

論文 炭酸カリウムの添加が低炭素型セメントの硬化反応および CO₂ 固定量に及ぼす効果

福留 和人^{*1}・高木 亮一^{*2}・鈴木 好幸^{*1}・斎藤 豪^{*3}

要旨: 炭酸カリウムの添加が高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを多量に混合した低炭素型セメントの硬化反応および CO₂ 固定量に及ぼす影響を評価した。その結果、高炉スラグ混合率が高いほど炭酸カリウム添加による強度増進が大きく、アルカリ刺激剤としての効果が確認できた。CO₂ 固定量は炭酸カリウムの添加により増加し、また、示差熱重量分析による CO₂ 固定量は高炉スラグ混合率が高いほど大きく、CaCO₃ として固定される割合が高くなることが確認された。さらに、炭酸カリウムの添加でカルサイト量、C-S-H 量、スラグ反応率が高くなることが示され、アルカリ刺激剤としての効果および CO₂ 固定効果が確認できた。

キーワード: 炭酸カリウム, 低炭素型セメント, 圧縮強度, CO₂ 固定量, 水和物組成, スラグ反応率

1. はじめに

2020 年 10 月、菅総理大臣（当時）は、国会での所信表明演説の中で、日本政府として初めて 2050 年までに二酸化炭素ネット排出量ゼロ（カーボンニュートラル）にするとの政策目標を表明した。この宣言により、あらゆる分野で脱炭素化の取り組みが加速している。建設分野では、コンクリートに使用されるセメントは、製造段階で多量の CO₂ を排出することから、CO₂ 排出削減が重要な課題となっている。一方、セメント・コンクリートは供用段階で CO₂ を吸収し細孔溶液中の pH が低下する中性化が進行するが、従来は鉄筋コンクリート構造物の鉄筋の発錆原因の一つとして中性化の抑制対策が取られてきた。しかし、中性化は鋼材腐食の原因となるものの、コンクリート自体に対する悪影響は小さい。コンクリートが供用段階に吸収する CO₂ 量は、セメント製造時の脱炭酸由来の CO₂ 排出量に対して 9~23% と算定され¹⁾、CO₂ の貯留先として非常にポテンシャルが高いと考えられる。このような背景から、コンクリートへの CO₂ 固定に関する技術開発が積極的に進められている。

このようなコンクリートへの CO₂ 固定の方法としては、練混ぜ時に炭酸カリウムを混和して多量の炭酸イオンをコンクリートに取り込み固定する技術が検討され、炭酸カリウムの添加による CO₂ 固定効果が確認されている²⁾。また、pH の高い炭酸塩である炭酸ナトリウムや炭酸カリウムを高炉スラグのアルカリ刺激剤として利用する研究もなされており、高炉スラグのアルカリ刺激剤としての有用性が確認されている^{3),4)}。

そこで本研究では、炭酸カリウムの CO₂ 固定効果およびアルカリ刺激剤としての効果に着目し、炭酸カリウムの添加が高炉スラグ微粉末やフライアッシュを多量混合

表-1 使用材料

材料	種類, 仕様
セメント	普通ポルトランドセメント (N)
高炉スラグ (BFS)	JIS A 6206 高炉スラグ微粉末 4000 密度 2.89 g/cm ³ , 比表面積 4,590 cm ² /g
フライアッシュ (FA)	JIS A 6201 II 種, 強熱減量 2.4% 密度 2.25 g/cm ³ , 比表面積 3,720 cm ² /g
炭酸カリウム (K)	一般工業用, K ₂ CO ₃ 99.0%

表-2 セメントの鉱物組成および結合材の化学組成

鉱物組成 (%)		化学組成 (%)			
鉱物	N	成分	N	BFS	FA
C ₃ S	51.7	SiO ₂	14.4	26.0	60.8
C ₂ S	24.6	Al ₂ O ₃	3.53	11.8	22.1
C ₃ A	4.5	Fe ₂ O ₃	3.74	0.49	7.39
C ₄ AF	10.5	CaO	72.2	52.5	3.58
Gypsum	4.0	MgO	1.13	3.44	0.58
Calcite	4.2	SO ₃	3.27	3.91	0.74
—	—	TiO ₂	0.55	0.40	1.66

