

論文 高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの強度発現に関する一検討

宮原 健太*1・小田部 裕一*2・鈴木 好幸*3・石川 伸介*4

要旨：高炉スラグ微粉末を使用した混合セメントを高強度コンクリートに適用し、普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントとの養生条件による強度特性を比較検討した。その結果、結合材を混合セメントとした場合、養生条件の違いによるコンクリート強度の差が最も大きくなることがわかった。この現象は、セメント粒子が分散された状態では、高温履歴を受けた場合に強度発現への寄与が高いセメント鉱物の反応率が標準養生を下回り、停滞することが要因であることを明らかにした。

キーワード：混合セメント, 高強度コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 水和反応, 高炉スラグ反応率

1. はじめに

製鉄所からの産業副産物である高炉スラグ微粉末は、これまで混合セメント用原料やコンクリート用の混和材として広く有効活用されている。また、高炉スラグ微粉末を混合した高炉セメントは「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律(グリーン購入法)」の対象となる二酸化炭素排出量削減対策の材料であることから、セメント・コンクリート分野の環境保全への貢献のため、高炉セメントへの需要は今後更に高まると考えられる。

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに関する研究はこれまで数多く行われてきており、混和材としての適用研究や¹⁾低ブレンスラグの実構造物への適用事例²⁾、高炉スラグを多量置換したコンクリートの構造体強度に関する検討³⁾などが報告されてきている。また、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートが高温履歴を受けると材齢28日から91日の強度増進が僅かであること⁴⁾、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べて温度応力によるひび割れが生じ易いこと⁵⁾など実用上の課題が報告されている。

しかしながら、これらの研究事例のほとんどが一般的な強度レベルのコンクリートを対象としたものであり、高強度コンクリートを対象とした研究事例は少ない。今後更なる二酸化炭素排出量削減を達成するには、高炉セメントのような混合セメントを高強度コンクリートに適用するなどの用途拡大を推進すると共に、諸条件下におけるそれらの物性ならびに水和反応について検討していかなければならない。

そこで、本研究では、低水結合材比の高強度コンクリートを対象に、高炉スラグ微粉末を使用した混合セメント

表-1 使用材料

材料	記号	物性・密度
セメント	BB	高炉セメント B 種 密度:3.04g/cm ³
	NC	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm ³
	MC	中庸熱ポルトランドセメント 密度:3.21g/cm ³
細骨材	S	山砂 密度:2.57g/cm ³
粗骨材	SG	硬質砂岩砕石 密度:2.65g/cm ³
混和剤	SP	ポリカルボン酸系

ト、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントといった結合材の種類による標準養生と高温履歴養生での強度性状に関して実験的に検討を行った。

更に、セメント粒子の分散性に着目し、コンクリートと同一水結合材比のセメントペーストにて、混和剤添加率をパラメータとした圧縮強度、セメント鉱物の水和反応率および高炉セメントペースト中の高炉スラグの反応率を測定し、高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの強度発現との関連性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。本研究でのセメントは、高炉スラグ微粉末を使用した混合セメントとして市販の高炉セメント B 種(記号:BB)、普通ポルトランドセメント

*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 修士(工学) (正会員)

*2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 博士(工学) (正会員)

*3 (株)安藤・間 技術研究所 修士(工学) (正会員)

*4 (株)安藤・間 技術研究所 (正会員)

(記号：NC)および中庸熟ポルトランドセメント(記号：MC)を使用した。細骨材は山砂，粗骨材は硬質砂岩碎石を使用した。混和剤はポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 コンクリートおよびセメントペーストの配合

コンクリートの配合は表-2 に示す通りであり，水結合材比 24%の高強度コンクリートを検討対象に，結合材として BB, NC, MC をそれぞれ使用したものである。結合材に対する質量比である混和剤添加率(C×%)は，すべての配合にて 1.0%とした。セメントペーストの水結合材比は，表-2 に示したコンクリートの配合と同一の 24%とした。混和剤添加率は，セメントの分散性の影響を確認するため，0.3%，1.0%の 2 水準とした。

2.3 実験条件および実験方法

(1) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは，容量 55 リットルの強制二軸ミキサを使用した。コンクリート材料の投入順序および練混ぜ時間は，まず，細骨材およびセメントを投入後 15 秒間練混ぜた。次いで，混和剤を含む水を投入し 240 秒練混ぜたのち，粗骨材を投入し 120 秒練混ぜ排出した。

