

論文 高炉セメントの水和反応と空隙構造形成に及ぼす養生温度の影響

佐川 孝広*1・小林 日高*2

要旨：高炉セメントの水和反応と空隙構造形成に及ぼす養生温度の影響について検討した。スラグ置換率は0, 25, 45, 65 %とし、養生条件は20および40℃の水中とした。強度発現に及ぼす養生温度の影響はスラグ置換率が高いほど大きく、特に初期材齢での温度依存性が高かった。圧縮強度と毛管空隙量との関係は、セメントの種類や養生温度に関わらず概ね同一となり、硬化体強度は材料・環境によらず毛管空隙量のみ依存した。高炉セメント特有の毛管空隙の減少やゲル水の生成、高炉スラグの水和反応によるC-S-Hのキャラクター変化は、スラグ置換率や養生温度に関わらず、スラグ反応量にて概ね評価できた。

キーワード：高炉セメント、水和反応、空隙構造、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、CO₂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、BFS)の置換率が40-45%程度の高炉セメントB種(BB)が大半だが、適材適所の概念で広範なスラグ置換率の高炉セメントを適用するべく、高炉セメントA種(BA)やC種(BC)に関する検討も進められている^{1,2)}。

高炉セメントの水和反応やそれに伴う微細空隙構造形成は、ポルトランドセメント単体の系とは大きく異なる。筆者らは、高炉セメントB種領域のスラグ置換率において、硬化体の空隙構造の微細化や長期強度増進に関する現象を定量的に示し^{3,4)}、これらのスラグ置換率の影響についても報告した⁵⁾。しかし、高炉セメントの水和反応や空隙構造形成に及ぼす養生温度の影響については、これまでの報告はあるものの^{6,7)}、これらのスラグ置換率の影響については必ずしも明確になっていない。

そこで本研究では、普通ポルトランドセメント(N)、BA, BB, BCを用い、20および40℃水中養生にてモルタル、ペースト硬化体を作製し、強度発現性および高炉スラグ、ポルトランドセメントを含めたセメント全体の系での水和反応や空隙量を精緻に評価した。得られた結果から、高炉セメントの水和反応と空隙構造形成に及ぼす養生温度の影響について検討した。

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(N)、高炉スラグ微粉末4000(BFS)、無水石こうを用い、モルタル圧縮強度の測定、ペースト硬化体による空隙率の測定と水和反応解析を実施した。高炉セメントの調製は、BFS

に無水石こうをSO₃2%で混和した上で25%(BA)、45%(BB)、65%(BC)置換して行った。

2.2 モルタル圧縮強度

N, BA, BB, BCのモルタル圧縮強度を測定した。モルタルは標準砂を用いた水セメント比50%のJIS R 5201(2015)の配合とし、養生条件は20および40℃の水中養生とした。40℃の条件は、試験体の作製は20℃環境にて行い、脱型まで40℃の封緘養生とした。試験体はφ5×10cmの円柱とし、試験は材齢3, 7, 28および91日にて実施した。

2.3 ペースト硬化体の調製

ペースト硬化体の作製は蒸留水を用い、ハンドミキサーにて2分間混練した。4×5.5cmのチャック付ポリ袋に厚さ3mm程度に成型し、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および40℃の水中養生を行った。モルタルの作製と同様に、40℃の条件は試験体の作製は20℃環境にて行い、脱型まで40℃の封緘養生とした。空隙率及び水和反応解析の材齢は3, 7, 28および91日とした。

2.4 空隙率

ペースト硬化体の表乾質量および40℃、105℃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^{3,4)}。

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

ここにV_{pore}：空隙率(vol./vol.)

w₁：表乾質量(g)

w₂：40℃または105℃乾燥質量(g)

Ig：40℃または105℃からの強熱減量(%)

*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

WC : 水結合材比

ρ_c : セメントの密度(g/cm³)

ρ_w : 水の密度(1.0 g/cm³)

表乾質量は、ペースト硬化体を水中から取り出し、目に見える水膜を拭き取った後直ちに測定した値とし、40℃および 105℃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。セメントの密度は、高炉セメントの場合、高炉スラグ、無水石こうを含めた高炉セメント全体としての密度とした。式(1)に示されるように、本実験により算定されるペースト硬化体の空隙率は、試料中の絶乾セメント質量とペーストの理論配合から試料の体積を算定し、算定された試料体積中に対する空隙量として求められる。