した低炭素型セメントの強度発現および CO₂ 固定量に及ぼす効果を評価した。さらに、X 線回折/リートベルト解析、選択溶解法によるスラグ反応率の測定および示差熱重量分析の結果に基づいて、炭酸カリウムの添加が硬化反応および CO₂ 固定量に及ぼす影響を考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を、表-2 にセメントの鉱物組成 (XRD/リートベルト解析による) および結合材の化学

*1 (株) 安藤・間 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 安藤・間 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*3 新潟大学 工学部工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-3 ペーストの配合

配合	W/B (%)	炭酸カリウム	結合材 (mass%)		
			N	BFS	FA
N	50	無添加	100	0	0
BB			57.5	42.5	
BC			30	70	
B90			10	90	
BBFA30			40	30	
N-K(Ks)		外割添加 水溶液 濃度 30% 相当 粉末添加 (K) 溶液添加 (Ks)	100	0	0
BB-K(Ks)			57.5	42.5	
BC-K(Ks)			30	70	
B90-K(Ks)			10	90	
B100-K(Ks)			0	100	
BBFA30-K(Ks)	40	30	30		

組成（蛍光 X 線分析による）を示す。

セメントは、普通ポルトランドセメント (N) であり、Calcite および CaO の含有率から石灰石微粉末等の少量混合成分が混合されていることがわかる。高炉スラグ (BFS) は、JIS A 6206 の高炉スラグ微粉末 4000 であり、せっこうが添加されたもの（表-2 参照）を使用した。フライアッシュは、JIS A 6201 のII種であり、一般的な品質のものである。炭酸カリウム（以下、 K_2CO_3 ）は一般工業用とした。

2.2 ペーストの配合

表-3 にペーストの配合を示す。試験は、水結合材比 50% のペーストにより実施し、結合材の混合割合は、混合材を多量混合した低炭素型セメントを想定して設定した。低炭素型セメントは、高炉スラグを多量混合したセメント (BC, B90) および高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混合したセメントとして高炉セメント B 種にフライアッシュを 30% 混合したセメント (BBFA30) を想定した。なお、 K_2CO_3 の高炉スラグのアルカリ刺激剤としての効果を期待して高炉スラグのみとした配合 (B100) も加えた。また、比較のために汎用セメントの位置付けでポルトランドセメント (N) および高炉スラグを B 種相当の混合率とした配合 (BB) も加えた。ここで、混合率は混合材の結合材に対する質量割合である。

K_2CO_3 は、練混ぜ水を濃度 30mass% の K_2CO_3 水溶液とした場合に相当する量を外割添加した。添加方法は、練混ぜられたペーストに K_2CO_3 を粉末で添加する方法（以下、粉末添加、-K）および練混ぜ水を K_2CO_3 水溶液とする方法（溶液添加、-Ks）の 2 通りとした。比較のために K_2CO_3 を添加しない配合（無添加）も加えた。

2.3 ペーストの練混ぜおよび試験体作製方法

ペーストの練混ぜには、容量 20 l の多用途対応縦型ミキサーを使用した。結合材を 5~10 秒程度空練りしたの

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	
圧縮強度	JIS A 1108, $\phi 50 \times 100$ mm 材齢 7, 28 日 (7d, 28d)	
化学分析	CO ₂ 固定量	湿式分析 (材齢 28 日)
	CO ₂ 固定量 / CaCO ₃ 含有率	示差熱重量分析 (TG-DTA) (材齢 28 日)
	Ca(OH) ₂ 含有率	
	水和生成物 / 組成分析	XRD / リートベルト解析 (材齢 28 日)
	C-S-H の定量	リートベルト解析と 選択溶解法の組合せ (材齢 28 日)
	スラグ反応率	サリチル酸メタノール法 (材齢 28 日)

ち注水し、低速で 60 秒練り混ぜ、練り鉢およびパドルに付着したペーストをかき落としのちさらに高速で 120 秒間練り混ぜた。粉末添加では、高速で 60 秒間練り混ぜ後に添加した。溶液添加では、あらかじめ作製した濃度 30mass% の K_2CO_3 水溶液を所定の水量に濃度 30mass% となる K_2CO_3 の量を加えた量として練り混ぜた。試験体は、 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体とし、プラスチック製の型枠を用いて作製した。養生は封緘養生とし、型枠上面をラップして高湿度の容器に密封して $20 \pm 3^\circ C$ の恒温室に保管した。