セメントペーストの練混ぜは，容量 10 リットルのホバートミキサを使用した。注水後に 180 秒，掻き落としを行った後に更に 180 秒練混ぜ排出した。

(2) フロー試験および試験体の作製方法

練り上がったコンクリートは，JIS A 1150 に従いスランプフローを測定したのち，φ100×200mm の円柱型枠に打設し試験体を作製した。

練り上がったセメントペーストは，上部内径 70mm，下部内径 100mm，高さ 60mm のフローコーンを用いてペーストフローを測定したのち，φ50×100mm の円柱型枠に打設し試験体を作製した。

(3) 養生条件

コンクリート試験体の養生条件は，図-1 に示す断熱材容器を使用した高温履歴養生と標準養生の 2 水準とした。高温履歴養生では，試験体を封緘状態とした上で，断熱材容器にて養生したのち，それらの温度が 20℃になった段階で 20℃の恒温室に移動させ，所定の材齢まで養生した。ここで，高温履歴養生の温度測定値は図-2 に示す通りである。

セメントペースト試験体の養生条件は，温度履歴プログラムを有する変温槽を使用し，図-2 に示したそれぞれのコンクリートと同様の温度履歴を与えた高温履歴養生と標準養生の 2 水準とした。

(4) 強度試験

強度試験は，3 試験体の平均値にて評価した。コンクリートの圧縮強度はφ100×200mm 試験体により材齢 7 日，28 日および高温履歴養生のみ 91 日で測定した。

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				SP/C (%)
		W	C	S	SG	
BB	24	170	708	627	882	1.0
NC	24	170	708	636	894	
MC	24	170	708	641	902	

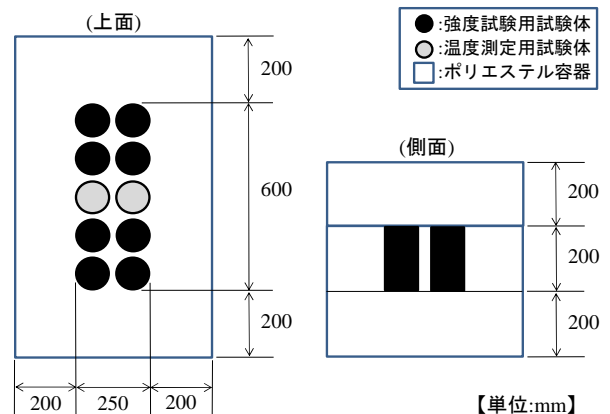


図-1 断熱材容器

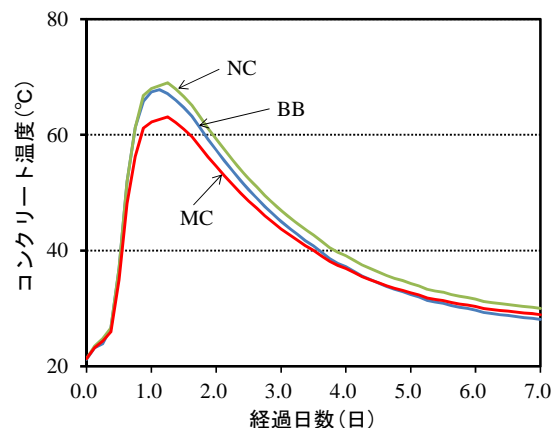


図-2 コンクリートの温度履歴

セメントペーストの圧縮強度は，φ50×100 試験体により最高温度到達時間の材齢 36 時間および 7 日，28 日で測定した。

(5) 水和試料の作製

標準養生，高温履歴養生を行ったセメントペーストを圧縮強度と同様の材齢 36 時間および 7 日，28 日で粉砕しアセトンに浸漬させた。その後，アルミナ乳鉢内で微粉砕し，その試料をアセトンで再浸漬したのち，攪拌させ 60 分間静置し水和停止を行った。その後，吸引濾過を行い，試料とアセトンを分離した。アセトンを分離した試料を RH11% 環境下のデシケーター内にて試料質量が恒量となるまで乾燥させたのち，高速振動試料粉砕機で微粉砕し，水和試料とした。