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した^{3,4}。

全空隙率：単位ペースト体積中の表乾状態から 105℃乾燥での逸散水量

毛管空隙率：単位ペースト体積中の表乾状態から 40℃乾燥での逸散水量

ゲル空隙率：単位ペースト体積中の 40℃から 105℃での逸散水量

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：40℃乾燥基点の強熱減量

結晶水：105℃乾燥基点の強熱減量

ただし、105℃乾燥時にエトリンサイト(AfT)、モノサルフェート(AFm)の一部の結晶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℃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^{8,9}、ゲル水量はその値を減じて求めた。

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イソプロパノールにて水和停止し、真空ポンプにて脱気後、40℃ 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℃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℃にて測定した。900℃、950℃のいずれも、加熱後はデシケータ内で空冷した。実験条件の妥当性の検証は、既報⁴にて詳述している。

XRD の測定条件はターゲット CuK α 、管電圧 40 kV、

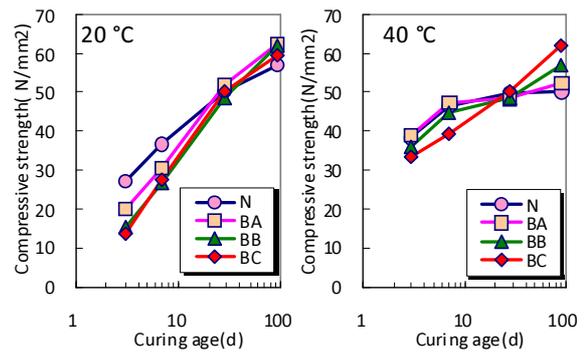


図-1 モルタル圧縮強度

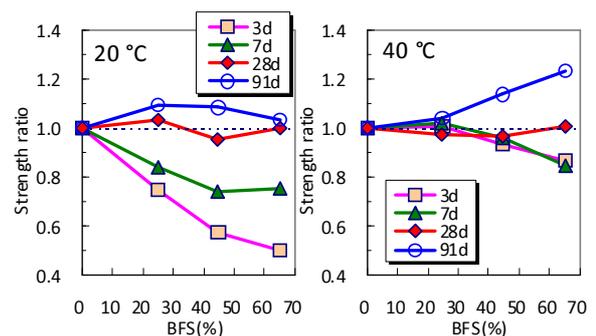


図-2 圧縮強度比(Nと比較)

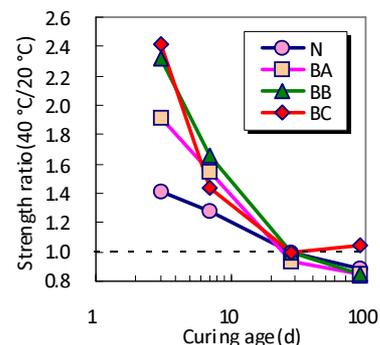


図-3 圧縮強度比(温度比較)

管電流 15 mA、走査範囲 5-70 deg.2 θ 、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 μ m のコランダム(α -Al₂O₃)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¹⁰)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。解析手法の詳細は、既報^{11,12})と同様とし、セメント反応率は未水和セメント中の C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF、BFS(高炉セメントの場合)の合算量に対する各鉱物反応量の合算量の比として算出し、水和生成物は、強熱減量後のセメント質量に対する生成量を無水物換算して求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 モルタル圧縮強度

図-1 にモルタル圧縮強度を、図-2 にスラグ置換率と N

と比較した際の圧縮強度比の関係をそれぞれ示す。20℃では、材齢7日まではスラグ置換率の増加に伴い強度比は直線的に低下するが、材齢28日で全てのセメントで同程度、材齢91日ではいずれの高炉セメントともNの強度を上回った。この傾向は既往の研究結果と一致した¹³⁾。一方で40℃では強度発現の傾向は20℃と大きく異なり、材齢3,7日でのスラグ置換率増加に伴う強度比の低下は大きく抑制され、材齢91日ではスラグ置換率が増すほど強度は高くなった。

養生温度の影響に着目するため、各セメント・材齢での20℃と40℃の強度比として整理したものを図-3に示す。全般に、養生温度の上昇に伴う圧縮強度増大の程度は初期材齢で大きく、材齢の経過とともに20℃との強度差は小さくなる傾向にあった。Nの場合、材齢3日では20℃と比較して40℃では40%程度強度は増大し、28日で同程度、91日では20℃での強度が40℃を上回った。高炉セメントでは、材齢3日での温度上昇による強度増進がNと比較して著しく大きく、20℃と比較した時の40℃の強度はBAで2倍、BB, BCで2.4倍程度となった。この現象は、ポルトランドセメントと比較して高炉スラグの水和反応の温度依存性が著しく高いことに起因すると考えられ⁶⁾、詳細は以降で考察する。

