

# 報告 高炉スラグ微粉末と速硬性混和材を併用したコンクリートの基礎的検討

鎌田 亮太\*1・長塩 靖祐\*2・丸田 浩\*3

**要旨**：高炉スラグ微粉末に速硬性混和材を併用したコンクリートの基礎的実験を行った。その結果、高炉スラグ微粉末を使用しても速硬性混和材を併用することで凝結時間が早くなり、高炉スラグ微粉末の置換率 25%および 50%においては環境温度によらず所要の初期強度が得られた。また、高炉スラグ微粉末に速硬性混和材を併用することで、乾燥収縮は小さくなった。中性化深さは、前養生期間を確保することで、その進行が抑制された。本検討により、それらを併用したコンクリートの有用性が示唆された。

**キーワード**：高炉スラグ微粉末、速硬性混和材、初期強度、乾燥収縮、中性化

## 1. はじめに

近年、副産物の有効活用や、地球温暖化の主な原因である二酸化炭素の排出量削減を目的に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用したコンクリートの検討が行われている<sup>1)2)</sup>。

このうち高炉セメントは、製鉄所の副産物である高炉スラグ微粉末とポルトランドセメントを混合したセメントであり、それを混和した分、ポルトランドセメントの使用量を低減し、二酸化炭素排出量も削減できる。また、環境負荷低減に加え、高炉スラグ微粉末を用いることにより、水密性の向上<sup>3)4)</sup>、アルカリ骨材反応の抑制<sup>5)6)</sup>、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の付与<sup>7)</sup>なども可能となる。そのため、現場打ちコンクリートだけでなく、最近ではコンクリート製品においても高炉スラグ微粉末を適用する事例が増えている。しかしながら、それを使用したコンクリートは、低温環境下やその置換率が大きくなった場合、初期強度低下の恐れがある<sup>8)9)</sup>とともに、自己収縮が大きくなる傾向にあり、収縮ひび割れ抵抗性への課題も懸念される<sup>10)</sup>。

他方、コンクリート工事の迅速化・合理化は建設工事における工期短縮を担う要因であり、補修・補強工事や緊急施工など時間的な制約のある条件下では速硬性や早強性を有するコンクリートが広く求められている。

そのような速硬性や早強性を有するコンクリートに適用される材料の一例として、速硬性混和材が挙げられる。この混和材を使用した場合、現場打ちのコンクリートとして材齢 6~12 時間で 24N/mm<sup>2</sup> 以上の圧縮強度が得られるものである<sup>11)</sup>。

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに速硬性混和材を適用した場合、所要の初期強度が確保できれば、緊急の補修・補強工事やコンクリート舗装等への適用が

可能となり、その用途が拡大されるとともに、二酸化炭素排出量の削減も可能になると考えられる。しかしながら、高炉スラグ微粉末と速硬性混和材を併用した場合に関する検討は、一部報告があるものの、いまだ少ないのが現状である。

そこで本検討では、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに対し、速硬性混和材を併用した場合の基礎的知見を得るために、低温環境下における強度発現性についても実施し、実験的に検討した結果について報告するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表-1 に本検討で使用した材料を示す。高炉スラグ微粉末は石膏を添加した JIS A 6206 の 4000 適合品を用いた。速硬性混和材は、特殊カルシウムアルミネートと特殊硫酸塩を主成分とし、その速硬性（初期強度発現性）は、エトリンサイト等に代表されるカルシウムアルミネート系水和物の早期生成によって得られるものである<sup>11)</sup>。硬化時間の調整については、オキシカルボン酸系の硬化調整剤を使用した。

### 2.2 コンクリート配合

表-2 に 20℃環境下試験におけるコンクリートの配合を示す。試験は低温時における強度発現性も確認するため 5℃環境下においても実施している。その場合の配合は 20℃環境下と同様とし、硬化調整剤の量を変化させた。高炉スラグ微粉末の置換率は、高炉セメント A 種 (GGBS25%)、B 種 (GGBS50%)、C 種 (GGBS65%) 相当となるよう設定した。速硬性混和材を使用したコンクリートの配合は、ベースとなるコンクリート配合（速硬性混和材を混和する前）の W/C を 47%とし、速硬性混和

