

# 論文 高炉スラグ高含有セメントの水和反応と空隙構造特性

佐川 孝広\*1・門間 永悟\*2

**要旨:** 高炉スラグ高含有セメントの水和反応と空隙構造特性について、高炉セメント B 種(BB), C 種(BC)と比較し検討した。モルタル圧縮強度は材齢 3, 7 日で BB と同程度, スラグ反応率は材齢 3, 7 日で BC と同程度となったが, 圧縮強度, 反応率のいずれも以降の材齢で停滞した。水酸化カルシウム生成量は BC に比較して少なく, エトリンガイトが主体であり, 養生温度が高くなるとモノサルフェート生成量が増大した。モルタル圧縮強度とペーストの毛管空隙量の関係は, セメントの種類を問わず概ね同一となり, スラグの水和に由来する結合水やゲル水の生成量は, 高炉セメントの種類や養生温度に関わらずスラグ反応量に依存した。

**キーワード:** 高炉スラグ高含有セメント, 水和反応, 空隙構造特性, 圧縮強度, 粉末 X 線回折

## 1. はじめに

高炉セメントは産業副産物の有効利用, CO<sub>2</sub> 排出量削減の観点から利用拡大が望まれている。我が国で流通する高炉セメントは, 高炉スラグ微粉末(以下, 高炉スラグまたはスラグ)の置換率が 40-45 %程度の高炉セメント B 種(BB)が大半だが, より高炉スラグ含有量を高め, 石こう量等を最適化<sup>1)</sup>した高炉スラグ高含有セメント(ECM)を用いたコンクリートに期待が寄せられている<sup>2,3)</sup>。

ECM の水和反応については, 既往の研究により高炉スラグの反応性, 水和生成物, 養生温度の影響や, 無水石こう, 石灰石微粉末量の影響等について検討されている<sup>4,6)</sup>。これらを踏まえ, 本研究では高炉スラグ, ポルトランドセメントを含めた ECM 全体の系での水和反応を精緻に評価し, セメント水和反応と微細空隙構造形成との関係や強度発現性について, 普通ポルトランドセメント, 汎用の高炉セメントである BB や, 高炉セメント C 種(BC)と比較し検討した。

## 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(N), 高炉スラグ微粉末 4000(BFS), 無水石こう及び ECM を用い, モルタル圧縮強度の測定, セメントペーストによる空隙率の測定と水和反応解析を実施した。結合材の化学組成を表-1 に示す。高炉セメントの調製は, BFS に無水

石こうを SO<sub>3</sub> 2 %で混和した上で 45%(BB), 65%(BC)置換して行った。すなわち, N, BB, BC でのセメント全体としての SO<sub>3</sub> 量は同一となる。ECM は製造会社にて普通ポルトランドセメント, 高炉スラグ等が既調合された高炉セメント C 種の JIS 規格に合致する混合セメントであり, BC とスラグ置換率はほぼ等しく, SO<sub>3</sub> 量が多く, 普通ポルトランドセメントの少量混合成分由来の石灰石微粉末を含有する。なお, BC と ECM では, 使用する普通ポルトランドセメントと高炉スラグは同一ではない。

### 2.2 モルタル圧縮強度

N, BB, BC, ECM の 4 種類のセメントを用い, 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, JISA1108 により圧縮強度を測定した。試験体はφ 5×10 cm の円柱とし, 20 °C封緘養生にて材齢 3, 7, 28 および 91 日にて実施した。

### 2.3 ペースト試料の調製

セメントペーストを用いた空隙率の測定と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。ブリーディングを抑制するために注水後 6 時間程度まで繰り返し後, 4 ×4×16 cm の型枠に成型し 24 時間の 20°C封緘養生を行った。脱型後厚さ 3 mm に切断し, チャック付ポリ袋に少量の水と共に密封した 20°Cの水の中養生を行った。測定材齢は 3, 7, 28 および 91 日とした。

