

# 論文 高炉セメント B 種の強度発現と水和反応に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響

佐川 孝広\*1・中島 航介\*2

**要旨:** 高炉セメント B 種の強度発現と水和反応に及ぼす無水石こう(CS)と石灰石微粉末(LSP)の影響について検討した。CS 及び LSP の混和により、材齢 3, 7 日でのモルタル圧縮強度は増大し、材齢 28 日での影響は小さかった。CS と LSP を併用した場合、初期の強度発現に有効な LSP の混和率は CS 量が多いほど低くなった。これらの強度変化は、CS 及び LSP の混和により高炉スラグの反応が促進し、カルシウムアルミネート系水和物の生成量が増すこと、C-S-H の密度を高炉スラグ反応率の関数として仮定することで算定した毛管空隙量の変化で良く説明できた。

**キーワード:** 高炉セメント B 種, 圧縮強度, 水和反応, 無水石こう, 石灰石微粉末, 粉末 X 線回折

## 1. はじめに

高炉セメントは CO<sub>2</sub> 排出量削減, 産業副産物の有効利用の観点から利用拡大が望まれている。現在, 我が国では高炉スラグ微粉末(以下, スラグ)を 40-45% 程度混合した高炉セメント B 種が主に使用され, 全セメント使用量の 25% 程度を占め, 汎用セメントとして一般的に使用されている。また, 高炉セメントは一般に長期強度発現性や塩化物イオンの固定化能力に優れ, アルカリシリカ反応の抑制に有効とされており, コンクリートの高性能化, 高耐久化を可能とする材料でもある<sup>1)</sup>。

一方で, 高炉セメントを用いたコンクリートは, 普通ポルトランドセメントを用いたものと比べ, 初期の強度発現が遅いことや早期に乾燥収縮ひび割れが発生する場合もあることが指摘されている<sup>2)</sup>。これらコンクリートの硬化特性は, 結合材であるポルトランドセメントやスラグの水和反応に強く依存していると考えられる。スラグの水和反応は, 少量混和される無水石こう<sup>3,4)</sup>や石灰石微粉末<sup>4-6)</sup>の影響を強く受けることが指摘されているが, 両者を併用した場合の影響やスラグと無水石こうや石灰石微粉末との反応によりもたらされる水和物相組成や硬化体の微細空隙構造形成に関する知見は少ない。また, 高炉セメントの温度ひび割れに関し, 石こうと石灰石微粉末量の添加量を適切に選定することで抑制できる可能性も指摘されており<sup>7)</sup>, このような観点からも高炉セメ

ントの水和反応に及ぼす無水石こうや石灰石微粉末の影響の詳細を明らかにすることは重要と考えられる。

そこで本研究では, 高炉セメント B 種の範疇のスラグ置換率において, 無水石こうと石灰石微粉末量を変化させたモルタル圧縮強度試験及びセメントペーストによる水和反応解析を実施し, 高炉セメントの水和反応-微細空隙構造形成と強度発現との関係について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究では, 研究用普通ポルトランドセメント(OPC), 高炉スラグ微粉末 4000(BFS), 無水石こう(CS)及び石灰石微粉末(LSP)を用い, モルタル圧縮強度及びセメントペーストによる水和反応解析を行った。結合材の化学組成を表-1 に, 高炉セメントの材料構成を表-2 にそれぞれ示す。配合設計は, CS 及び LSP は BFS に置換する方法(OPC 量固定)と OPC に置換する方法(BFS 量固定)あるいは OPC と BFS の比率を一定とする方法とがあるが, 本研究では, CS や LSP の混和が BFS の反応に及ぼす影響について主に議論を行うことから, BFS 量を固定する配合設計法とした。なお, 高炉セメントの JIS 規格では, SO<sub>3</sub> 量の上限值及び少量混合成分としての石灰石微粉末量の上限值がそれぞれ定められている。本研究での高炉セメントの材料構成では, LSP 量 4, 6%, CS 量 6% の水