\*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 土木・混和材料グループ 研究員 修士(工) (正会員)

\*2 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 土木・混和材料グループ 副主席研究員 博士(工) (正会員)

\*3 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 土木・混和材料グループ 研究員 修士(工) (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類	備考
水	W	水道水	—
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
混和材	GGBS	高炉スラグ微粉末	密度：2.89g/cm <sup>3</sup>
速硬性混和材	F	速硬性混和材	密度：2.93g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砕砂	密度：2.57g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石	密度：2.65g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤	Ad1	ポリカルボン酸エーテル系化合物	—
空気量調整剤	Ad2	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤	—
硬化調整剤	Ad3	オキシカルボン酸粉体	—

表-2 コンクリートの配合 (20℃)

配合	W/P (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤添加量(kg/m <sup>3</sup> )		外割添加量(kg/m <sup>3</sup> )		
					W	C	GGBS	S	G	Ad1	Ad2	F	W	Ad3
GGBS25	35.0	45.0	15±2.5	4.5±1.5	165	354	118	737	929	2.59	0.0047	—	—	—
GGBS25-F	35.0	45.0	20±2.5	2.0±1.5	165	263	88	752	948	1.93	0.0035	150	10	3.00
GGBS50	35.0	45.0	15±2.5	4.5±1.5	165	236	236	733	924	2.36	0.0236	—	—	—
GGBS50-F	35.0	45.0	20±2.5	2.0±1.5	165	175	175	749	944	1.75	0.0175	150	10	3.00
GGBS65	35.0	45.0	15±2.5	4.5±1.5	165	165	306	731	921	2.36	0.0283	—	—	—
GGBS65-F	35.0	45.0	20±2.5	2.0±1.5	165	123	228	747	942	1.75	0.0210	150	10	3.00

材を質量比でセメント+高炉スラグ微粉末：速硬性混和材=7:3 とした。また P=セメント+高炉スラグ微粉末+速硬性混和材とした。速硬性混和材の使用方法はベースとなるコンクリートに外割添加して製造する。本研究でもその考え方から、水結合材比 (W/P) を 35%となるように外割添加とし、硬化調整剤を溶解した水溶液も外割添加とした<sup>11)</sup>。ただし、コンクリート配合上では表-2 に示すように 1m<sup>3</sup>になるものである。なお本研究では速硬性混和材の有無および高炉スラグ微粉末量が各種物性へ及ぼす影響について確認するため、速硬性混和材を使用しない場合も、それを使用した場合と同一の W/P35%で設定した。そのため、普通ポルトランドセメント量および高炉スラグ微粉末は、速硬性混和材の有無により異なるものとなる。速硬性混和材を使用した場合の目標圧縮強度は、材齢 6 時間にて 24N/mm<sup>2</sup>とし、硬化調整剤はコンクリートの可使時間が 30~60 分程度確保できる量とし、20℃環境下では P×0.6%、5℃環境下では P×0.15%とした。高性能 AE 減水剤および空気量調整剤は、速硬性混和材を使用しない高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートで目標スランブおよび空気量が得られるように調整し、速硬性混和材を使用した場合は、それと同一量として使用した。速硬性混和材は現場のアジテータ車へ添加も想定されていることから、所要の流動性を確保することと、空気量を制御することなどから消泡する設計とな

っているため、目標スランブおよび空気量は、それを使用しないコンクリートと異なる設定とした<sup>11)</sup>。

## 2.3 試験項目

### 1) 凝結時間

JIS A 1147 に従い、試験に用いる試料は、練上がり直後のコンクリートを公称目開き 4.75mm の網ふるいでふるったモルタル分とし、油圧の貫入針にて測定した。試験は 20℃環境下で実施した。

### 2) 圧縮強度

JIS A 1108 に従い、材齢 24 時間までは各温度 (5℃および 20℃) での封かん養生とし、24 時間以降は 24 時間で脱型を行い各温度での水中養生を実施した。材齢は 4 時間、6 時間、24 時間、7 日および 28 日とし、20℃環境下では 91 日も実施した。