また, ECM の適用対象の多くはマスコンクリート部材

表-1 使用材料の粉末度及び化学組成

	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Chemical composition(%)											
		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>
N	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	4120	0.04	34.33	13.61	0.36	43.05	6.12	-	0.26	0.30	0.62	0.20	0.02
ECM	4170	1.04	28.90	10.96	1.08	49.20	4.13	3.49	0.26	0.27	0.47	0.15	0.11

\*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

であることから、ECM についてのみ、マスコンクリート構造物の内部温度履歴を模擬した養生条件も併せて行った。養生条件は、材齢 6 時間まで 20 °C 環境下で練り置き後、24 時間(材齢 30 時間)で 60 °C まで昇温、60 °C を 24 時間保持した後、6 日間で 20 °C まで降温した<sup>6)</sup>。材齢 8 日間程度まで温度履歴下にあるため、この条件のみ、ペーストは 4×5.5 cm のチャック付ポリ袋に薄板状に成型し、材齢 24 時間で脱型後、チャック付ポリ袋に少量の水と共に密封した 20°C の水中養生を行った。空隙率及び水和反応解析の材齢は 1, 3, 7, 28 および 91 日とした。

## 2.4 空隙率

ペースト試料の表乾質量および 40°C、105°C 乾燥質量を測定し、式(1)により硬化体の空隙率を算定した<sup>9,11,13)</sup>。

$$V_{pore} = \frac{(w_1 - w_2) / \rho_w}{\frac{w_2}{1 + Ig / 100} (WC + 1 / \rho_c)} \quad (1)$$

ここに  $V_{pore}$  : 空隙率(vol./vol.)

$w_1$  : 表乾質量(g)

$w_2$  : 40°C または 105°C 乾燥質量(g)

$Ig$  : 40°C または 105°C からの強熱減量(%)

$WC$  : 水結合材比

$\rho_c$  : セメントの密度(g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_w$  : 水の密度(1.0 g/cm<sup>3</sup>)

表乾質量は、ペースト試料を水中から取り出し、目で見える水膜を拭き取った後直ちに測定した値とし、40°C および 105°C 乾燥質量の測定は異なる試料を用い、乾燥時間は 24 時間とした。算定した空隙率の解釈は 3.3 にて詳述する。

## 2.5 水和反応解析

試料は粉末 X 線回折(XRD)および強熱減量を測定し、セメント鉱物、スラグの反応率および水和生成物量を求めた。材齢の経過した試料は多量のアセトンにて水和停止し、40°C 24 時間の乾燥を行った。乾燥後の試料は、遊星ミルにて微粉碎した。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た。このときの減量を高炉セメント系の強熱減量とし、N の強熱減量は 950°C にて測定した。

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外部標準法<sup>9,10)</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。その他解析における詳細につい

ては、参考文献 10)を参照されたい。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 モルタル圧縮強度

図-1 に N と比較した各セメントのモルタル圧縮強度比を示す。図中の数値は、各材齢での N の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。BB, BC とスラグ置換率が増すほど、N と比較した強度は低下し、BB で材齢 28 日、BC で材齢 91 日にて N と同等の強度を示した。ECM の強度発現性は、BC と同等のスラグ置換率にも関わらず、材齢 3, 7 日の圧縮強度は BB と同程度となった。一方で ECM の材齢 7 日以降の長期強度は停滞し、材齢 28 日で BC と同程度、材齢 91 日での強度増進は小さく、N の強度を下回った。この初期強度は BB と同程度で長期強度の増進が小さい、という ECM の強度発現性は、BC と比較して混和される石こう量が多いためと考えられる<sup>1)</sup>。

### 3.2 反応率及び水和生成物量

図-2 は、スラグ反応率およびポルトランドセメントを含めた高炉セメント全体としての反応率をそれぞれ示す。スラグの反応率は BB, BC と置換率が増すほど低くなり、材齢 91 日での反応率は BB で 60 %、BC で 49 %となった。ECM のスラグ反応率は、材齢 3, 7 日で BC と同程度であるがその後停滞し、材齢 91 日で 38 %となった。以上を材齢 91 日でのスラグ反応量で整理すると、BC(32%)