表-1 使用材料の粉末度及び化学組成

	Blaine		Chemical composition(%)										
	(cm <sup>2</sup> /g)	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ti <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
OPC	3500	0.84	21.28	5.09	3.15	65.36	1.01	2.01	0.32	0.41	0.25	0.10	0.14
BFS	4300	0.56	33.50	14.57	0.33	42.59	6.12	0.04	0.21	0.31	0.60	0.19	0.01
CS	4320	0.9	0.9	0.3	0.1	39.9	0.2	57.5					
LSP	7050	43.20	0.14	0.06	0.02	56.06	0.21		0.01	0.01		0.01	0.02

\*1 前橋工科大学 工学部 社会環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 前橋工科大学 工学部 社会環境工学科

表-2 高炉セメントの材料構成

No.	Composition(%)				SO <sub>3</sub> (%)	JIS
	OPC	BFS	CS	LSP		
1	55	45	0	0	1.16	
2	53			2	1.11	
3	51			4	1.07	×
4	49			6	1.03	×
5	53		2	0	2.26	
6	51			2	2.22	
7	49			4	2.18	×
8	47		6	2.14	×	
9	51		4	0	3.37	
10	49			2	3.33	
11	47			4	3.29	×
12	45			6	3.25	×
13	49		6	0	4.48	×
14	47			2	4.44	×
15	45			4	4.40	×
16	43			6	4.35	×

準で高炉セメント B 種の JIS 規格を満足せず、表中の×印にて示した。

## 2.2 モルタル圧縮強度

表-2 に示す組成の高炉セメントを用い、水結合材比 50 %、5 号珪砂を結合材砂比 1:2 としてモルタルを作製し、JIS A1108 により圧縮強度を測定した。試験体はφ5×10 cm の円柱とし、20 °C 封緘養生にて材齢 3, 7, 28 日の圧縮強度を測定した。

## 2.3 ペースト試料の調製と水和反応解析

一部の水準について、セメントペーストを用いた水和反応解析を実施した。セメントペーストの作製は蒸留水を用い、ハンドミキサにて 2 分間混練した。15 cm<sup>3</sup> のスチロール棒瓶に成型後、ブリーディングを抑制するために注水後 7 時間程度まで、1 時間程度の間隔で容器を振とうさせた。以降の養生は 20 °C 封緘とし、材齢 3, 7, 28 日にて強熱減量及び粉末 X 線回折(XRD)の測定を行った。材齢の経過した試料は脱型後粗砕し、多量のアセトンにて水和停止後、40 °C 24 時間の乾燥を行った。乾燥後の試料は、乳鉢にて微粉砕した。スラグ反応率測定用試料は、900 °C にて 30 分の加熱処理を行い未反応スラグを結晶化させ、このときの減量を強熱減量の値とした。

XRD の測定条件はターゲット CuK $\alpha$ 、管電圧 40 kV、管電流 15 mA、走査範囲 5-70 deg.2 $\theta$ 、ステップ幅 0.02 deg.とし、半導体型高速検出器を用いた。リートベルト解析は SIROQUANT Ver3.0 を用いた。水和試料と同条件にて、平均粒径 3  $\mu$ m のコランダム( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の XRD 測定を行い、これを外部標準試料としたリートベルト解析の

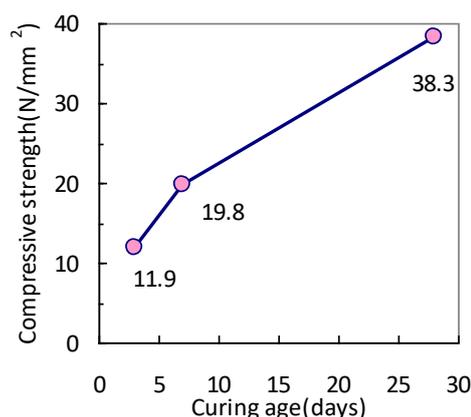


図-1 モルタル圧縮強度

表-3 モルタル圧縮強度比

No.	Strength ratio(%)			JIS
	3d	7d	28d	
1	100	100	100	
2	97	100	108	
3	93	108	112	×
4	107	108	104	×
5	106	109	102	
6	117	127	111	
7	123	140	101	×
8	122	126	107	×
9	123	114	100	
10	120	125	90	
11	136	130	103	×
12	132	120	108	×
13	129	122	103	×
14	138	130	107	×
15	127	131	108	×
16	124	122	97	×