表-3 コンクリートのフロー測定値

配合名	フロー値(mm)
BB	575
NC	505
MC	530

(6) 水和反応解析

粉末 X 線回折を用いた Rietveld 解析により、先に述べた材齢におけるセメント鉱物の反応率を求めた。X 線回折の測定条件はターゲット CuK α 、管電圧 45kV、管電流 40mA とした。なお、以下ではセメント鉱物であるエーライト(3CaO・SiO₂)、ビーライト(2CaO・SiO₂)、アルミネート(3CaO・Al₂O₃)およびフェライト(4CaO・Al₂O₃・Fe₂O₃)をそれぞれ C₃S、C₂S、C₃A および C₄AF の略記号を用いて表記した。

高炉セメントペースト中の高炉スラグの反応率の定量は、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で未反応スラグを定量することにより求めた⁶⁾。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの流動性および強度性状

コンクリートのスランプフロー測定値を表-3 に示す。混和剤添加率を 1.0%とした場合のスランプフロー測定値は、BB のケースで 575mm と最も大きく、次いで MC のケースで 530mm、NC のケースで 505mm となった。

コンクリートの圧縮強度結果を図-3～図-5 に示す。なお、図中に示した数値($_{28}S_{28}$)は、材齢 28 日の標準養生の強度に対する材齢 28 日の高温履歴を受けた場合の強度の差である。まず、材齢 7 日の圧縮強度に着目する。一般に初期材齢で高温履歴を受けたコンクリートの強度は、標準養生の強度の値を上回る傾向にあると言われている。事実、本研究のいずれのケースにおいても上述した傾向が認められる。

次に、材齢 28 日における $_{28}S_{28}$ は、BB のケースで 10.6N/mm² と最も大きく、次いで NC のケースで 7.7N/mm²、MC のケースで 4.0N/mm² となった。更に、高温履歴を受けた場合の圧縮強度は、材齢 7 日から 91 日で、NC のケースは 7.2N/mm²、MC のケースは 13.0N/mm² と強度発現が進行するものの、BB のケースは 1.7N/mm² と他ケースに比べて僅かなものであり、強度発現が鈍化していることが確認された。

これらの結果から、BB のケースは、NC のケースや MC のケースと比べて材齢 28 日の高温履歴を受けた場合の圧縮強度が標準養生の値を大きく下回ることや、高温履歴を受けた場合の材齢 7 日以降の強度発現が鈍化することなど、高温履歴の強度性状への影響が他結合材に比