2.4 試験項目および試験方法

表-4 に試験項目および試験方法を示す。圧縮強度は、 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱試験体を用い JIS A 1108 に準拠して材齢 7, 28 日に測定した。化学分析は、無添加および粉末添加の試料とした。材齢 28 日に円柱供試体の上下 2~3cm 切り落とした後、5mm 程度に全量粉砕し、充分な量のアセトンに浸漬して水和停止した。 N_2 雰囲気下で乾燥後、 N_2 を流通させたグローブボックス内でメノウ乳鉢を用いて微粉砕しながら $90 \mu m$ ふるいを通過させて回収して分析用の試料とした。以下、試験方法の詳細を示す。

(1) CO₂ 固定量

CO₂ 固定量は、湿式分析および後述する示差熱重量分析により CO₂ 含有率を測定することによって定量した。湿式分析では、試料を塩酸で分解し、生成した CO₂ を水酸化ナトリウム・塩化バリウム溶液に吸収させ、塩酸標準溶液を用いた滴定により CO₂ 含有率を測定した⁵⁾。ここで、 K_2CO_3 以外の材料由来による CO₂ 含有率を補正するために、CO₂ 固定量は、それぞれ同一結合材の無添加の試料の CO₂ 含有率を差し引くことで算定した。

(2) 示差熱重量分析

示差熱重量分析（以下、TG-DTA）は、試料質量約 20mg、温度範囲室温~1000°C、昇温速度 10°C/min.、炉内雰囲気 N_2 300ml/min. の条件で実施した。ここで、TG-DTA で

はセメントの水和反応に関する情報を得るために水酸化カルシウム（以下、Ca(OH)₂）含有率も併せて定量した。

Ca(OH)₂の脱水による質量変化率は、DTA 曲線における 450°C付近の吸熱・発熱前後に引いた接線の交点を、それぞれ反応開始温度 T1、反応終了温度 T2 とし、TG 曲線で T1、T2 間の質量差を読み取ることで求めた。炭酸カルシウム（以下、CaCO₃）の脱炭酸による質量変化率すなわち CO₂ 含有率は、一般的な知見から TG 曲線の 600~850°Cの間の質量変化率とした⁵⁾。これらの質量変化率にそれぞれ式量の比（Ca(OH)₂/H₂O および CaCO₃/CO₂）を乗ずることで、試料中の Ca(OH)₂ 含有率および CaCO₃ 含有率を算出した。なお、CO₂ 含有率、Ca(OH)₂ 含有率および CaCO₃ 含有率は、真空乾燥による絶乾状態のペースト試料の質量に対する含有率となる。

(3) XRD/リートベルト解析

分析用の試料に内部標準として α-Al₂O₃ を内割りで 10mass% 添加し、均一になるようミキサーミルで混合したものを粉末 X 線回折（以下、XRD）用の試料とした。XRD の測定条件は、ターゲット Cu-Kα、電圧/電流 45 kV/40 mA、走査範囲 5~65°、ステップ幅 0.03°/step とした。リートベルト解析は、XRD で同定されたセメント鉱物、セメント水和物、骨材鉱物および α-Al₂O₃ を対象とした。同定された鉱物の定量値を式(1)で、非晶質含有率 G は、星野らの研究⁶⁾を参照して式(2)により求めた。