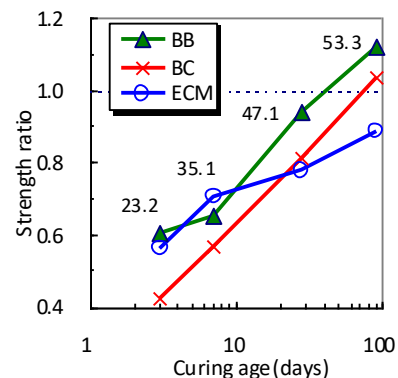


図-1 モルタル圧縮強度

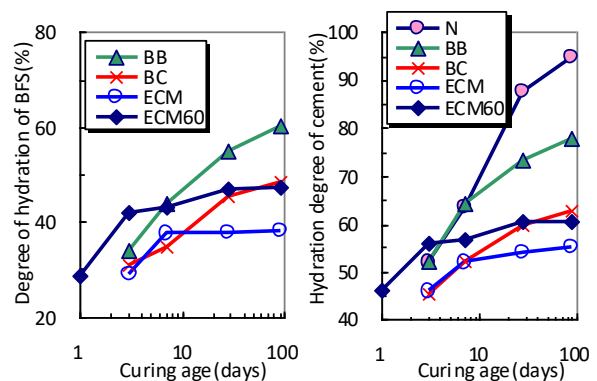


図-2 スラグ反応率およびセメント反応率

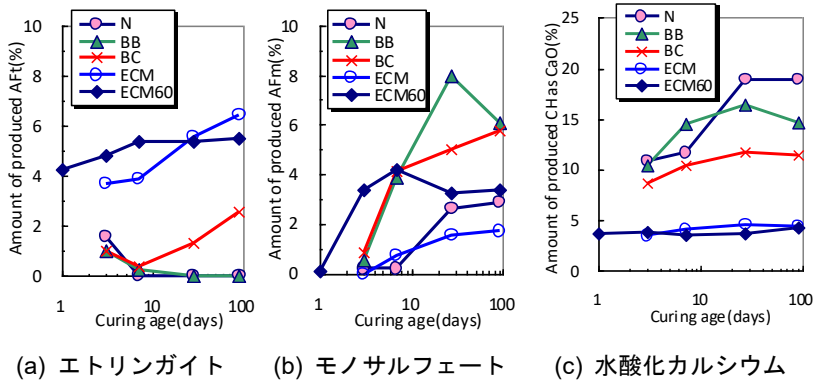


図-3 水和生成物量

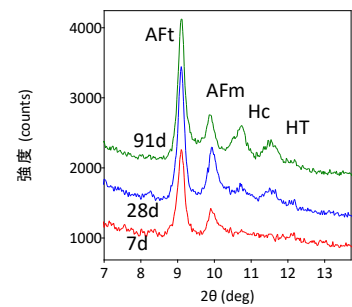


図-4 ECMのXRDプロファイル

>BB(27%)>ECM(25%)となる。マスコン温度履歴を模擬した ECM60 のスラグ反応率は、初期の高温履歴により促進し、材齢 28 日で BC の 20℃水中養生と同程度の反応率を示した。

高炉セメント全体としての反応率は、ポルトランドセメント部の反応率はスラグに比較して高いことに加え、高炉スラグの共存によりポルトランドセメント部の反応は促進傾向にあるため、反応率の絶対値はスラグ反応率に比較して高い。しかし高炉セメント全体としての反応率も、スラグ反応率の傾向を反映する結果となった。