3.2 空隙率と強度発現

図-4には、ペースト硬化体の結合水率および毛管空隙率とモルタル圧縮強度との関係を示す。図中の白抜きが40℃のデータである。セメントの水和反応の進行とともに結合水は増大し、毛管空隙は減少すると考えられるが、これらとモルタル圧縮強度には高い相関があり、かつ、その関係はセメントの種類や養生温度を問わず同一となった。このことは、N, BA, BB, BCでの、一見すると全く異なる強度発現性や強度発現に対する温度依存性は、毛管空隙率の差異のみに起因した。20℃一定の環境では、硬化体の強度はスラグ置換率を問わず、毛管空隙量にて概ね整理できることが既往の研究で明らかにされているが^{2,3,5)}、本実験結果が示すように、40℃養生においても、同一の毛管空隙率であれば、セメントの種類や養生温度を問わず、硬化体の強度は概ね同一となった。この結果は、高炉セメントの水和反応や硬化体特性を評価する上できわめて重要な知見と考えられる。

3.3 水和物組成と空隙構造形成

セメントの種類を問わず、硬化体の強度は毛管空隙率のみに依存するならば、水和物が空隙を充填するプロセス、すなわち、ポルトランドセメントやスラグの水和反応の進行・水和物の生成と微細空隙構造形成との関係を理解することが肝要となる。図-5には、セメントの反応率と毛管空隙率との関係をセメント種別に示す。高炉セメントの反応率は、ポルトランドセメント、スラグを含

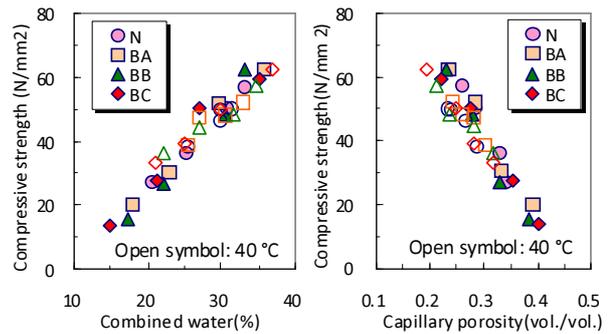


図-4 結合水および毛管空隙率と圧縮強度との関係

めた高炉セメント全体の反応率であり、図中の白抜きの記号は40℃での結果である。

セメントの水和反応の進行とともに毛管空隙率は減少するが、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、高炉セメントでは、Nと比較して材齢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僅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。この傾向は、筆者らの既往の研究と同様である^{2,3,11)}。40℃養生においても概ね同様な傾向にあるが、20℃と比較するとセメントの水和反応の進行に対して毛管空隙の減少程度がやや小さい。これは、初期の高温履歴により反応速度が増し、セメントやスラグ粒子界面に緻密な水和物層が形成して水和物の保有する空隙率が低下し、その結果水和物析出空間である毛管空隙が多く残存した現象と推察される¹⁴⁾。また、図示されるような高炉セメントの反応の僅かな進行での毛管空隙の著しい減少は、高炉スラグの水和によるゲル水量の増加に起因することが指摘されている^{2,3,11)}。測定された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と高炉スラグの水和反応由来の合算量であり、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^{2,3,5,15)}。

Nのセメント反応率と結晶水率および結合水率との関係を、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%での終局の結晶水率は22.78%、結合水率は34.07%となり、この差分がゲル水率となる。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。なお、これらの値は既報²⁾での検討とほぼ等しかった。(それぞれ22.97%, 33.99%)。

図-6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。白抜きの記号は40℃のデータであり、Nでは、セメント水和反応の進行に伴い結合水、ゲル水は一定の割合で増加し、両者の関係は図中のNにて示される。一方で高炉セメントでは、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量の増加は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。養生温度の影響については、40℃養生でややゲル水量の増加が小さくなる傾向にあった。これは、図-5で述べた、セメントやスラグ粒子界面に緻密な水和物層が形成して水和物の保有する空隙率が低下し、その結果水和物析出空間である毛管空隙が多く残存した現象と関連するものと推察される。また、Nと比較して、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、ゲル水量が少ない材齢初期では毛管空隙の減少は小さく、ゲル水量が増大する長期材齢では毛管空隙の減少が著しい。