### 3) 乾燥収縮

JIS A 1129-2 に従い、脱型後 1 日で脱型し、材齢 7 日まで水中養生した後、基長を測定し、20℃60%RH にて静置し、乾燥収縮ひずみを測定した。測定材齢は 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91 および 126 日とした。

### 4) 中性化深さ

JIS A 1153 に従い、打設後 24 時間で脱型した。本研究では前養生期間の影響を確認するために、水中養生を材齢 7 日間および 28 日間行う 2 水準とした。脱型後、所定期間の前養生した後、28 日間 60%RH で養生し、打設

側面以外を被覆処理し、その後 CO<sub>2</sub> 濃度 5%の促進中性化槽に静置した。所定材齢後は、フェノールフタレイン溶液を噴霧して、中性化深さを測定した。材齢は 1, 4, 8, 13 週で測定した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

表-3 にコンクリートの各温度の練上がり直後のフレッシュ性状を示す。環境温度によらず速硬性混和材添加前のコンクリートである GGBS25, GGBS50 および GGBS65 ならびに速硬性混和材添加後のコンクリートである GGBS25-F, GGBS50-F, および GGBS65-F のスランプおよび空気量は、いずれの水準においても目標値の範囲内であった。速硬性混和材添加後のコンクリートは、速硬性混和材添加前のコンクリートに比べ、スランプは 4~10cm 程度増加し、空気量は 2~4%程度減少した。

#### 3.2 凝結時間

図-1 に凝結試験結果を示す。図-2 に高炉スラグ微粉末の置換率と始発・終結時間との関係を示す。速硬性混和材を使用したコンクリートは、GGBS 置換率によらず、始発が 50 分程度、終結が 70 分程度になった。一方、速

硬性混和材を使用していないコンクリートは、始発が 6 時間程度、終結が 9 時間程度になった。また、速硬性混和材を使用したコンクリートは、GGBS 置換率の増加による凝結性状への影響はほぼ認められなかったが、速硬性混和材を使用していないコンクリートは、始発が GGBS 置換率によらずほぼ同程度であり、終結時間は GGBS65 のみ若干遅くなる傾向にあることが確認された。

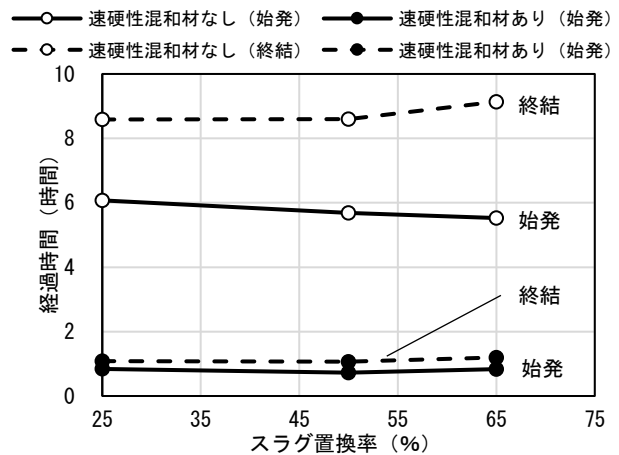


図-2 スラグ置換率と始発・終結時間

表-3 フレッシュ性状

配合	20℃		5℃	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
GGBS25	16.5	4.5	17.5	3.9
GGBS25-F	20.0	1.7	22.0	1.3
GGBS50	12.5	5.3	12.5	4.4
GGBS50-F	20.5	1.1	22.5	1.7
GGBS65	15.0	5.7	15.0	3.2
GGBS65-F	19.0	1.1	22.5	1.8

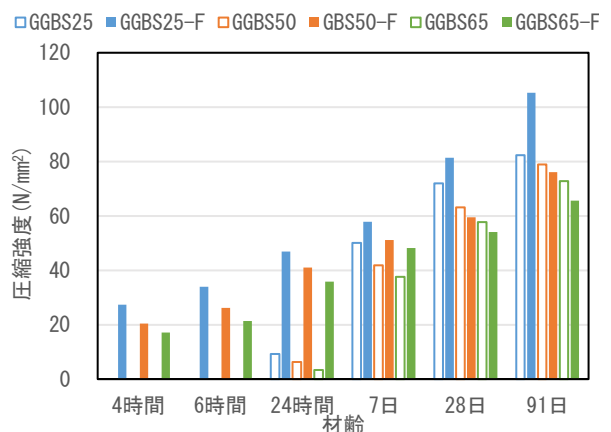


図-3 圧縮強度 (20℃)