外部標準法<sup>8-11)</sup>にてセメント鉱物及びスラグ反応率、水和生成物量を測定した。解析における定量対象相は、存在が認められた鉱物に応じて C<sub>3</sub>S(mono, tri),  $\beta$  C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A(cubic, ortho), C<sub>4</sub>AF, 2 水石こう, 半水石こう, 無水石こう, Portlandite(CH), Calcite(CaCO<sub>3</sub>), エトリンサイト(AFt), モノサルフェート(AFm), Katoite(C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>), モノカーボネート(Mc), ヘミカーボネート(Hc), ハイドロタルサイト(HT), 加熱処理試料は Gehlenite(C<sub>2</sub>AS), Akermanite(C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>), Merwinite(C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub>), Periclase(MgO), Lime(CaO),  $\alpha$  'C<sub>2</sub>S, Mayenite(C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>), Ye'elimite を選定した。未反応スラグ量は、C<sub>2</sub>AS, C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub> 定量値の合算量とした。上記鉱物の結晶構造は、リートベルト解

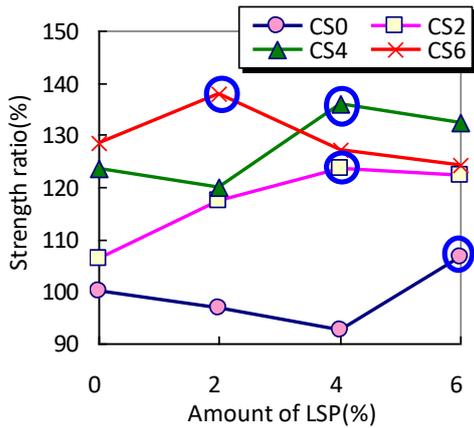


図-2 材齢 3 日での強度比

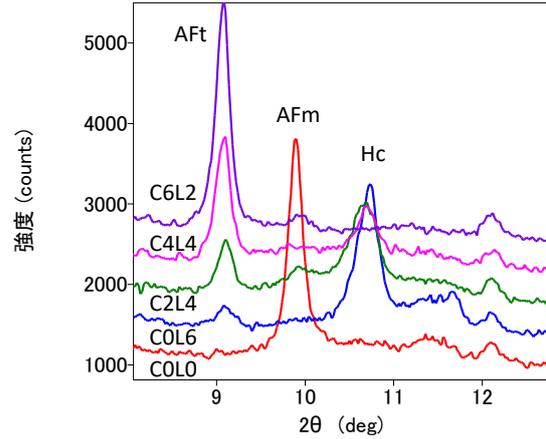


図-3 XRD プロファイルの例(材齢 7 日)

表-4 水和反応解析の水準

No.	Abbr.	Composition(%)				JIS
		OPC	BFS	CS	LSP	
1	COL0	55	45	0	0	
4	COL6	49		6	×	
7	C2L4	49		2	4	×
11	C4L4	47		4	×	
14	C6L2	47		6	2	×

析ソフトウェアにプリセットされたデータを基本とし、Mc, HT については ICSD データベース<sup>12)</sup>の値を、Hc については文献<sup>13)</sup>の値をそれぞれ用いた。なお、ポルトランドセメント中に C<sub>3</sub>S(triclinic)が存在するかについては議論の余地があるが、本研究で使用したリートベルト解析ソフトウェア開発者の報告<sup>14)</sup>に従い、monoclinic および triclinic の C<sub>3</sub>S を定量対象相とした。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 モルタル圧縮強度

図-1 に配合 No.1 のモルタル圧縮強度試験結果を、表-3 にこれを基準としたモルタル圧縮強度比をそれぞれ示す。表-3 により、CS 及び LSP の混和により材齢 3, 7 日での圧縮強度が増大する大まかな傾向が読み取れる。一方で材齢 28 日では、CS, LSP 混和の影響は小さかった。

さらに詳細な検討を行うために、図-2 には材齢 3 日における強度比について、CS の混和率毎に、LSP 混和率が変化した際のモルタル圧縮強度比の推移を示す。図示されるように、CS の混和率毎に強度比が最大となる LSP 混和率が異なる傾向を示した。無水石こう無混和の CS0 では、強度比が最大となる LSP 混和率は実験水準で最も多い 6% となり、CS2, CS4 では LSP4% で、CS6 では LSP2% で強度比が極大値となった。このように、初期の強度発現に有効な LSP の混和率は CS 量が多いほど低く