さらに、図-6に示した結果は、スラグの水和反応の進行によって結合水に占めるゲル水の割合が増加することを意味しており、このことは、ゲル水量の増加は単純にC-S-Hの生成量の増大で説明できるものではなく、スラグの水和反応により生成するC-S-Hのキャラクターは、Nとは異なることが推察される。C-S-HのCaO/SiO₂モル比(C/S比)やH₂O/SiO₂モル比(H/S比)は、Taylorによる高炉セメント水和反応の相組成モデル¹⁶⁾を参考に、筆者らにより既報にて算定されている^{3,5,17)}。既報では、C-S-HへのAl₂O₃の固容量やスラグの水和反応により生成するカルシウムアルミネート系水和物の反応を仮定して算定していたが、本研究では、これとは異なる手法にて算定することとした。すなわち、リートベルト法によりカルシウムアルミネート系水和物生成量を測定していることから、この値を利用し、C-S-HへのAl₂O₃の固容量をスラグ反応量の関数として、カルシウムアルミネート系水和物生成量の測定値と一致するように求めた。具体的には、以下の手順にて算定した。

- (1) スラグの各成分は均一に溶解し、C-S-H, AFm, HTを生成する。
- (2) HTのMg/Al比を2.5として¹⁸⁾、スラグ反応量からHTの生成量を算定する。
- (3) 反応したスラグ中のAl₂O₃のうち、HT, C-S-Hの生成に消費された残りから、AFmが生成する。スラグの水和により、C-S-HへのAl₂O₃の固容量が増大することから¹⁶⁾、C-S-HのAl₂O₃/CaOモル比をスラグ反応量の α 倍とする。無水物換算したAFt, AFm, C₃AH₆生

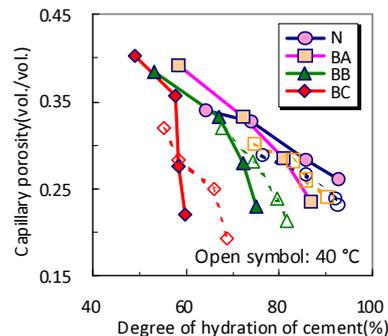


図-5 セメント反応率と毛管空隙率との関係

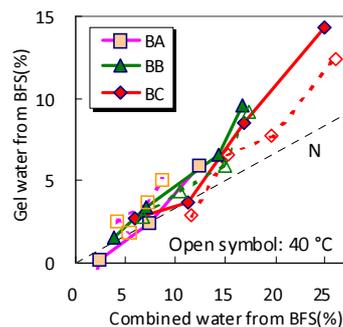


図-6 スラグ水和由来の結合水とゲル水量の関係

成量の測定値をAFm相当量とした上で合算し、同一材齢でのNでの生成量に高炉セメント中のNの含有率を乗じた値を差し引くことでスラグ水和由来のカルシウムアルミネート系水和物の生成量を算定する。この値と一致するように最小二乗法により α を求め、C-S-HへのAl₂O₃の固容量を算定する。

- (4) 反応したスラグ中のCaOのうち、AFmの生成に消費された残りから、C-S-Hが生成する。

以上の算定においては、簡便のためにカルシウムアルミネート系水和物はAFmのみとし、測定されたAFt, AFm, C₃AH₆生成量は無水物換算した上でAFm相当量として合算した。また、C-S-HへのAl₂O₃固容量はスラグ反応量の線形関数としたが、より精緻な算定とするためには検討を要すると考えている。

図-7には、カルシウムアルミネート系水和物(CA)およびHT生成量の算定値と測定値との関係を示す。ややバラつきもあるが、両者の関係は概ね一致した。なお、HTは、反応したスラグ量に応じて初期材齢から生成すると算定されるが、実際には20℃養生では初期材齢でHTの生成は認められない。これは、スラグ中のMgは溶解速度が遅く、スラグ粒子内部に溶脱層として残存していることが推察される^{12,19)}。また、当該手法により算定されたC-S-HのAl₂O₃/CaOモル比は、BAで0.02, BBで0.03, BCで0.05程度となり、ポルトランドセメント中のC₃AやC₄AFからのAl₂O₃の供給を算定していない点を考慮すると、既往の研究¹⁶⁾と比較しても概ね妥当と考えられる。ただし、スラグの水和反応の厳密なモデル化は困難

であり、与えた仮定条件は、実際のスラグの水和反応とは厳密には異なる部分も多い。たとえば、スラグ中の各成分は均一に溶解しないこと^{12, 19)}、HTのMg/Al比は一定ではない²⁰⁾ことなどが挙げられる。したがって、算定されたC/S比の絶対値の妥当性には議論の必要があるが、その変化の全般的な傾向は把握できるものと考えた。