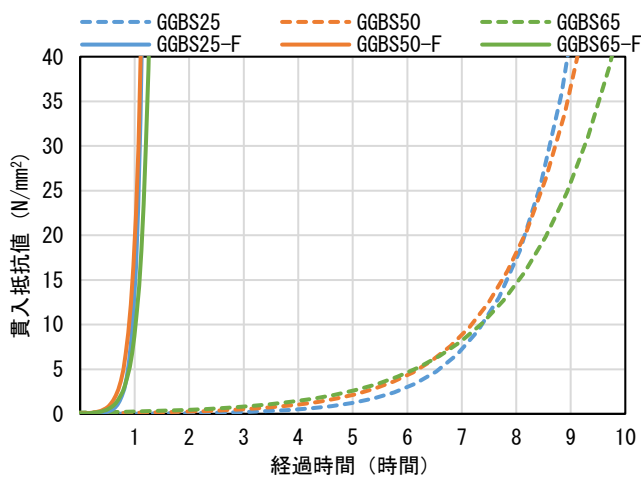


図-1 凝結時間 (20℃)

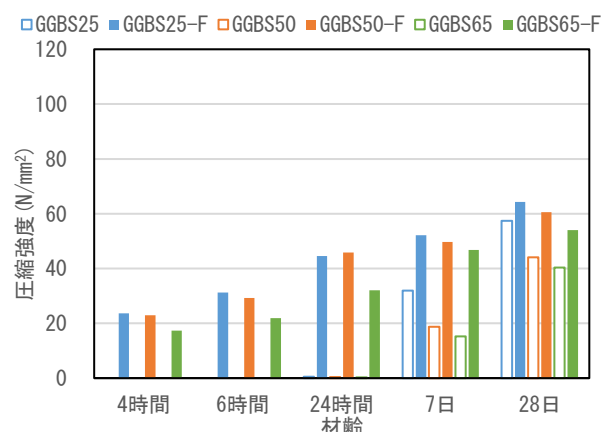


図-4 圧縮強度 (5℃)

### 3.3 圧縮強度

図-3 および図-4 に各温度環境下における圧縮強度試験結果を示す。20℃環境下の場合、材齢6時間で24N/mm<sup>2</sup>以上得られたのは、GGBS25-FおよびGGBS50-Fの2水準であった。GGBS65-Fでは材齢6時間で24N/mm<sup>2</sup>は得られず、GGBS置換率が増加すると初期強度に影響を及ぼすことが確認された。材齢24時間では速硬性混和材を使用した場合は、30~40N/mm<sup>2</sup>程度得られたが、速硬性混和材を使用していない場合は、5N/mm<sup>2</sup>前後の結果となった。材齢7日では、速硬性混和材を使用している方がそれを使用していない場合よりも圧縮強度が高い結果にあったが、材齢28日以降では、GGBS置換率により異なる結果となった。GGBS25%では、材齢28日および91日においても速硬性混和材を使用した方がそれを使用していない場合より高い結果にあったが、GGBS50%およびGGBS65%では、材齢28日および91日ともに速硬性混和材を使用していない場合に圧縮強度が高くなる傾向にあった。ただし、GGBS置換率によらず材齢の経過に伴い圧縮強度の伸びが確認されていることを踏まえると、実用上は問題ないものと考えられる。このGGBS置換率による材齢の経過に伴う圧縮強度発現性が異なる点、特にGGBS置換率が少ない場合の影響については、現時点では不明である。今後、空隙構造や水和物の観点から検討する必要がある、検討課題と考えられる。