図-3 には、エトリングサイト(AFt)、モノサルフェート(AFm)および水酸化カルシウム(CH)の生成量をそれぞれ示す。ここで、反応生成物量は無水物換算して絶乾セメント質量当たりの生成量として示し、CH量は高炉セメント中のポルトランドセメント量で除して等しいポルトランドセメント量に換算した。SO<sub>3</sub>量が2%程度で一定の条件では、NおよびBBは初期に生成したAFtは、後に消失するとともにAFmの生成が認められた。また、BBではNと比較してAFmの生成量は多くなった。BCでは、カルシウムアルミネート系水和物はAFmが主体であるが、長期材齢においてもAFtが残存した。

一方でSO<sub>3</sub>量の多いECMでは、他のセメントとは異なり、カルシウムアルミネート系水和物は材齢初期から長期にわたりAFtが主体であった。また、マスコン温度履歴を模擬した養生では、AFtに加えAFmも多く生成した。この養生温度が高い際のAFmの生成は、既往の研究結果と一致した<sup>5)</sup>。なお、ECMは普通ポルトランドセメント由来の石灰石微粉末を含有することから、材齢28日以降でヘミカーボネート(Hc)の生成が認められた。図-4には、ECMの材齢7日以降でのXRDプロファイルを示す。ECMの長期材齢でのAFtの残存は、石こう量が多いことに加えて、石灰石微粉末混和によるカーボネート系水和物の生成によりAFtからAFmへの転移反応が抑制された影響も含まれると考えられる<sup>6-8)</sup>。

生成CH量は、等しいポルトランドセメント量に換算

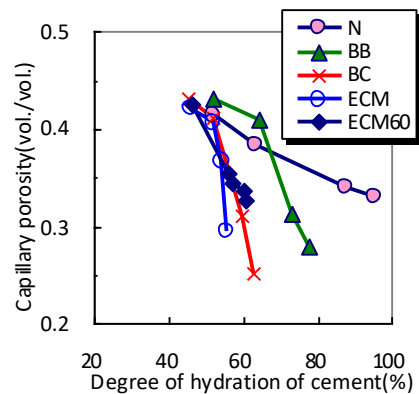


図-5 セメント反応率と毛管空隙量との関係

していることから、Nと各高炉セメントの生成CH量の差異はスラグの反応に消費されたものと考えられることができる。ただし、CH量の差異はスラグの共存によりC<sub>3</sub>Sの水和反応が促進された影響も含まれる<sup>11)</sup>。BBの材齢3、7日での生成CH量がNと同程度以上となるのは、スラグの反応によるCHの消費量をC<sub>3</sub>S水和反応の促進による生成CH量の増大が上回った結果と考えられる。また、ECMの生成CH量はBCに比較して少なく、AFtやカーボネート系水和物の生成によるCHの消費などが考えられる。ECMの生成CH量に及ぼす養生温度の影響はほとんど認められず、スラグ反応率やAFt、AFm生成量とは異なる傾向を示した。この原因は現状では明らかでなく、ECM、BC含めた高炉セメントC種の特徴なのか、ECM特有の現象なのか、等詳細な検討が必要である。

### 3.3 空隙率と強度発現

本研究では、式(1)によりペースト硬化体の吸水率から空隙率を算定した。ここで、セメント硬化体中の空隙と水分状態を次のように定義することとした<sup>9,11,12)</sup>。

- 毛管水：表乾状態から40℃乾燥で逸散する水
- ゲル水：40℃から105℃での逸散水
- 結合水：105℃乾燥基点の強熱減量

ただし、105℃乾燥時にAFt、AFmの一部の結合水が脱水することから、ゲル水量の算定において、以下の補正を行った。XRD測定試料の40℃乾燥時にAFt、AFmの結

合水の脱水はなく、リートベルト解析により得られた定量値のうち、AFtは105°C乾燥で20分子の水が、AFmは4分子の水がそれぞれ脱水するものとして<sup>14,15)</sup>、ゲル水量はその値を減じて求めた。