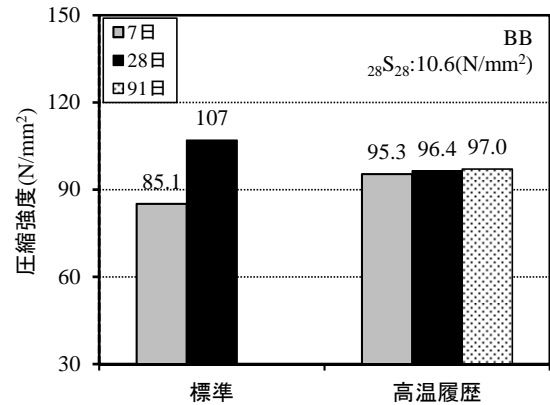


図-3 BB コンクリートの圧縮強度

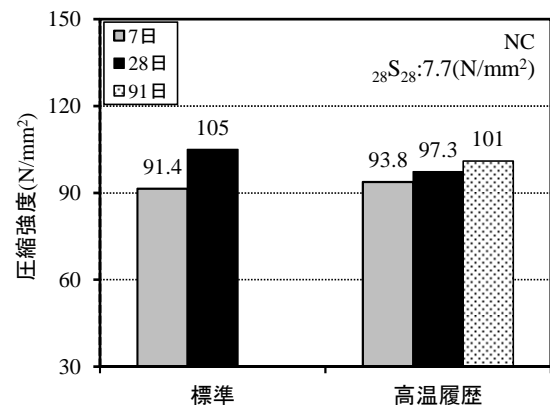


図-4 NC コンクリートの圧縮強度

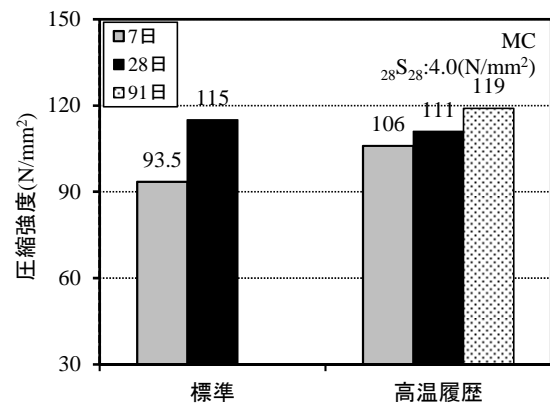


図-5 MC コンクリートの圧縮強度



写真-1 セメントペーストと骨材界面の状況⁷⁾

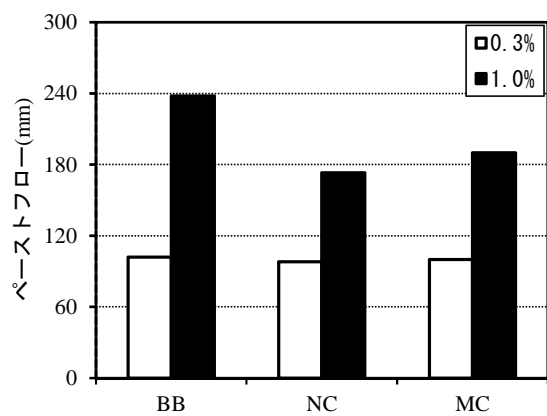


図-6 セメントペーストのフロー測定値

べて大きいことがいえる。この一因としては、セメントペーストと粗骨材の線膨張係数差がもたらす温度履歴下のひずみの差、更には、そのひずみ差に起因した粗骨材界面の剥離が考えられる(写真-1 参照)⁷⁾。

3.2 セメントペーストの流動性および強度性状

セメントペーストのフロー測定値を図-6 に示す。まず、混和剤添加率を 0.3%とした場合のフロー測定値は、いずれのケースにおいても概ね 100mm となり、セメント粒子間の反発作用が小さく、セメント粒子は凝集された状態にあると考えられる。混和剤添加率を 1.0%とした場合のフロー測定値は、BB-1.0%のケースで 238mm、NC-1.0%のケースで 173mm、MC-1.0%のケースで 190mm となり、いずれの結合材のケースにおいても、セメント粒子間の反発作用が大きく、セメントペースト中のセメント粒子は分散された状態にあると考えられる。

セメントペーストの圧縮強度結果を図-7~図-9 に示す。まず、材齢 28 日の圧縮強度に着目する。混和剤添加率を 0.3%とした場合、標準養生の強度に対する高温履歴を受けた場合の強度の差($_{28}S_{28}$)は BB-0.3%のケースで 3.8N/mm²、NC-0.3%のケースで 2.6 N/mm²、MC-0.3%のケースで 3.0 N/mm² となり、結合材の種類による明確な差は認められなかった。混和剤添加率を 1.0%とした場合、 $_{28}S_{28}$ は BB-1.0%のケースで 15.1N/mm²、NC-1.0%のケースで 8.2 N/mm²、MC-1.0%のケースで 6.0N/mm² となり、コンクリートの場合と同様に、BB のケースで極めて大きな強度の差があることを確認した。

次に、それぞれの養生条件の強度発現に着目する。標準養生の場合、混和剤添加率を 1.0%としたケースでは、材齢 36 時間の圧縮強度は、いずれの結合材のケースにおいても、混和剤添加率を 0.3%としたケースの値を下回った。これは、混和剤の遅延作用の影響によるものであると考えられる。その後、材齢の進行とともに強度は著しく増進し、材齢 28 日では、BB のケースで 16.0N/mm²、NC のケースで 11.0N/mm²、MC のケースで 11.0N/mm² と混和剤添加率を 0.3%としたケースの値を大きく上回る