$$M'x = Mx \times \frac{A}{R} \times \frac{100}{(100-A)} \quad (1)$$

$$G = 100 \times (R-A) / \left(R \times \frac{100-A}{100} \right) \quad (2)$$

ここに、

M'x：鉱物の定量値（%）

Mx：リートベルト解析で定量した値（%）

R：リートベルト解析で定量した α-Al₂O₃ の値（%）

G：リートベルト解析で算出した非晶質含有率（%）

A：α-Al₂O₃ の混合率（%）

(4) スラグ反応率

分析用試料と使用材料の不溶残分量をサリチル酸-アセトン-メタノール溶液を用いた選択溶解法⁷⁾により測定した。スラグ反応率は、不溶残分測定の結果および TG-DTA における室温~850°Cまでの減量値を用いて、佐川らの研究⁸⁾を参考に式(3)により算定した。ここで、選択溶解法では、未反応の高炉スラグに加えてセメント中のアルミネート（C₃A）、フェライト（C₄AF）および炭酸カルシウム（CaCO₃）が不溶残分として残存する。そのため、試料の不溶残分量の測定値からこれらの不溶残分量を差し引いた値を試料中の高炉スラグの不溶残分量、すなわち、未反応スラグ量としてスラグ反応率を算定した。なお、材齢とともにセメント鉱物（C₃A、C₄AF）は

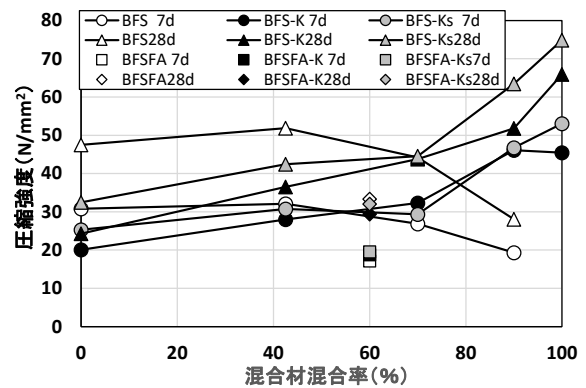


図-1 混合材混合率と圧縮強度の関係

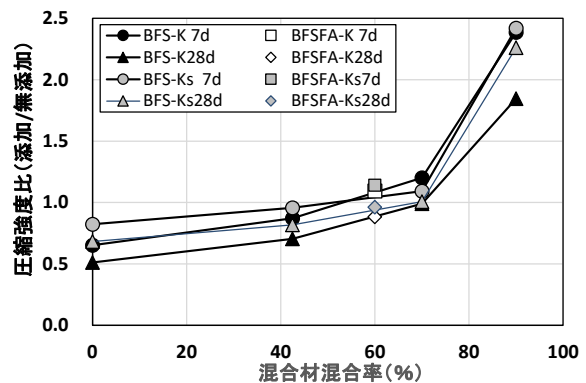


図-2 混合材混合率と圧縮強度比の関係

減少するため、K₂CO₃無添加では N、K₂CO₃添加では N-K の不溶残分量を用いた。

$$\text{スラグ反応率(\%)} = 100 - \frac{x(t) - k_1 \times k_2}{k_3 \times k_4} \times 100 \quad (3)$$

ここに、x(t)：不溶残分率（%）

k₁：N または N-K の不溶残分量（%）

k₂：セメントの割合

k₃：高炉スラグの不溶残分量（%）

k₄：スラグの割合

(5) C-S-H の定量

C-S-H 量は、XRD/リートベルト解析によって得られた非晶質量から選択溶解法による不溶残分量を差し引くことで算出した。ここで、スラグ反応率と同様、無添加では N、K₂CO₃添加では N-K の不溶残分量を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1 に混合材混合率と圧縮強度の関係を、図-2 に混合材混合率と無添加に対する圧縮強度比の関係を示す。

混合率 50%程度以下では、K₂CO₃添加（粉末添加-K、溶液添加-Ks）により圧縮強度が低下しており、セメントの水和を阻害する影響が見られている。混合率が高くなるほど、K₂CO₃添加による圧縮強度の増加が大きくなっている。特に、高炉スラグ混合の場合（BFS）、混合率