図-8には、スラグ反応量とC-S-HのC/S比との関係について示す。図中の点線はNの平均値であり(2.03)、材齢3, 7, 28, 91日の値を単純平均した。また、白抜きは40℃での算定値である。Nと比較して高炉セメントでのC/S比は小さく、またスラグの反応の進行とともにC/S比は低下し、BAで1.9, BBで1.7, BCで1.6程度と算定され、40℃養生についても同様の傾向にあった。C/S比の値は、既往の研究^{3, 20)}と比較すると0.1程度高くなった。C/S比算定において考慮していない、非晶質のカルシウムアルミネート系水和物の存在等がその要因として考えられるが、上述の通り、算定されたC/S比の絶対値の妥当性には議論の必要があるが、その変化の全般的な傾向は把握できるものと考えている。

図-9にはスラグ反応量とC-S-HのH/S比との関係を示す。図中の点線はNの平均値であり(3.75)、材齢3, 7, 28, 91日の値を単純平均した。白抜きの記号は40℃での算定値である。H/S比の算定では、測定された結晶水量から結晶性水和物の結晶水を減じた値をC-S-Hの結晶水とし、ゲル水はC-S-Hのみに与えた。Nでは、材齢の経過や養生温度でH/S比は大きく変化しないが、高炉セメントではスラグ水和反応の進行に伴ってH/S比は増大し、Nの値を上回った。40℃養生においても同様な結果であるが、20℃と比較するとH/S比はやや低下する傾向にあった。これらH/S比の値は、既往の研究^{3, 5)}と比較して概ね一致しており、リートベルト法により測定された非晶質を全てC-S-Hとして取り扱う等の不確かさはあるが、Nと高炉セメントを比較する上でその変化の全般的な傾向は把握できるものと考えられる。

これらC/S比やH/S比などのC-S-Hのキャラクター変化は、結果としてC-S-Hの密度に影響を及ぼすことが考えられる。C-S-Hの密度の変化は、水和反応の進行に伴う空隙充填への影響が大きいことから、C-S-Hの密度を算定した。図-10には、C-S-HのC/S比と密度との関係を示す。白抜きの記号は40℃での算定値である。C-S-Hの密度算定では、C-S-Hの体積は単位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、毛管空隙を減じることで求めた。質量についても同様である。図示されるように、NでのC/S比は2、密度2g/cm³程度であるのに対し、高炉セメントでは、スラグ置換率の増大に伴ってC/S比、密度ともに低下し、密度はBBで1.9, BCで1.8g/cm³程度と算定された。40℃養生においても同様の