図-5には、セメント反応率と毛管空隙量との関係を示す。セメントの反応の進行とともに毛管空隙量は減少するが、その傾向はNと高炉セメント系では大きく相違した。すなわち、Nではセメントの反応の進行に伴い、毛管空隙量は直線的に減少するのに対し、高炉セメント系では、Nに比較して材齢3,7日の毛管空隙量はやや多く、材齢7日以降はセメントの反応の僅かな進行で毛管空隙量はN以上に著しく減少した。高炉セメントは、長期材齢で水和反応のわずかな進行でより効率的に毛管空隙が水和物で埋められるといえる。このような傾向は、高炉セメントB種領域のスラグ置換率では、筆者らの既往の研究にて明らかにされている<sup>9,11,12)</sup>。本研究での高炉セメントC種領域のスラグ置換率においても同様の結果が得られ、BBと比較してスラグ反応量が多いことから、より顕著にこの傾向が認められた。また、BC, ECM, ECM60のセメントの反応の進行に対する毛管空隙量の減少程度は、ほぼ等しかった。

図-6には、ペースト硬化体の毛管空隙量とモルタル圧縮強度との関係を示す。ややばらつきも認められるが、毛管空隙量とモルタル圧縮強度との関係はセメント種によらずほぼ同一直線上にあり、モルタル圧縮強度はペースト硬化体の毛管空隙量により概ね定まった。このような傾向は、高炉セメントB種領域のスラグ置換率において、筆者らの既往の研究にて明らかにされている<sup>9,12)</sup>。本研究での高炉セメントC種領域のスラグ置換率においても同様の結果が得られた。ただし、毛管空隙量が少ない領域で、同一圧縮強度に対する毛管空隙量は高炉セメント系でやや少ない傾向にあった。これは、毛管空隙量算定での40°C24時間乾燥は水分の逸散が恒量ではなく、毛管空隙量以外に空隙分布や連続性(屈曲度)などが毛管空隙量の測定に影響していることも考えられる。

以上から、高炉セメントの強度発現、水和反応、毛管空隙量との関係は、次のように考えることができる。

- ・モルタル圧縮強度は、セメントの種類に関わらずペースト硬化体の毛管空隙量にて定まる。
- ・BBの材齢3,7日の高炉セメント全体としての反応率はNと同程度だが、Nに対し毛管空隙量は多く、圧縮強度は低い。初期材齢では、高炉セメントは反応率に見合った強度発現や空隙量の減少が認められず、スラグ粒子内に形成される溶脱層と関連があるものと推測される<sup>12,13)</sup>。材齢7日以降の長期材齢では、セメントの反応の僅かな進行で毛管空隙量はN以上に著しく減少し強度は増大した。

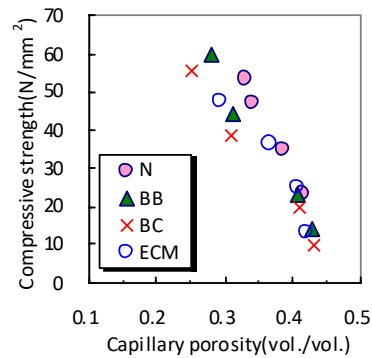
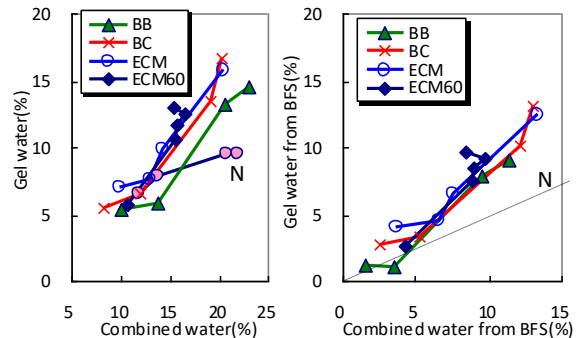