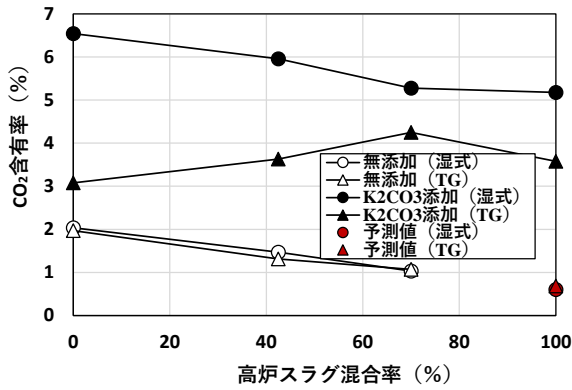


図-3 高炉スラグ混合率とCO₂含有率の関係

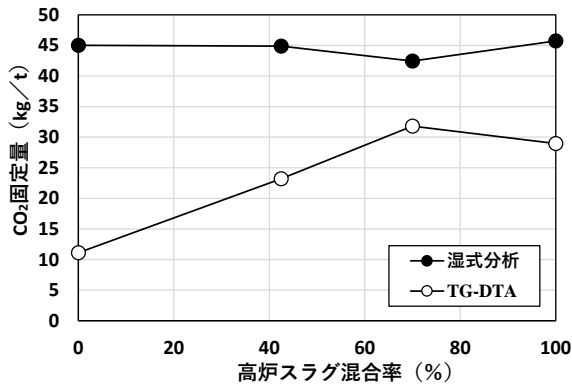


図-4 高炉スラグ混合率とCO₂固定量の関係

90%および100% (セメント無し) ではNおよびBBの無添加を上回る圧縮強度が得られており、K₂CO₃の高炉スラグのアルカリ刺激剤としての効果が高いことが確認できた。なお、K₂CO₃添加がセメントの水和を阻害する影響は、材齢の経過とともに大きくなり、また、アルカリ刺激剤としての効果は、初期材齢ほど大きいことがわかる。高炉スラグとフライアッシュを混合した場合 (BBFA30) は、高炉スラグのみ混合に比べて圧縮強度はやや低くなっているが、混合率と圧縮強度比の関係は、高炉スラグのみの場合と同様の傾向を示している。すなわち、高炉スラグとフライアッシュの合計の混合率は60%であり、強度増進効果と水和を阻害する影響が相殺され、K₂CO₃添加による影響は小さくなっているものと理解される。

粉末添加-Kと溶液添加-Ksを比較すると混合材混合率によらず、粉末添加の方が圧縮強度は低くなっている。粉末添加では、セメントの水和を阻害する影響が大きくなり、また、アルカリ刺激剤としての効果が小さくなっている。粉末添加による強度低下は、練り混ぜが不十分なことによるK₂CO₃の濃度の不均一さの影響が考えられ、今後練り混ぜ時間の延長等の検討が必要である。なお、フレッシュ性状では目視上明確な差は見られなかった。

3.2 CO₂固定量

図-3に高炉スラグ混合率とCO₂含有率の関係を、図

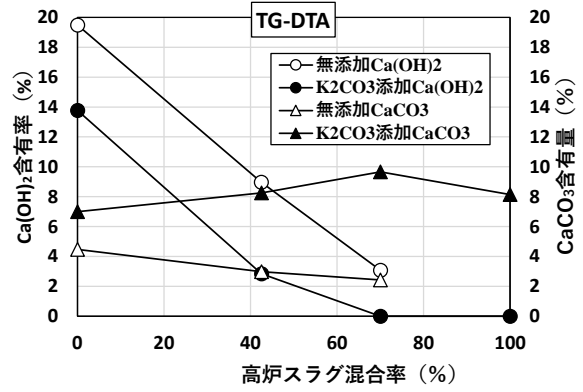


図-5 高炉スラグ混合率とCa(OH)₂およびCaCO₃含有率の関係 (TG-DTA)

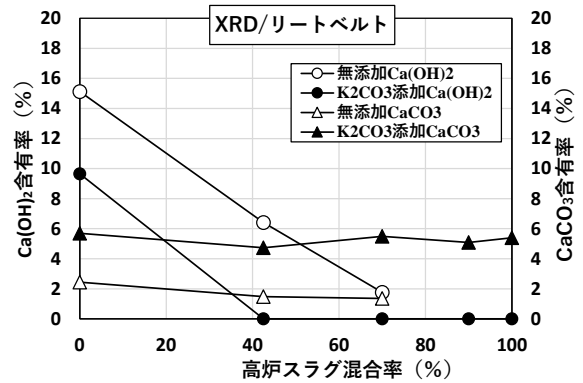


図-6 高炉スラグ混合率とCa(OH)₂およびCaCO₃含有率の関係 (XRD/Rietveld解析)

