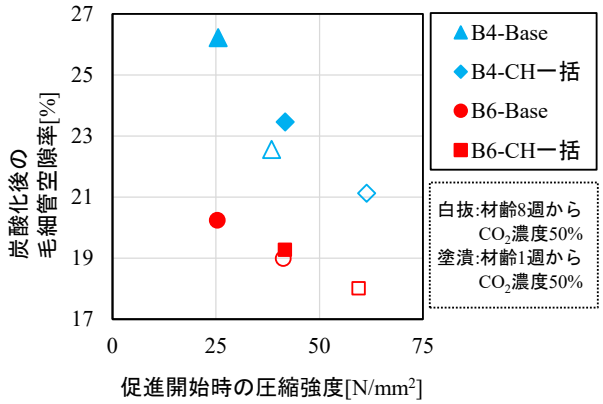


図-6 促進開始時の圧縮強度と炭酸化後の毛細管空隙率との関係

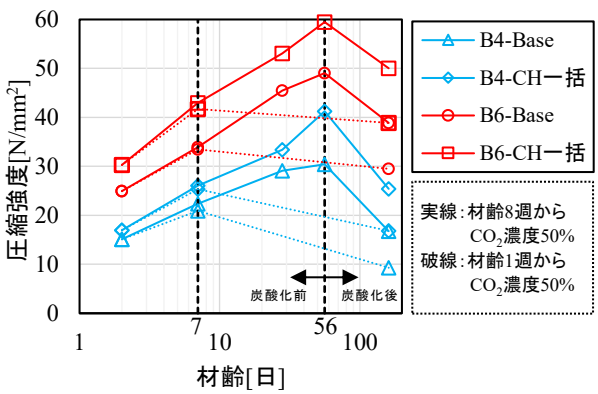
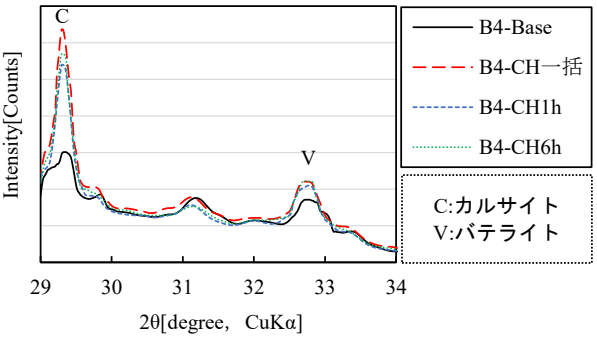


図-7 炭酸化前後の圧縮強度

田中ら[10]は，C-S-H の Ca/Si 比が高いほどその密度は高くなると報告している。本検討において C-S-H の密度は不明であるが，**表−6** に示す空隙率の測定で得た B6 使用条件の 105℃乾燥後の試料密度を見ると，CH の添加によって密度が約 5〜8%増加した。C-S-H 以外の水和物による影響も含まれるが，CH の添加によって C-S-H の Ca/Si 比が向上した可能性が考えられる。なお，CH を容積計算に算入した場合の単位容積質量の増加率は約 0.5%と密度増加の割合と比較して小さく，容積計算への算入の有無による密度への影響は小さいと考えられる。また，炭酸化による試料密度の増加は炭酸カルシウムの生成に伴うものと推察された。今後，圧縮強度を同程度とした条件において，付与された Ca^{2+}量の違いによる炭酸化の進行の差や C-S-H の Ca/Si 比の定量的な評価を実施したい。

表−6　105℃乾燥試料の密度(g/cm³)

採取材齢	材齢1週	材齢4週	材齢23週			
養生条件	標準水中	標準水中	材齢8週から促進炭酸化		材齢1週から促進炭酸化	
			CO_2濃度5%	CO_2濃度50%	CO_2濃度50%	
炭酸化有無	未炭酸化領域		炭酸化領域			
B6-Base	1.76	1.81	1.79	1.87	1.88	1.91
B6-CH一括	1.87	1.90	1.87	1.98	1.98	1.97
B6-CH1h	1.88	1.90	1.88	1.98	2.00	-
B6-CH6h	1.91	1.93	1.91	2.00	2.00	-



図−8　カルサイトおよびバテライトのピーク強度

(5) 化学分析

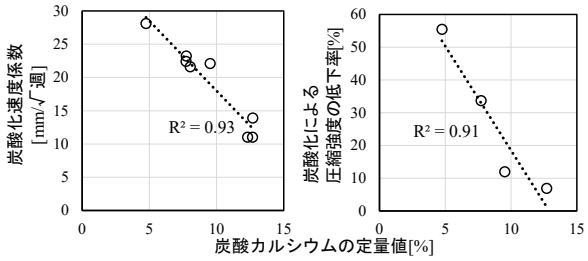
図−8 に XRD 分析より確認したカルサイトとバテライトのピーク強度を示す。CH の添加により，両者のピーク強度が高くなっているが，カルサイトのピーク強度の増加が顕著であった。CH は炭酸化によって最も安定なカルサイトに変化することから[11]，混合した CH の多くは炭酸化によってカルサイトに変化したと推察された。示差熱熱重量分析より算出した CH と炭酸カルシウム（以下，CC）の定量値を**表−7** に示す。材齢 1 週から 4 週にかけて N では水和反応の進行による CH の生成が確認された。一方，B4-Base および B6-Base で CH は確認されなかった。また，B6-CH 一括，B6-CH1h および B6-CH6h の材齢 1 週と 4 週の CH 量の差はほとんどなく，その定量値は 1.5〜1.6%であった。モルタルの単位容積質量に対する CH の添加量は約 2.2%であることから，添加した CH の約 3 割が材齢 1 週までに GGBS の水和反応や SF のポゾラン反応に消費されたと考えられる。また，炭酸化後の分析から，CH は炭酸化によって消失したことを確認した。