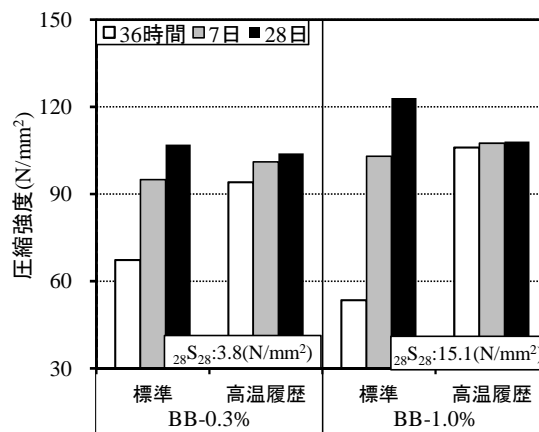


図-7 BB ペーストの圧縮強度

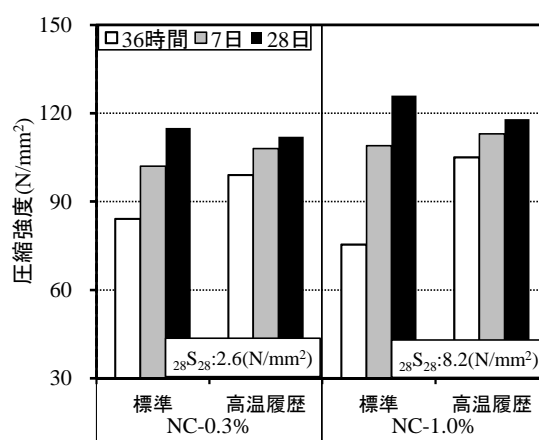


図-8 NC ペーストの圧縮強度

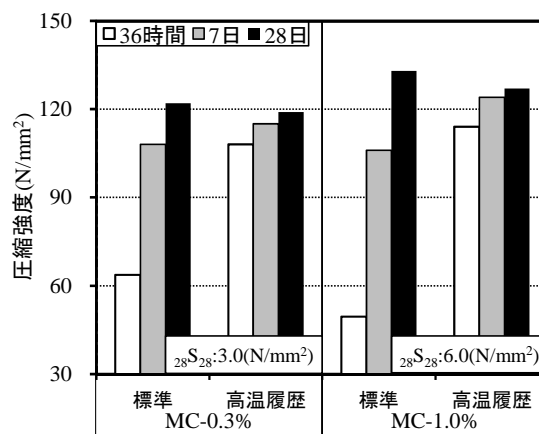


図-9 MC ペーストの圧縮強度

結果となった。

高温履歴を受けた場合、混和剤添加率を 1.0%としたケースでは、いずれの結合材においても、材齢 36 時間で混和剤添加率を 0.3%としたケースの値を大きく上回った。また、材齢 28 日においても、その差に大小はあるものの、混和剤添加率を 0.3%としたケースの値を上回る結果となった。

これらの結果から、混和剤添加率を 0.3%とした場合、

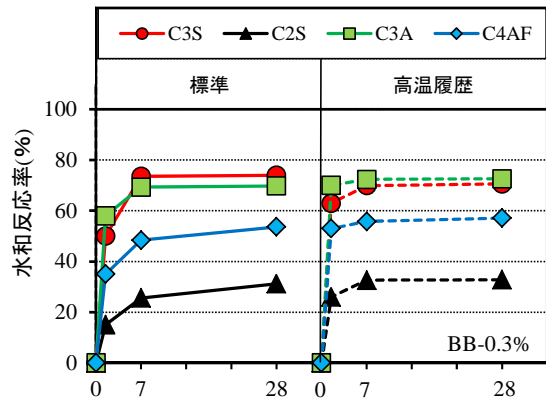


図-10(a) BBセメント鉱物の水和反応率(BB-0.3%)

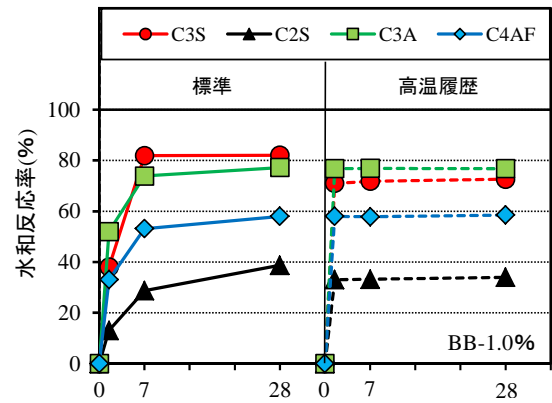


図-10(b) BBセメント鉱物の水和反応率(BB-1.0%)

セメントペースト中のセメント粒子は凝集された状態にあり、標準養生のケースにおいても、水との接触面積が少ないため強度発現は鈍くなり、高温履歴を受けたケースとの強度の差は小さくなったと推察される。また、混和剤添加率を1.0%とした場合、セメントペースト中のセメント粒子は分散された状態にあり、標準養生のケースでは、初期材齢においては混和剤の遅延作用により圧縮強度は小さくなるものの、材齢が進むにつれて水との接触面積が増えていくため、強度発現は良好に進行し、高温履歴を受けたケースとの強度の差は大きくなったと推察される。