図-4に高炉スラグ混合率とペースト質量に対するCO₂固定量の関係を示す。ここで、無添加の湿式とTG-DTAのCO₂含有率の測定値はほぼ一致していることから、CaCO₃の脱炭酸による質量変化率の設定温度は概ね妥当と考えられる⁹⁾。なお、無添加の高炉スラグ混合率100%のCO₂含有率は、高炉スラグ混合率とCO₂含有率が直線関係にあると仮定して算定した予測値 (図示) とした。

CO₂固定量をK₂CO₃添加と無添加のCO₂含有率の差から算定しているため、湿式分析の場合K₂CO₃添加分だけCO₂が固定されたとして測定される。そのため、湿式分析によるCO₂固定量は高炉スラグ混合率によらず一定であり、K₂CO₃添加量をペースト質量に対するCO₂添加量に換算した値 (40.7kg/t) に近い値となっている。一方、TG-DTAではCaCO₃の脱炭酸による質量減少率から算定していることから、CaCO₃として固定されたCO₂量を示している。したがって、CO₂固定量の湿式分析とTG-DTAの差は、CaCO₃として固定されていないCO₂、たとえばK₂CO₃ (あるいはCO₃²⁻) や複塩CaCO₃・K₂CO₃などで存在するCO₂量を示していると考えられる。図-4から高炉スラグ含有率が高くなるほどCaCO₃として固定されるCO₂の割合が大きくなる可能性が示唆される。

表-5 XRD/リートベルト解析による鉱物の定量結果

配合	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Po	CC	AFt	AFm	Mc	Hc	KS	Ka	Q	Mu	非晶質
N	3.6	9.5	0.5	4.0	15.1	2.4	3.1	—	2.5	2.2	—	—	—	—	56.9
BB	0.6	5.7	0.0	1.2	6.4	1.5	2.2	2.0	1.9	5.3	—	—	—	—	73.2
BC	0.4	3.2	0.0	0.8	1.8	1.4	1.6	7.1	1.0	2.7	—	—	—	—	80.2
BBFA	0.2	3.4	0.0	0.4	5.0	1.2	1.7	4.4	1.4	4.2	—	—	2.6	2.9	72.7
N-K	5.1	5.8	0.1	6.4	9.6	5.7	—	—	8.4	—	4.1	—	—	—	54.7
BB-K	5.2	7.4	0.0	2.4	—	4.7	—	—	12.5	—	3.9	—	—	—	63.8
BC-K	3.2	3.9	0.0	0.0	—	5.5	—	—	9.4	—	2.8	2.5	—	—	72.7
B90-K	—	1.1	—	0.1	—	5.1	—	—	5.7	—	2.2	2.7	—	—	83.2
B100-K	—	—	—	—	—	5.4	—	—	3.3	1.9	2.5	2.6	—	—	84.3
BBFA30-K	1.5	4.1	0.0	0.0	—	4.6	—	—	11.3	—	2.2	—	2.0	2.2	71.8

Po : Portlandite, CC : Calcite, Mc : Monocarbonate, Hc : Hem carbonate, KS : K₂SO₄, Ka : Katoite, Q : Quartz, Mu : Mullite