次に5℃環境下において、材齢6時間で24N/mm<sup>2</sup>以上得られたのは、GGBS25-FおよびGGBS50-Fの2水準であり、20℃環境下と同様であった。GGBS65-Fでは、材齢6時間で24N/mm<sup>2</sup>は得られず、低温環境下においてもGGBS置換率が増加すると初期強度に影響を及ぼすことが確認された。材齢24時間では、速硬性混和材を使用した場合に30~40N/mm<sup>2</sup>程度の強度が得られたが、速硬性混和材を使用していない場合は、1N/mm<sup>2</sup>程度の結果となった。一方、材齢7日および28日では速硬性混和材を使用している方が、それを使用していない場合よりも圧縮強度が高い結果にあり、20℃環境下とは異なる結果となった。これは低温環境下では、水和反応が遅れている結果ではないかと推察され、低温時における材齢28日以降の強度発現性については、確認する必要があるものと考えられる。

速硬性混和材を使用したGGBS25-FおよびGGBS50-Fでは、環境温度によらず、所要の初期強度が得られるとともに、材齢の経過に伴う強度発現性も確認される結果となった。

### 3.4 乾燥収縮

図-5 に乾燥期間126日までの長さ変化率を示す。速硬性混和材を使用した場合は、GGBSの置換率により異なる結果となり、GGBS25-Fでは $498 \times 10^{-6}$ 、GGBS50-Fで

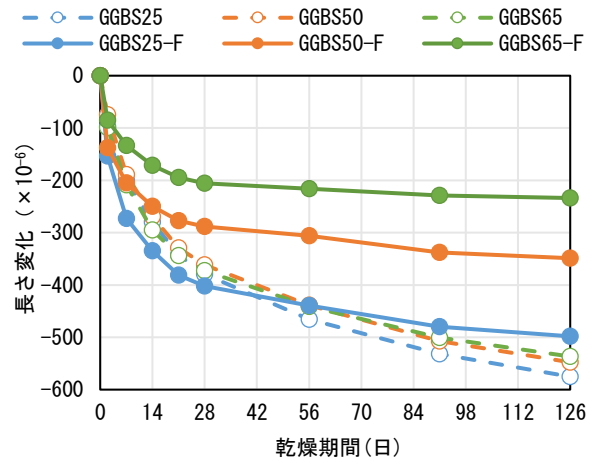


図-5 長さ変化率

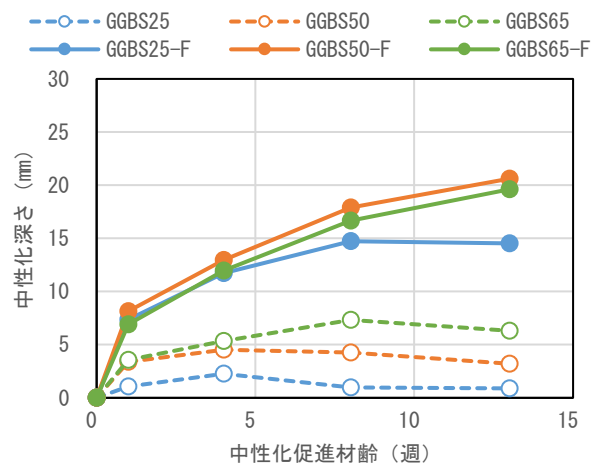


図-6 中性化深さ (前養生水中7日)

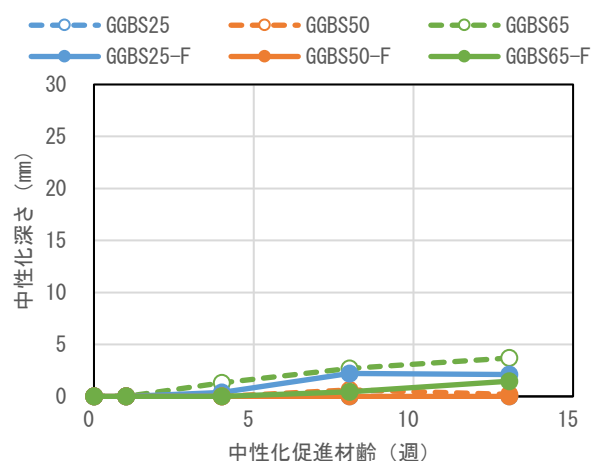


図-7 中性化深さ (前養生水中28日)