3.3 セメントペーストの水和反応

セメントペースト中のセメント鉱物の水和反応率を図-10~図-12に示す。まず、初期材齢の強度発現への寄与が高いと言われるC₃Sの水和反応に着目する。材齢36時間のC₃Sの反応率は、いずれのケースにおいても高温履歴を受けた場合の値が標準養生の値を上回った。材齢7日では、BB-0.3%、NC-1.0%、MC-1.0%のケースは、高温履歴を受けた場合の値と標準養生の値は等しくなるが、BB-1.0%のケースは、高温履歴を受けた場合の値が標準養生の値を下回った。

次に、長期材齢の強度発現への寄与が高いC₂Sの水和反応に着目する。材齢36時間のC₂Sの反応率は、C₃Sの場合と同様に、いずれのケースにおいても高温履歴を受けた場合の値が標準養生の値を上回った。材齢28日では、BB-1.0%、NC-1.0%、MC-1.0%といったセメント粒子が分散されたケースの標準養生の場合の値は、高温履歴を受けた場合の値に追いついた。

これらの結果の中で、BBに着目すると、混和剤添加率を0.3%としたケースのC₃Sの反応率は、高温履歴を受けた場合と標準養生で差は生じない。一方、混和剤添加率を1.0%としたケースでは、材齢7日で高温履歴を受けた場合が標準養生の値を下回り、更に、その後の反応が停滞するといった特徴的な傾向を示した。

高炉スラグの反応率を図-13に示す。高温履歴を受け

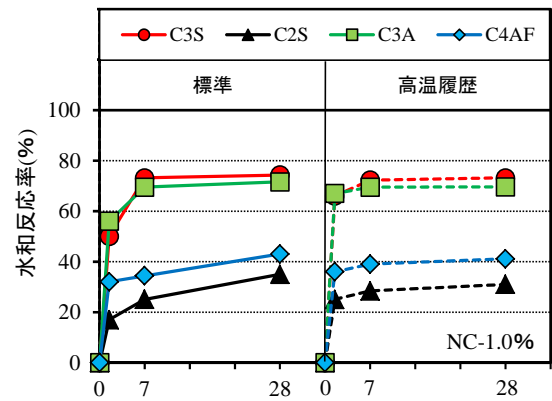


図-11 NCセメント鉱物の水和反応率(NC-1.0%)

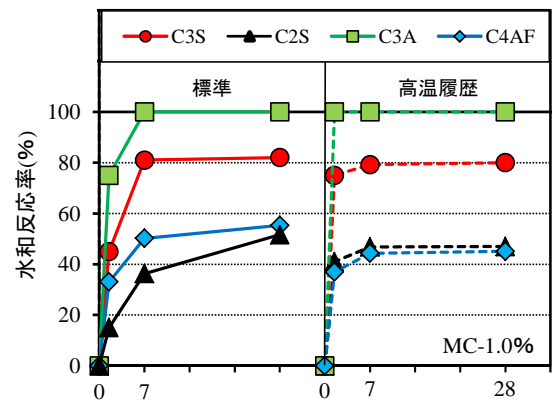


図-12 MCセメント鉱物の水和反応率(MC-1.0%)

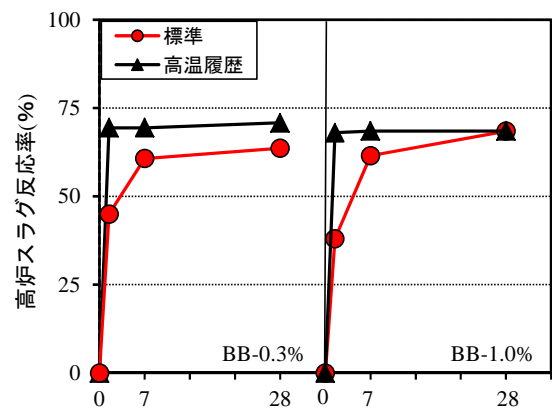


図-13 高炉スラグの反応率

た場合の高炉スラグの反応率は、BB-0.3%、BB-1.0%のケースとも材齢 36 時間で急上昇し、粒子の分散状態を問わずその後の反応は鈍化する。標準養生の場合、BB-1.0%のケースのスラグ反応率は材齢 28 日で高温履歴を受けた場合の値に追いついた。