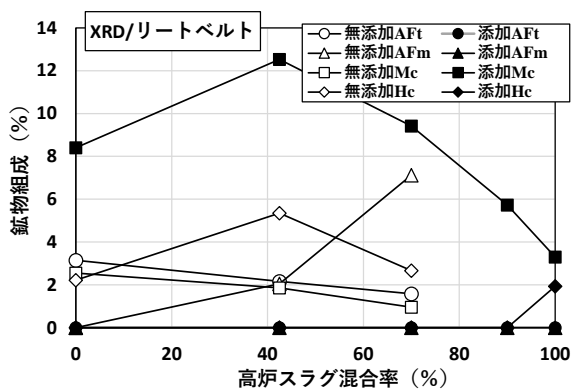


図-7 高炉スラグ混合率と C₃A 系水和物量の関係

4. 化学分析結果および考察

4.1 Ca(OH)₂ および CaCO₃ 含有率

図-5 および図-6 にそれぞれ TG-DTA および XRD/リートベルト解析による Ca(OH)₂, CaCO₃ 含有率の測定結果(表-5 参照)を示す。Ca(OH)₂ 含有率は高炉スラグ混合率とともに直線的に低減し、K₂CO₃ 添加によりさらに低減し混合率 70%以上でほぼ消滅している。K₂CO₃ 添加による水和の阻害の影響と CO₃²⁻との炭酸化反応によると考えられる。高炉スラグ高混合では、Ca(OH)₂ 含有率が低いにもかかわらず CaCO₃ すなわち CO₂ 固定量が高くなっており、Ca(OH)₂ 以外の高炉スラグや C-S-H から溶出される Ca²⁺との炭酸化反応も生じている可能性も考えられる。ここで、XRD/リートベルト解析による測定値は TG-DTA と比較して低い値となっている。これは、XRD/リートベルト解析では、ポルトランドイト (Portlandite) およびカルサイト (Calcite) として定量されており、実際は Ca(OH)₂ および CaCO₃ の結晶性が低くなっていること、また複塩 CaCO₃・K₂CO₃ などで存在していること、などが影響しているものと推測される。

4.2 C₃A 系水和物

図-7 に高炉スラグ混合率と C₃A 系水和物量の関係を示す。無添加では、高炉スラグ混合率とともにエトリン

ガイト (AFt) が減少し、モノサルフェート (AFm) の増加が見られる。また、ポルトランドセメントの少量混合成分 (CaCO₃) との反応によりモノカーボネート (Mc) およびヘミカーボネート (Hc) が生成している。K₂CO₃ 添加により高炉スラグ混合率によらず AFt および AFm は消失し、Mc の生成量が増加している。K₂CO₃ 添加で AFt から AFm へ変化し、さらに CO₃²⁻と AFm の反応により Mc が生成されたものと考えられる。なお、B100-K では、Mc の生成量は減少し、Hc が生成している。以上の反応により AFt および AFm から放出される SO₄²⁻と K₂CO₃からの K⁺により K₂SO₄が生成したことが確認される(表-5 参照)。一方、BBFA30 および BBFA30-K の生成物は高炉スラグのみ混合した場合と類似しており、同様の反応が生じているものと推察される。なお、K₂SO₄ の存在は、ASR への影響など長期耐久性の低下の原因となることも懸念され、今後検討することが課題となる。

4.3 C-S-H 量およびスラグ反応率

図-8 に高炉スラグ混合率と C-S-H 量の関係を、図-9 に高炉スラグ混合率とスラグ反応率および未反応スラグ量の関係を示す。C-S-H 量は高炉スラグ混合率とともにやや減少し、高混合では K₂CO₃ 添加により C-S-H 量の増加が見られる。スラグ反応率は、K₂CO₃ 添加により大幅に増加し、高炉スラグのアルカリ刺激剤としての効果が高いことが確認できる。

5. まとめ

本研究では、炭酸カリウムの添加が高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを多量混合した低炭素型セメントの強度発現および CO₂ 固定量に及ぼす効果を把握した。さらに X 線回折/リートベルト解析、選択溶解法によるスラグ反応率の測定および示差熱重量分析の結果に基づいて、炭酸カリウムの添加が低炭素型セメントの硬化反応および CO₂ 固定量に及ぼす影響を考察した。本研究で