表-5 水和生成物量の定性分析結果

No.	Abbr.	Age (days)	Hydration products		
			Aft	AFm	Mc, Hc
1	COL0	3	△	◎	×
		7	×	◎	×
		28	×	◎	×
4	COL6	3	△	×	○
		7	△	×	◎
		28	△	×	◎
7	C2L4	3	○	×	○
		7	○	×	◎
		28	○	×	◎
11	C4L4	3	○	×	○
		7	○	×	○
		28	◎	×	◎
14	C6L2	3	◎	×	×
		7	◎	×	×
		28	◎	×	○

なった。

以上の各 CS 混和率で強度比が最大となった水準を図中に○印で示し、当条件にてセメントペーストによる水和反応解析を行うこととした。

#### 3.2 反応率及び水和生成物量

表-4 には高炉セメントの水和反応解析を行った水準を示す。表中の略記号(abbr.)は CS 及び LSP の混和率をそれぞれ C, L とそれに続く数値にて表すこととし、COL0 は CS 及び LSP の混和率がいずれも 0% の水準を示す。基準となる COL0 を除き、他の水準はいずれも CS 量或いは LSP 量が JIS 規格値を満たさず、初期強度発現性の観点からは、JIS の上限値を超える CS や LSP の混和が望ましいことが示唆される。

図-3 には XRD プロファイルの例として材齢 7 日の結果を、表-5 にはカルシウムアルミネート系水和物に着目した定性分析結果をそれぞれ示す。表中の記号は、Aft, AFm, Mc, Hc の XRD 回折線について、回折線がほとんど認められない場合を×、回折線の高さを◎, ○, △の順

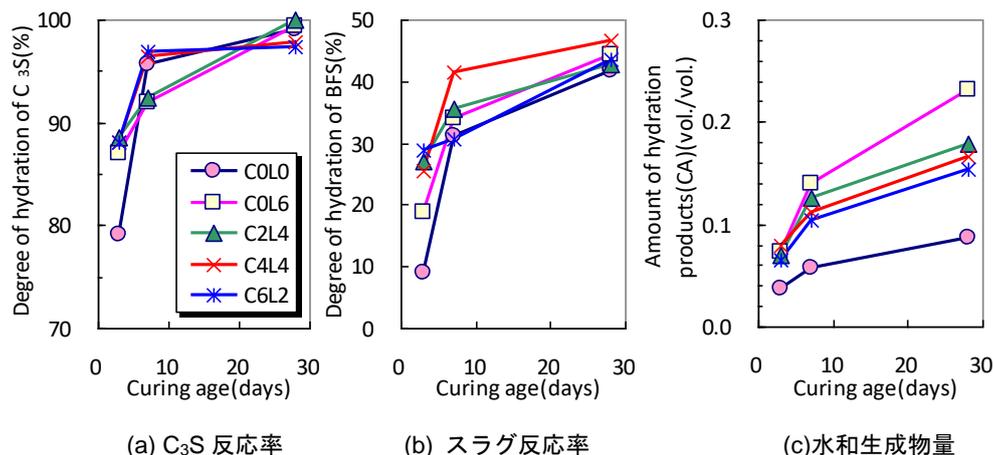


図-4 反応率及びカルシウムアルミネート系水和物生成量

に定性的に示したものである。このように、少量混和している CS 及び LSP の影響により、生成するカルシウムアルミネート系水和物の種類は大きく相違した。CS, LSP 混和のない COL0 では AFm 主体の生成物であるのに対し、COL6 ではカーボネート系水和物、C2L4 及び C4L4 では AFt 及びカーボネート系水和物、C6L2 では AFt が主体の生成物がそれぞれ認められた。

図-4(a)及び図-4(b)には C<sub>3</sub>S 及び BFS 反応率をそれぞれ示す。OPC と比較し、BFS の共存する高炉セメントで C<sub>3</sub>S の反応が促進する傾向は、筆者らの既往の報告<sup>9)</sup>と同様であるが、CS や LSP の混和により、材齢 3 日での C<sub>3</sub>S の反応率はさらに増大した。また、CS 混和量の多い C4L4, C6L2 での材齢 28 日の C<sub>3</sub>S 反応率はやや停滞する傾向にあった。