前項に示した圧縮強度とセメント鉱物や高炉スラグの反応率の結果を比較する。例えば、BB-1.0%のケースでは、材齢 36 時間におけるセメントペーストの圧縮強度は、高温履歴を受けた場合が標準養生の値を上回る。また、 C_3S 、 C_2S といったセメント鉱物やスラグの反応率においても圧縮強度の場合と同様に、高温履歴を受けた場合が標準養生の値を上回る。

材齢 28 日における圧縮強度は、高温履歴を受けた場合が標準養生の値を下回る。また、先に述べたように、上記セメント鉱物や高炉スラグの中で、 C_3S の反応率において高温履歴を受けた場合が標準養生の値を下回り、その後の反応が停滞するといった特徴的な傾向を示すことから、これが、 $_{28}S_{28}$ が大きくなる一因として考えられる。また、水和組成物の緻密さも大きく影響を及ぼす因子であると考えられ、今後さらなる検討を行う必要がある。

これまでの結果から、BB を使用した高強度コンクリートの標準養生と高温履歴を受けた場合に強度の差が生じる要因としては、セメントペーストと粗骨材の線膨張係数差がもたらすひずみ差に起因した粗骨材界面の剥離⁷⁾とセメント粒子が分散された状態では、高温履歴を受けた場合、材齢 28 日の C_3S の反応率が標準養生の値を下回り停滞すること、更に、標準養生の C_2S や高炉スラグの反応率が標準養生の場合が高温履歴の値に追いつくためである考えられる。

4. まとめ

- (1) 結合材に BB を使用した高強度コンクリートは、NC や MC と比べて材齢 28 日の高温履歴を受けた場合の圧縮強度が標準養生の値を大きく下回ることや、高温履歴を受けた場合の材齢 7 日以降の強度発現が鈍化することなど、高温履歴の強度性状への影響が他結合材に比べて大きいことがわかった。
- (2) 混和剤添加率を 0.3%とした場合のセメントペーストの材齢 28 日における標準養生の強度に対する高温履歴を受けたケースの強度の差($_{28}S_{28}$)は、いずれのケースにおいても小さく、結合材の種類による明確な違いは認められなかった。
- (3) 混和剤添加率を 1.0%とした場合のセメントペーストの $_{28}S_{28}$ は、コンクリートの場合と同様に結合材の種類によって差が生じ、特に BB のケースで極めて大きくなった。

- (4) 水和反応解析により、セメントペースト中のセメント鉱物や高炉スラグの反応率を測定したところ、圧縮強度の結果と整合性が取れた。セメント粒子が分散された状態では、いずれの結合材においても材齢 28 日の標準養生の C_2S の値は高温履歴の場合に追いつくこと、BB のケースではさらに、標準養生の高炉スラグの反応が促進される一方で高温履歴を受けた場合の C_3S の値が標準養生の値を下回り、その後の反応が停滞することから、このような強度の差が生じたと考えられる。

本研究は、高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの標準養生と高温履歴を受けた場合に生じる強度の差を低減することに限定して考察を行ったものである。実際のコンクリート工事、例えば、コンクリート充填鋼管構造に適用した場合、コンクリートの流動性は極めて重要な因子であるため、本研究で示した結果をポンプ圧送性、施工性から適用可能であるとは一概には言えず、今後さらに検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 依田 彰彦, 横室 隆: 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材への適用研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.343-348, 1995
- 2) 児玉 浩一, 石川 哲也, 菅原 竜也, 廣島 明男: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントの実構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1135-1140, 2005
- 3) 閑田 徹志, 依田 和久, 米澤 敏男, 黒田 萌: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度に関する実験検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.229-234, 2013
- 4) 小野 聖久, 大城 壮司, 桐山 昭吾: 温度履歴を受けた高炉セメントコンクリートの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.197-202, 2006
- 5) 佐藤 利幸, 鈴木 康範, 原田 修輔, 堀口 浩司, 横田 紀男: 高炉スラグ微粉末がコンクリートの温度応力に及ぼす影響, セメント技術年報, 第 42 号, pp.100-103, 1988
- 6) 近藤 連一, 大沢 栄也: 高炉水砕スラグの定量およ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.22, pp.39-46, 1969
- 7) 宮原 健太, 小田部 裕一, 鈴木 好幸, 石川伸介: 高温履歴を受けた高炉スラグ混合高強度コンクリートの強度性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, pp.488-493, 2017