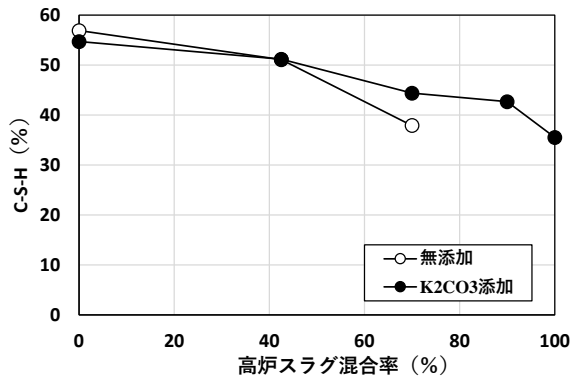


図-8 高炉スラグ混合率と C-S-H 量の関係

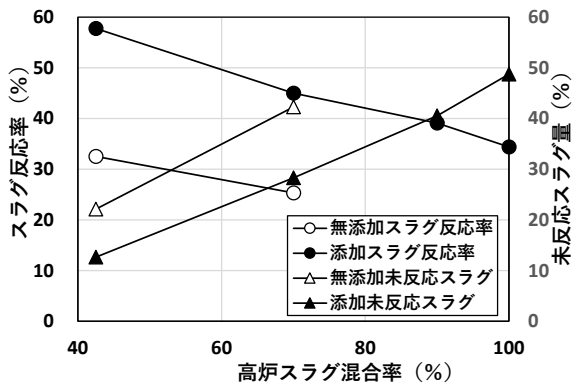


図-9 高炉スラグ混合率とスラグ反応率および未反応スラグ量の関係

得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 混合材混合率 50%程度以下では、 K_2CO_3 添加によるセメントの水和を阻害する影響で圧縮強度が低下するが、混合率が高くなるほど K_2CO_3 添加により圧縮強度は増大した。特に、高炉スラグ混合率 90%および 100%では高い圧縮強度が得られ、高炉スラグのアルカリ刺激剤としての効果が高いことが確認できた。
- (2) 湿式分析による CO_2 固定量は、 K_2CO_3 添加量を CO_2 添加量に換算した値 (40.7kg/t) にほぼ一致し、高炉スラグ混合率によらず一定であった。TG-DTA では高炉スラグ混合率が高くなるほど CO_2 固定量が高くなった。このことから、高炉スラグ混合率が高くなるほど $CaCO_3$ として固定される CO_2 の割合が大きくなる可能性が示唆された。
- (3) 高炉スラグ高混合の配合では、 $Ca(OH)_2$ 含有率が低いにもかかわらず $CaCO_3$ 含有率が高くなっており、 $Ca(OH)_2$ 以外の高炉スラグや C-S-H などから溶出される Ca^{2+} との炭酸化反応も生じている可能性が示唆された。一方、XRD/リートベルト解析による $Ca(OH)_2$ および $CaCO_3$ 含有率の測定値は TG-DTA と比較して低く、 $Ca(OH)_2$ や $CaCO_3$ の結晶性が若干低くなっていること、複塩 $CaCO_3 \cdot K_2CO_3$ など存在していること、などが影響しているものと推測した。

(4) K_2CO_3 添加によりエトリンガイト AFt からモノサルフェート AFm への変化および CO_3^{2-} と AFm の反応によりモノカーボネート Mc が生成されることが確認された。

(5) C-S-H 量は高炉スラグ混合率とともにやや減少するが、高混合では K_2CO_3 添加により C-S-H 量の増加が見られた。スラグ反応率は、 K_2CO_3 添加により大幅に増加し、高炉スラグのアルカリ刺激剤としての効果が高いことが確認できた。

謝辞：本研究は、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) の業務委託 (JPNP21023) の一環として行ったものです。ご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾宙, 野村幸治: ライフサイクルを通じたコンクリートの CO_2 吸収量算定に関する研究, Cement Science and Concrete Technology, Vol.74, pp.333-340, 2021.3
- 2) 向俊成, 関健吾, 取違剛: 炭酸カリウムを多量に混合したコンクリートの諸特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1234-1239, 2023.7
- 3) 門田浩史, 新大軌, 堀口賢一, 坂井悦郎: Na_2CO_3 水溶液の高炉スラグ・フライアッシュ系結合材による固化, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.52-58, 2013.2
- 4) 宮原茂禎, 岡本礼子, 武田均, 坂井悦郎: 炭酸ナトリウムを刺激剤としたスラグセメントペーストの C-S-H の組成, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.69-75, 2015.2
- 5) 鈴木好幸, 山本武志, 小山拓, 野口貴文: 湿式分析と TG-DTA による CO_2 含有率評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1258-1263, 2023.7
- 6) 星野清一, 平尾宙, 山田一夫: X 線回折/リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.41-46, 2006.7
- 7) 近藤連一, 大沢栄也: 高炉水砕スラグの定量及びセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究, 窯業協会誌, Vol.77(2), pp.30-46, 1969
- 8) 佐川孝広, 名和豊春: リートベルト法及び選択溶解法による高炉スラグの反応率測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006.7