BFS については、CS, LSP の混和により材齢 3 日での BFS 反応率は大きく増大した。特に CS の影響が顕著であった。一方で材齢 28 日では、BFS の反応率に及ぼす CS や LSP の影響は小さかった。

カルシウムアルミネート(CA)系水和物の生成傾向については表-5 に示す通りだが、水和物の生成による空隙充填の観点から、CA 系水和物生成量はペースト単位体積中の生成体積にて評価した。算定には水和物密度の情報が必要であるが、既報<sup>15)</sup>と同様の値を用いた。算定結果を図-4(c)に示す。図示されるように、基準となる COL0 に比較し、CS や LSP の混和により AFt やカーボネート系水和物が生成することで、CA 系水和物の生成量(体積)は大きく増大することが分かる。

以上の結果を俯瞰すると、CS や LSP の混和により材齢初期でのモルタル圧縮強度が増大する原因は、定性的には i) C<sub>3</sub>S や BFS の反応率が促進し、ii) カルシウムアルミネート系水和物の生成量が増すことに起因すると推測される。一方で材齢 28 日については、高炉セメントの水和反応に及ぼす CS や LSP の影響は小さく、圧縮強度

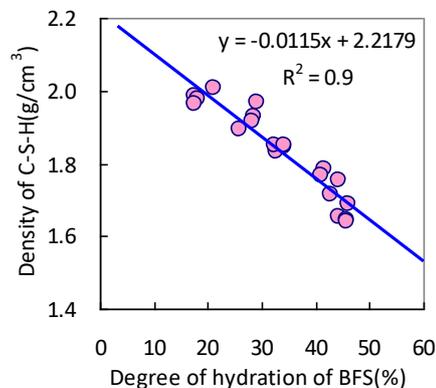


図-5 スラグ反応率と C-S-H の密度との関係

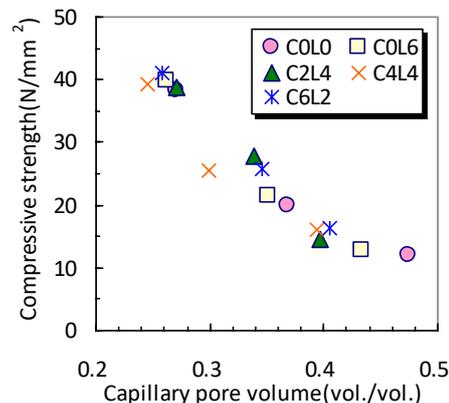


図-6 毛管空隙量とモルタル圧縮強度との関係

への影響も小さいと考えられる。より詳細には、C-S-H を含めた相組成や毛管空隙量との関係を定量的に検討する必要があり、次項にて考察することとする。

### 3.3 空隙率と強度発現

これまでの実験結果により、高炉セメント B 種に CS 及び LSP を混和することで BFS の初期の水和反応は大きく促進し、カルシウムアルミネート系水和物の生成量が増大することが明らかとなった。一方で筆者らは、高