図-6 毛管空隙量と圧縮強度との関係



(a) セメント全体 (b) 高炉スラグ水和由来

図-7 結合水量とゲル水量との関係

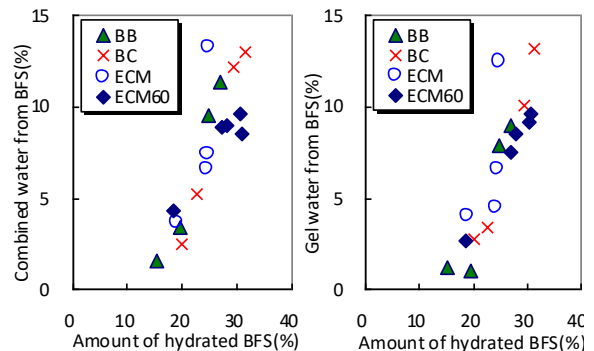


図-8 スラグ反応量と結合水、ゲル水量との関係

- ・BCのスラグ反応率はBBに比較して低いが、反応した量(反応量)はBCが多い。強度発現性や空隙量の減少はBBと同様な傾向であるが、スラグ反応量が多いため、高炉スラグの水和の影響が顕著となる。
- ・ECMの材齢3,7日のスラグ反応率はBCと同程度であるがAFtの生成量が多く、毛管空隙量の減少が顕著となりBBと同等の強度を示す。以降の材齢で強度は増進するが、BCと比較すると高炉スラグの水和反応が停滞する影響で強度の増進は小さい。

図-7(a)には、各セメントの結合水量とゲル水量との関係をそれぞれ示す。セメントの反応の進行に伴う結合水とゲル水の生成は、Nでは両者は一定の割合で増加していた。すなわち、結合水量とゲル水量との関係は直線に

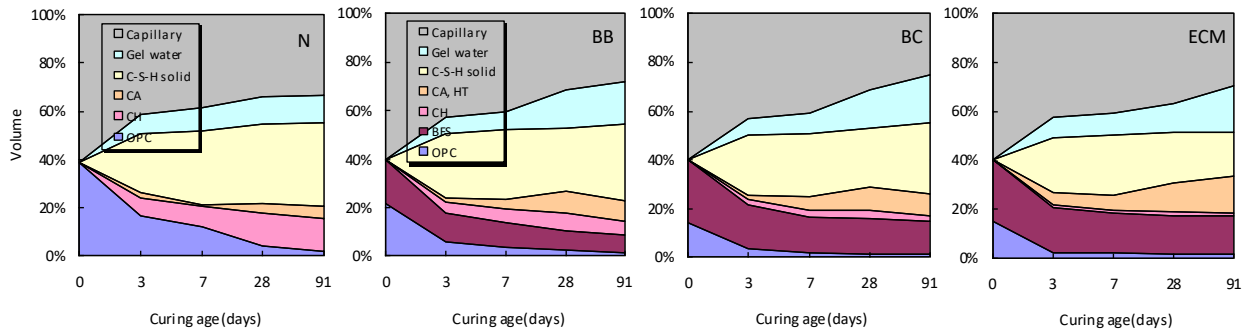


図-9 セメント硬化体の相組成

て示される。一方で高炉セメント系では、結合水量の少ない領域では N と比較してゲル水の生成は少なく、その後の結合水量の増大に伴って、N 以上に多くのゲル水が生成する傾向にあった。また、結合水量とゲル水量との関係は、BB と高炉セメント C 種系(BC, ECM, ECM60)ではやや異なる結果となった。

これら高炉セメントの結合水やゲル水は、ポルトランドセメントや高炉スラグの水和反応により生成するが、測定値はこれらの合算量であり、両者を区別して測定することはできない。そこで、測定した結合水量やゲル水量を、ポルトランドセメントの水和由来と高炉スラグの水和由来に分離することを試みた<sup>12)</sup>。