は $349 \times 10^{-6}$ 、GGBS65-Fでは $234 \times 10^{-6}$ であった。GGBSの置換率が増加すると長さ変化率は小さくなる結果となった。一方、速硬性混和材を使用していない場合は、GGBSの置換率によらず同程度の結果となり、 $537 \sim 575 \times 10^{-6}$ であった。速硬性混和材の有無について比較すると、いずれのGGBS置換率でも速硬性混和材を使用した場合に長さ変化率が小さくなる結果となった。例えば

GGBS 置換した場合の乾燥収縮は、GGBS 置換率が大きいほどやや増加傾向にある<sup>12)</sup>ことも報告されている。本研究ではコンクリート配合中の単位セメント量や GGBS 量が速硬性混和材の有無により異なるため、同じ GGBS 置換率でもコンクリート中のペースト量の構成は異なるものとなる。乾燥収縮がコンクリート中のペースト部分の影響を受ける<sup>13)</sup>と考えると、その構成が異なるため一概な比較は難しい。そのため、前述した圧縮強度と同様に、空隙構造や水和物の観点からの検討が必要であるものと考えられる。

### 3.6 中性化

図-6に前養生を水中7日間した場合の中性化深さの結果を、図-7に前養生を水中28日間した場合の中性化深さの結果を示す。また、写真-1に前養生を水中7日間した場合の促進材齢13週の中性化深さの状況を示す。前養生が水中7日間では、速硬性混和材を使用した場合は、GGBS置換率25%が最も小さくなり、GGBS置換率50%と65%は同程度の結果となった。一方、速硬性混和材を使用していない場合は、GGBS置換率が大きくなるほど中性化深さが大きくなる結果にあった。前養生を水中7日間した場合は、GGBS置換率によらず速硬性混和材を使用すると中性化深さは大きくなる結果にあった。

次に前養生を水中28日間とした場合、速硬性混和材の有無、GGBS置換率によらず中性化はほとんど進行していなかった。

表-4に前養生を水中7日間とした場合および水中28日間とした場合の中性化速度係数を示す。中性化速度係数は、前養生が短い場合に大きくなることが確認された。中性化深さは、コンクリートの水酸化カルシウム生成量や組織の緻密さの両者の影響を受けるが<sup>14)</sup>、材齢7日の圧縮強度はGGBS置換率によらず速硬性混和材を使用した場合の方が高い結果が得られている。速硬性混和材を使用した場合、主となる水和物がエトリンガイトであり、水酸化カルシウムの生成量は少ないことが報告されている<sup>15)</sup>。水酸化カルシウムが少ないと、外部からの二酸化炭素と反応して生成される炭酸カルシウムが減り、液相中の中和反応が早く進行してpH低下が早期に生じる。このため、本研究の範囲内になるが、前養生が水中7日間の場合は、組織の緻密さよりも生成水和物の影響を受けた可能性があるのではないかと考えられる。

一方、材齢28日の圧縮強度は、材齢7日からいずれの水準も強度の伸びが見受けられており、60~80N/mm<sup>2</sup>程度の強度結果となっている。そのため、前養生が水中28日間の場合は、組織の緻密さの影響を強く受けた結果ではないかと考えられる。本結果から、前養生を確保すれば、高炉スラグ微粉末に速硬性混和材を併用したコンクリートの中性化深さは抑制されることが推察される。本

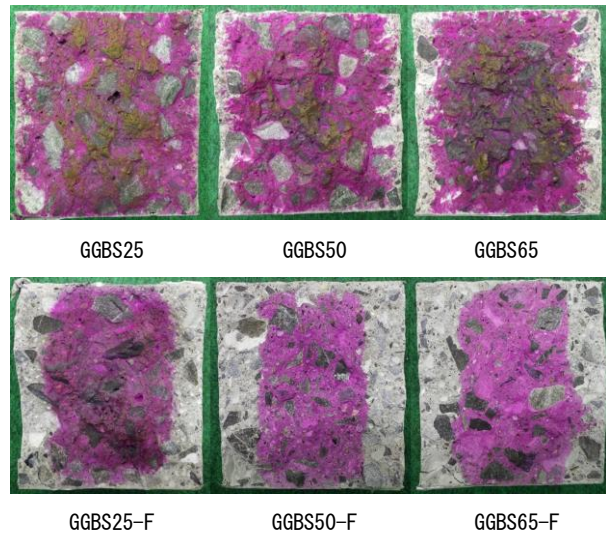


写真-1 中性化深さ(水中7日養生 促進13週)