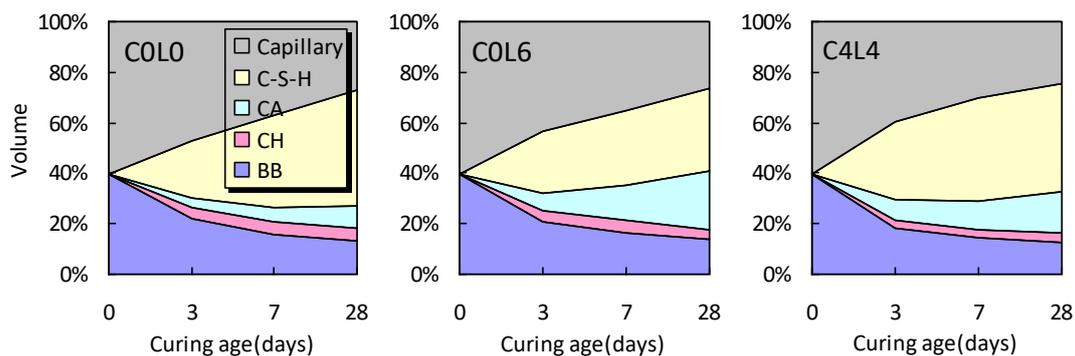


図-7 高炉セメントペーストの相組成変化

表-6 高炉セメントペーストの相組成算定値

Curing age (days)	Phase composition(vol./vol.)														
	COL0					COL6					C4L4				
	BB	CH	CA	C-S-H	Capillary	BB	CH	CA	C-S-H	Capillary	BB	CH	CA	C-S-H	Capillary
0	0.397	0.000	0.000	0.000	0.603	0.399	0.000	0.000	0.000	0.601	0.399	0.000	0.000	0.000	0.601
3	0.219	0.048	0.037	0.221	0.475	0.210	0.040	0.072	0.244	0.433	0.183	0.033	0.079	0.310	0.395
7	0.158	0.048	0.058	0.367	0.369	0.165	0.047	0.139	0.298	0.351	0.145	0.033	0.112	0.410	0.299
28	0.135	0.049	0.087	0.459	0.271	0.139	0.039	0.231	0.328	0.262	0.127	0.036	0.166	0.427	0.245

炉セメントのモルタル圧縮強度はペースト硬化体の表乾質量から 40℃乾燥質量の減量により算定した毛管空隙量と高い相関のあることを明らかにしている<sup>16)</sup>。本研究では、ペースト硬化体の空隙量の測定は行っておらず、これと同様の検討を行うことはできないが、リートベルト解析により得られたペースト硬化体中の非晶質を C-S-H と見なし、既往の研究結果を用いて C-S-H の密度を仮定することで硬化体の毛管空隙量の算定を試みることにする。

図-5 には、筆者らの既往の研究<sup>17)</sup>における高炉セメント B 種の水和反応解析結果から求めた、スラグ反応率と C-S-H の密度との関係について示す。図示されるように、スラグの反応の進行とともに C-S-H の密度は低下し、両者には高い相関のあることが分かる。本研究では、この回帰式を用いてスラグ反応率から C-S-H の密度を算定し、硬化体の相組成及び毛管空隙量を算定した。

図-6 には、算定した毛管空隙量とモルタル圧縮強度との関係を示す。図に示されるように、毛管空隙量とモルタル圧縮強度の相関は高く、本研究での毛管空隙量の算定手法は妥当であるとともに、高炉セメント B 種の水和反応-水和物の生成-毛管空隙の減少といったプロセスの定量的な検討により、硬化体の強度発現をよく説明できることが明らかとなった。

表-4 の各水準での化合物の反応率、水和生成物量の推移を、材齢の経過によるペースト中の相組成変化として示すことができる。図-7 及び表-6 には、高炉セメントペ

ーストの相組成変化の例として COL0, COL6, C4L4 での算定結果をそれぞれ示す。このような相組成の変化から、高炉セメントの水和反応と空隙構造形成との関係を定量的に検討することが可能となる。図示されるように、各配合での水和物の相組成は異なるが、図-6 に示すように、硬化体の強度は水和生成物の種類を問わず、毛管空隙量にはほぼ依存する結果となった。この傾向は、既往の報告と同様である<sup>11, 16, 18)</sup>。

さらに、CS, LSP 混和の影響について着目すると、たとえば石灰石微粉末の内割混和で、高炉セメント B 種の材齢 3~28 日のモルタル圧縮強度は増大することが報告されているが<sup>9)</sup>、この傾向は図-7、表-6 の COL6 に示されるように、BFS の反応の促進により CA の生成量が増すことで毛管空隙量が減少した結果と理解される。この CA 生成量の増大と毛管空隙の減少は、C4L4 も同様であるが、CA 及び C-S-H 生成量の値は COL0 とはやや異なった。また、図-4 に示す通り、CS, LSP の混和が材齢 28 日での C<sub>3</sub>S やスラグの反応に及ぼす影響は小さく、その結果、毛管空隙量、さらにはモルタル圧縮強度へ及ぼす影響も小さかったと推測される。なお、各配合で C-S-H の生成量は異なるが、CS や LSP は OPC に置換して混和しているため、COL6, C4L4 では OPC 量の減少により C-S-H 生成量が減少すること、LSP や CS の混和により BFS の反応は促進するが、CA 生成量が増すために C-S-H の生成量は減少することを表していると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、高炉セメント B 種の強度発現と水和反応に及ぼす無水石こう (CS) と石灰石微粉末 (LSP) の影響について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) CS 及び LSP の混和により材齢 3, 7 日でのモルタル圧縮強度は増大し、材齢 28 日での影響は小さかった。
- 2) CS と LSP を併用した場合、CS の混和率毎に強度が最大となる LSP 混和率は異なり、初期の強度発現に有効な LSP の混和率は CS 量が多いほど低くなった。
- 3) CS 及び LSP の混和により、初期の高炉スラグの反応は大きく促進し、カルシウムアルミネート系水和物の生成量は増大した。
- 4) C-S-H の密度を高炉スラグの反応率の関数として仮定することで算定した硬化体の毛管空隙量とモルタル圧縮強度には高い相関が認められた。