N のセメント反応率と結合水量との関係、(結合+ゲル)水量との関係を、それぞれ原点を通る直線にて回帰すると、セメント反応率 100 %での終局結合水量は 22.97 % ( $R^2=0.9835$ )、(結合+ゲル)水量は 33.99 % ( $R^2=0.9909$ )となった。したがって、ポルトランドセメントの結合水、ゲル水量はセメント反応率の関数となり、この回帰式と高炉セメント中のポルトランドセメント部の反応率の値から、結合水、ゲル水量をポルトランドセメント部由来とスラグの水和由来に分離して求めた。

図-7(b)にはスラグ水和由来の結合水量とゲル水量との関係を示す。図には、N での結合水量とゲル水量との関係を併せて示した。N では、セメント水和反応の進行に伴って結合水、ゲル水は一定の割合で生成し、両者の関係は図中の直線にて示される。一方で高炉セメント系では、ややばらつきもあるが、結合水とゲル水の関係は高炉セメントの種類を問わず概ね同一直線上にあり、その傾きは N より大きい。すなわち、材齢初期ではゲル水の生成は N と同程度であるが、スラグの水和反応の進行とともに、N と比較するとゲル水を多く含む水和物が生成すると推測される。さらに、スラグの水和反応の進行に伴う結合水とゲル水の生成割合は、高炉セメントの種類や養生温度を問わず一定である。スラグ置換率や少量混合成分の量、養生温度に関わらず、スラグの水和由来する結合水やゲル水の生成量は、図-8 に示す通りスラグ反応量に依存する、という結果は、高炉セメントの水

和反応や硬化体特性に及ぼすスラグ置換率の影響を評価する上で重要な知見である。

また、N に比較して、高炉セメント系でゲル水の生成が多くなる結果は、図-5 に示す毛管空隙の減少と対応する。すなわち、ゲル水の生成が少ない材齢初期では毛管空隙の減少は小さく、一方でゲル水を多く生成する長期材齢では毛管空隙の減少が著しい。

図-9 には、各セメント硬化体の材齢の経過に伴う相組成変化を示す。ここで、C-S-H solid とはゲル水を含まず、結合水を含んだ C-S-H の体積とし、C-S-H の体積は単位セメントペースト体積から未反応セメント体積、結晶性水和物体積、毛管空隙、ゲル空隙の測定値を差し引くことで求めた。また、カルシウムアルミネート系水和物である AFt, AFm, Hc,  $C_3AH_6$  の生成体積の和を CA として表した。

図示されるように、相組成の変化から各セメントの水和反応と空隙構造形成との関係を明確にすることが可能である。N と比較すると、高炉セメント系では未反応スラグが多く残存しているにもかかわらず毛管空隙量は長期で N と同等か少なくなっている。この毛管空隙の著しい減少は C-S-H の保持するゲル水の寄与が大きく、高炉セメントでは C-S-H の保持するゲル水量が水和後期において増加していることが明示された。さらに、N と比較して高炉セメント系でカルシウムアルミネート系水和物量は多く、 $SO_3$  量が最大の ECM で最も生成量が多かった。

#### 4. まとめ

本研究では、高炉スラグ高含有セメント(ECM)の水和反応と微細空隙構造形成との関係や強度発現性について、普通ポルトランドセメント(N)、汎用の高炉セメントである高炉セメント B 種(BB)や、高炉セメント C 種(BC)と比較し検討した。その結果、以下の結論が導かれた。

- 1) ECM の強度発現性は、BC と同等のスラグ置換率にも関わらず、材齢 3, 7 日の圧縮強度は BB と同程度となった。一方で ECM の材齢 7 日以降の長期強度は停滞し、材齢 28 日で BC と同程度、材齢 91 日での強度増進は小さく、N の強度を下回った。