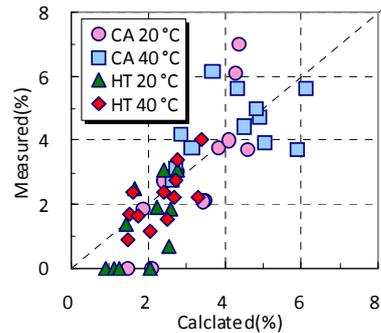


図-7 生成水和物量の測定値と算定値との関係

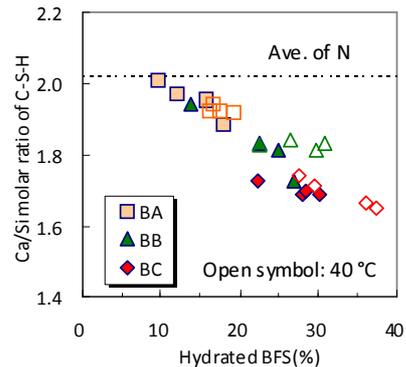


図-8 スラグ反応量とC-S-HのC/S比との関係

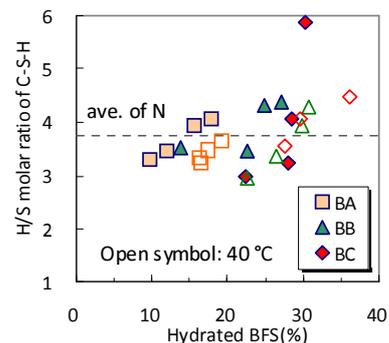


図-9 スラグ反応量とC-S-HのH/S比との関係

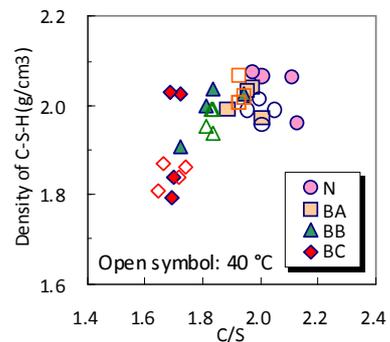


図-10 C-S-HのC/S比と密度との関係

傾向となった。なお、C-S-Hの生成量の影響については、既往の研究では、NとBBとでゲル水を含めたC-S-Hの生成量は概ね等しいことが報告されている¹¹⁾。本研究においても、Nおよび各高炉セメントでC-S-Hの生成量に大きな差異はなかった。したがって、高炉セメントに見られる毛管空隙の顕著な減少は、C-S-Hの生成量ではな

く、C-S-Hの組成の影響が卓越するものと判断される。

以上から、高炉セメントでは、Nと比較してゲル水の生成が増し、低密度のC-S-Hが生成することで効率的に毛管空隙が水和物で埋められ、20℃養生では長期材齢での強度増進に、40℃養生では初期強度の増大にそれぞれ繋がったと考えられる。また、これら高炉セメントの水和反応や空隙構造の形成は、スラグ置換率によらず、スラグの反応量に依存することが示された。

4. まとめ

本研究では、スラグ置換率を0, 25, 45, 65%, 養生条件を20, 40℃の水中として、高炉セメントの水和反応と空隙構造形成に及ぼす養生温度の影響について検討した。その結果、以下の結論が導かれた。

- 1) 強度発現に及ぼす養生温度の影響は、スラグ置換率が高いほど大きく、初期に初期材齢での温度依存性が高かった。
- 2) 圧縮強度と毛管空隙量との関係は、セメントの種類や養生温度に関わらず概ね同一となり、硬化体強度は材料・環境によらず毛管空隙量のみ依存した。
- 3) 高炉セメント特有の毛管空隙の減少やゲル水の生成、あるいは高炉スラグの水和反応によるC-S-Hのキャラクター変化は、スラグ置換率や養生温度に関わらず、高炉スラグの反応量にて概ね評価できた。

謝辞：本研究は、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。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 佐川孝広, 門間永悟: 高炉スラグ高含有セメントの水和反応と空隙構造特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.195-200, 2018
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 佐川孝広, 門間永悟: 高炉セメントの水和物組成と空隙構造特性に及ぼすスラグ置換率の影響, 第72回セメント技術大会講演要旨, pp.70-71, 2018

- 6) 佐川孝広, 名和豊春: リートベルト法による高炉セメントの水和反応解析, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.3, pp.1-11, 2006
- 7) T. Iyoda, K. Inokuchi and T. Uomoto: Effect on slag hydration of blast-furnace slag cement in different curing conditions, Proc. 13th Int. Congr. Chem. Cem., 2011
- 8) Q. Zhou, F.P. Glasser: Thermal stability and decomposition mechanism of ettringite at <120 °C, Cem. Concr. Res., Vol.31, pp.1333-1339, 2001
- 9) 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
- 10) D. Jansen et al.: A remastered external standard method applied to the quantification of early OPC hydration, Cem. Concr. Res., Vol.41, pp.602-608, 2011
- 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) 佐川孝広, 名和豊春: X線回折リートベルト法による高炉スラグ量の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.155-160, 2010
- 13) T. Ishida et al.: Modeling of early age behavior of blast furnace slag concrete based on micro-physical properties, Cem. Concr. Res., Vol.41, pp.1357-1367, 2011
- 14) 半井健一郎: セメント系複合材料-地盤連成系を対象とする多相物理化学モデル, 東京大学博士論文, 2005
- 15) 原沢蓉子, 亀山敬宏, 伊代田岳史: 消費水分量に着目した高炉セメントの水和反応解明に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.67-72, 2015
- 16) H.F.W. Taylor: Cement Chemistry 2nd. edition, pp.262-271, Thomas Telford, 1997
- 17) 佐川孝広, 名和豊春: 高炉セメントの水和反応に及ぼす養生条件と炭酸化の影響, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.3, pp.23-35, 2007
- 18) J.S. Lumley et al.: Degrees of Reaction of the Slag in Some Blends with Portland Cement, Cem. Concr. Res., Vol.26, No.1, pp.139-151, 1996
- 19) Y. Totani et al.: The hydration of blast furnace slag cement, Proc. 7th Int. Congr. Chem. Cem., Vol.2, III, pp.95-98, 1980
- 20) 宮原茂禎ほか: 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