#### 謝辞 :

本研究に用いた高炉スラグ微粉末、無水石こう、石灰石微粉末は株式会社デイ・シイより提供頂きました。また、本研究は文部科学省科学研究費基盤 (B) 課題番号 16H04443 において実施しました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 例えば土木学会コンクリート技術シリーズ 74, 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会 (333 委員会) 報告書ならびにシンポジウム講演梗概集, 2007
- 2) 例えば日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, 2006
- 3) 坂井悦郎, 井元晴丈, 宮原茂禎, 大門正機: 水和反応解析を利用した混合セメントの材料設計, セメント・コンクリート, No.694, pp.46-53, 2004
- 4) Whittaker, M. et al.: The role of the alumina content of slag, plus the presence of additional sulfate on the hydration and microstructure of Portland cement-slag blends, *Cem. Concr. Res.*, Vol.66, pp.91-101, 2014
- 5) Hoshino, S., Yamada, K. and Hirao, H.: XRD /Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement, *J. Adv. Concr. Technol.*, Vol.14, No.3, pp.357-367, 2006
- 6) 佐川孝広, 名和豊春: 高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.93-98, 2007
- 7) 李琮一揆, 大場陽子, 坂井悦郎, 大門正機:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CaCO}_3$  系の水和反応に及ぼす二水セッコウの影響, 無機マテリアル, Vol.5, No.274, pp.194-199, 1998
- 8) Jansen, D. et al.: Does Ordinary Portland Cement contain amorphous phase? A quantitative study using an external standard method, *Powder Diffr.*, Vol.26, No.1, pp.31-38, 2011
- 9) Jansen, D. et al.: A remastered external standard method applied to the quantification of early OPC hydration, *Cem. Concr. Res.*, Vol.41, pp.602-608, 2011
- 10) Jansen, D. et al.: The early hydration of Ordinary Portland Cement (OPC): An approach comparing measured heat flow with calculated heat flow from QXRD, *Cem. Concr. Res.*, Vol.42, pp.134-138, 2012
- 11) 佐川孝広, 名和豊春: X 線回折外部標準法により測定したセメント系材料の水和反応と硬化体の相組成, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.46-52, 2014
- 12) Fachinformationzentrum Karlsruhe and National Institute of Standards and Technology, Inorganic Crystal Structure Database, ICSD., 2006 <http://icsd.ill.fr/icsd/index.html>
- 13) Tomčič Runčevski et al.: Crystal structures of calcium hemicarboaluminate and carbonated calcium hemicarboaluminate from synchrotron powder diffraction data, *Acta Crystallogr. B*, Vol.68, pp.493-500, 2012
- 14) Taylor, J. C., Hinzak, I. and Matulis, C. E.: The importance of including a full crystallography of the major phase polymorphs, *Powder Diffr.*, Vol.15, No.1, pp.7-18, 2000
- 15) 佐川孝広, 濱幸雄, 塚本康誉: 高炉セメント A 種の強度発現と水和反応に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.239-245, 2014
- 16) 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
- 17) 佐川孝広, 名和豊春: 収縮低減剤を混和した高炉セメントの物性変化と水和反応, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.447-448, 2011
- 18) Kucharczyk, S., Deja, A. and Zajac, M.: Effect of Slag Reactivity Influenced by Alumina Content on Hydration of Composite Cements, *J. Adv. Concr. Technol.*, Vol.14, pp.535-547, 2016