- 2) スラグの反応率はBB, BCと置換率が増すほど低くなり、ECMのスラグ反応率は、材齢3, 7日でBCと同程度であるがその後停滞した。
- 3) SO<sub>3</sub>量が2%程度で一定の条件では、N, BB, BCは長期材齢でのカルシウムアルミネート系水和物はモノサルフェート(AFm)が主体となるが、ECMではSO<sub>3</sub>量が3.5%と程度と多いため、長期材齢においてエトリンライト(Aft)が残存した。ECMのマスコングリートを模擬した初期に高温履歴のある養生では、Aftに加えAFmも多く生成した。
- 4) 水酸化カルシウム(CH)の生成量は、BB, BCとスラグ置換率が増すほど減少した。BCに比較してECMのCH生成量は少なかった。
- 5) Nでは、セメントの反応の進行に伴い毛管空隙量は直線的に減少するのに対し、高炉セメント系では、材齢7日以降でセメントの反応の僅かな進行で毛管空隙量は著しく減少した。スラグ量の多いBC, ECMではこの傾向がより顕著であった。
- 6) ややばらつきもあるが、毛管空隙量とモルタル圧縮強度との関係はセメント種によらずほぼ同一直線上にあり、モルタル圧縮強度はペースト硬化体の毛管空隙量により概ね定まった。
- 7) スラグ置換率や少量混合成分の量、養生温度に関わらず、スラグの水和に由来する結合水やゲル水の生成量は、スラグ反応量に依存した。

**謝辞：**本研究の使用材料は日鉄住金高炉セメント(株)、(株)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 15H04084、鉄鋼スラグ協会および日本スラグセメント・コンクリート技術研究会の助成により実施しました。本研究の考察にあたり、法政大学 溝渕利明教授、グローバル・マテリアルリサーチ(株) 鯉渕清博士、鹿島建設(株) 関田徹志博士に貴重なご示唆を頂きました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐川孝広, 小倉東, 若杉伸一: 高炉スラグ高含有セメントの強度および発熱特性に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響, 第 67 回セメント技術大会講演要旨, pp.140-141, 2013
- 2) T. Yonezawa et al.: High-slag Cement and Structures for Substantial Reduction of Energy and CO<sub>2</sub>, SCMT3, Kyoto, Japan, 2013
- 3) M. Hashimoto et al.: Study on Concrete for Civil Engineering Structures Using High Volume Blast Furnace Slag Cement, J. Adv. Concr. Technol., Vol.14, No.4, pp.163-171, 2016
- 4) 坂井悦郎ほか: 初期水和性状を考慮した高炉スラグ高含有セメントの材料設計, セメント・コンクリート論文集, Vol.65, pp.20-26, 2011
- 5) 坂井悦郎ほか: 高炉スラグ高含有セメントの水和に及ぼす養生温度の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.119-126, 2016
- 6) 佐川孝広ほか: 高炉スラグ高含有セメントの高温履歴下での水和反応に及ぼす無水石こうと石灰石微粉末の影響, 第 71 回セメント技術大会講演要旨, pp.94-95, 2017
- 7) 佐川孝広, 濱幸雄, 塚本康彦: 高炉スラグ-石灰石微粉末系セメントにおけるカーボネート水和物の生成, 第 69 回セメント技術大会講演要旨, pp.52-53, 2015
- 8) M. Whittaker 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
- 9) 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
- 10) 佐川孝広, 中島航介: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.121-126, 2017
- 11) 佐川孝広, 名和豊春: ポルトランドセメント-高炉スラグ系の水和反応-微細構造形成と乾燥収縮, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.652, pp.1029-1037, 2010
- 12) 佐川孝広ほか: 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
- 13) 田中弘文, 戸谷陽一, 斉藤豊: ガラス状高炉スラグおよび合成スラグの水和, セメント技術年報, No.35, pp.53-56, 1981
- 14) Q.Zhou, F.P.Glasser: Thermal stability and decomposition mechanism of ettringite at <120°C, Cem. Concr. Res., Vol.31, pp.1333-1339, 2001
- 15) P.D. Tennis, H.M. Jennings: A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes, Cem. Concr. Res., Vol.30, pp.855-863, 2000