表−7　示差熱熱重量分析による定量値(%)

養生条件	標準水中				材齢1週からCO_2濃度50%	
採取材齢	材齢1週		材齢4週		促進期間4週	
対象	CH	CC	CH	CC	CH	CC
B4-Base	測定なし		0	1.8	0	4.8
B4-CH一括			1.6	1.6	0	7.7
B4-CH1h			1.4	1.3	0	7.8
B4-CH6h			1.5	1.4	0	8.0
B6-Base	0	2.3	0.0	2.1	0	9.5
B6-CH一括	1.5	2.3	1.6	2.3	0	12.7
B6-CH1h	1.6	2.2	1.5	2.0	0	12.3
B6-CH6h	1.5	2.2	1.5	1.3	0	12.7
N	6.2	1.5	7.5	1.3	測定なし	

CH：水酸化カルシウム　CC：炭酸カルシウム

つぎに，CC は炭酸化前の状態で 1〜2%ほど存在していた。炭酸化による CC の生成量は，CH の添加によって B4 および B6 で約 3%増加した。CH のモル質量は 74 g/mol，CC のモル質量は 100 g/mol であり，約 3%の CC の生成に必要な CH の量は約 2.2%となる。この値はモルタルの単位容積質量に対する CH の添加量（約 2.2%）とほぼ一致した。炭酸化前において水和反応による CH の生成は確認されなかったことから，炭酸化によって，CH から供給された Ca^{2+}のほぼすべてが CC へと変化したと考えられる。



図−9　炭酸カルシウムの定量値と炭酸化速度係数および炭酸化による圧縮強度低下率との関係

また，CH の添加の有無によらず B4 よりも B6 を用いたほうが炭酸化による CC の生成量が大きかった。**図−9** に材齢 1 週から CO_2 濃度 50%で促進した条件における CC の定量値と炭酸化速度係数，および炭酸化前後の圧縮

強度から計算した，炭酸化による圧縮強度低下率との関係を示す。CC の生成量が多くなる条件ほど炭酸化の進行および炭酸化による圧縮強度の低下は抑制される傾向であった。B4 と B6 の炭酸化の進行の差は，3.（4）空隙率で述べたように炭酸化開始時の空隙構造の差が影響していることに加え，CC の生成量の違いも炭酸化後の空隙構造に変化を与えている可能性が考えられる。

以上の結果より，炭酸化が生じた際に，CO_2 と反応しうる Ca^{2+} 量を多くし，より多くの CC が生成されることで，空隙を充填し炭酸化の進行および空隙構造の粗大化が抑制される可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では，結合材の主体を高炉スラグ微粉末としたモルタルを用い，水酸化カルシウムの添加が各種特性に与える影響を確認した。得られた知見を以下に示す。

① 水酸化カルシウムの添加によって圧縮強度と炭酸化抵抗性が向上し，両者には高い相関がみられた。

② 水酸化カルシウムを他の材料と一括で練り混ぜるよりも，練り上がったモルタルに添加した方が炭酸化の進行がより抑制された。

③ 炭酸化による毛細管空隙率の増加が水酸化カルシウムの添加により抑制された。

④ 高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど炭酸化の進行が遅く，炭酸化後の炭酸カルシウムの生成量も多くなっていることが確認された。

⑤ 炭酸化に伴って生成される炭酸カルシウム量が多いほど炭酸化の進行は遅く， その生成量の違いが炭酸化後の空隙構造に影響したと推察された。

参考文献

1) 松田拓，篠崎裕生，佐々木亘，野並優二：持続可能性に貢献する超低収縮・低炭素コンクリート，コンクリート工学，Vol.58，No.1，pp.84-89，2020.1
2) 魚本健人，小林一輔，星野富夫：高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化，コンクリート工学年次論文集，Vol.2，pp.69-72，1980.5
3) 鈴木一考，西川直宏，林知延：Ca/Si 比の異なる C-S-H の炭酸化，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.18-23，1989.12
4) 西川直宏，鈴木一考：高炉水砕スラグ粉末を用いたコンクリート中の水和物の安定性，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.98-103，1990.12
5) 坂本遼，佐々木亘，小宮克仁：高炉スラグ微粉末を多量に使用したペーストの炭酸化に関する実験的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.24，pp.453-456，2024.10
6) 坂本遼，鶴田葵，茨木泰介，佐々木亘：高炉スラグ微粉末を主体としたペーストの炭酸化による空隙構造の変化に関する実験的検討，三井住友建設技術研究開発報告，第 23 号，No.8，pp.1-6，2025.10
7) 佐々木亘，坂本遼，小宮克仁，松田拓，篠崎裕生：ポルトランドセメントを用いない高強度コンクリートに用いる粉体および細骨材の検討，日本材料学会第 73 期学術講演会講演論文集，No.425，2024.5
8) 佐々木亘，坂本遼，篠崎裕生，松田拓：ポルトランドセメントを用いない高強度コンクリートの特性と初期強度に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.229-234，2024.6
9) 佐川孝広，石田哲也，Yao LUAN，名和豊春：高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.311-324，2010.9
10) 田中洋介，佐伯竜彦，佐々木謙二，須田裕哉：C-S-H の密度に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.70-76，2010.2
11) 高塚稜，吉田夏樹，門田浩史，新大軌：相対湿度が $Ca(OH)_2$ および C-S-H の炭酸化生成物の生成過程に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.77，pp.467-474，2024.3