表-4 中性化速度係数

配合	中性化速度係数 (mm/√t)	
	前養生7日間	前養生28日間
GGBS25	0.44	0.00
GGBS25-F	4.80	0.56
GGBS50	1.38	0.10
GGBS50-F	6.12	0.00
GGBS65	2.22	0.91
GGBS65-F	5.72	0.25

研究内においても、耐久性の確保には養生の重要性が明らかとなった。なお前養生の違いにより中性化深さが異なるのは、影響を及ぼしている機構の違いであることが示唆されたと思われ、この点については中性化試験を継続して明らかにしておく予定である。

高炉スラグ微粉末と速硬性混和材を使用したコンクリートはGGBS置換率25%および50%で、20℃および5℃環境下において所要の初期強度が得られるとともに、その後の圧縮強度の伸びも確認され、その有用性が示唆された。高炉スラグ微粉末の温度依存性が大きいことを考慮すると、高温環境下での強度発現性を確認するとともに、乾燥収縮および中性化の機構を明らかにしていくことが必要であると考えられる。

### 4. まとめ

本検討においては、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに対し、速硬性混和材を併用した場合の各種物性値を確認した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 凝結時間は、高炉スラグ微粉末に速硬性混和材を併用することで短縮し、GGBS置換率が25%および50%のコンクリートにおいては、環境温度によらず

所要の強度が得られた。

- 2) 乾燥収縮は、高炉スラグ微粉末に速硬性混和材を併用することで小さくなり、GGBS 置換率を増加するほどより小さくなる傾向にあった。
- 3) 高炉スラグ微粉末に速硬性混和材を併用したコンクリートの中酸化深さは、前養生期間が短い場合に大きくなる傾向にあったが、前養生期間を確保することでその進行が抑制された。

#### 参考文献

- 1) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートのCO<sub>2</sub>削減効果について，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.62-65，2010.9
- 2) 堺孝司，増田裕，高野剛，石井光裕，竹中佳：フライアッシュを用いた環境負荷低減コンクリートに関する研究，土木学会論文集 E，Vol.65，No.3，pp.332-342，2009.8
- 3) 町田篤彦：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの水密性に関する研究，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.115-120，1987.3
- 4) 壇康弘，近田孝夫，永浜一孝：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性，セメントコンクリート論文集，No.45，pp.222-227，1991.12
- 5) 小林茂敏，河野広隆，沼田晋一，近田孝夫：高炉スラグ微粉末のアルカリ骨材反応抑制効果について，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.155-162，1987.3
- 6) 銀山巧，川村政喜，田代芳文，山本親志：AAR に及ぼすアルカリ量，スラグ量及び締固め条件等の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，

Vol.9，No.1，pp.585-590，1987.6

- 7) 大即信明，森好生，関博：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察，土木学会論文報告集，第 332 号，pp.107-118，1983.4
- 8) 山本泰彦，竹内徹：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合と耐凍害性，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.129-134，1987.3
- 9) 遠藤裕悦，児玉和巳，高田誠：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長期強度に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.361-366，1989.6
- 10) 三浦智哉，田澤榮一，宮澤伸吾，保利彰宏：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.359-364，1995.6
- 11) 長塩靖祐，杉山彰徳：速硬性混和材を使用した速硬コンクリート，コンクリート工学，Vol.57，No.1，pp.63-66，2019
- 12) 公益社団法人土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，コンクリートライブラリー151，2018
- 13) 米倉亜州夫，田中敏嗣，寺本尚夫：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮とクリープ，セメント技術年報，Vol.40，pp.383-386，1986
- 14) 一般社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 15) 岡田明也，長塩靖祐：5 年間屋外曝露した速硬コンクリートの耐久性に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.42，No.1，pp.1360-1365，2020