

各種硬化促進材料による高炉スラグ微粉末混合モルタルの 圧縮強さ発現の改善評価

芝浦工業大学 大学院理工学研究科社会基盤学専攻

○川谷 千晶

竹入 陽太

芝浦工業大学 工学部

伊代田 岳史

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、プレキャストコンクリート製品の脱炭素化が強く求められている。これに対して、高炉スラグ微粉末 (GGBS) の混合が有効であるが、初期強度発現に課題がある。現在、一部では、初期強度の確保を目的としてブレン比表面積 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 級の GGBS (以下、6000 品) が蒸気養生と組み合わせて使用されているが、製造工場が少なく、供給量が限定的である。一方、ブレン比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 級の GGBS (以下、4000 品) は流通量が多く安定供給が可能であるが、初期の水和反応速度が遅く初期強度発現に不安が残る。このため、4000 品の初期強度発現を解決する手法として、硬化促進材料の併用が有効であると考えられる。本研究では、4000 品に主成分の異なる硬化促進材料を添加したモルタルを対象に、GGBS 置換率を 50% (BB 配合) とした条件下で、蒸気養生を施した場合の圧縮強さを検証した。さらに、X 線回折分析により水和生成物を定量し、硬化促進材料の作用機構を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

表一 1 に GGBS の物理特性と化学組成を示す。セメントには早強ポルトランドセメント (HPC) を使用した。GGBS は、4 つの生産工場 (工場 A, B, C, D) の 4000 品および、比較用に工場 A の 6000 品を使用した。細骨材は混合砂 (表乾密度: $2.61\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率: 1.77%) を使用した。減水剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。硬化促進材料は GGBS 混合セメントに効果があるとされる 4 種類 (α , β , γ , z) を用いた¹⁾²⁾。表一 2 に硬化促進材料の詳細および添加量を示す。

2. 2 供試体の配合

水結合材比を 0.40, 砂結合材比を 3.0, GGBS 置換率は HPC に対して 50% とした。硬化促進材料は、GGBS 工場にかかわらずそれぞれ一定量を添加した。硬化促進剤 α , β , γ は化学混和剤 (液体) で、結合材質量に対し一定割合を水置換方式で添加した。硬化促進材 z は早強混和材 (粉体) で、結合材単位量に対して内割で $20\text{kg}/\text{m}^3$ (約 3.7%) を置換した。比較用に硬化促進剤を添加しない配合 (無添加) を設定した。減水剤は 2.0% を添加した。

2. 3 供試体作製と養生方法

(1) 供試体の作製

モルタル供試体は、JISR5201 に準拠して、 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱型枠を用いて作製した。セメントペースト供試体は、 $40 \times 48\text{mm}$ のチャック付きポリ袋に約 4g ずつ打込み、厚さ約 1.5mm 程度の薄片供試体を作製した。

(2) 養生条件

打込み後から脱型までの初期において、以下の条件で蒸気養生を実施した。前置き養生 20°C , 相対湿度 99%RH で 1.5 時間とし、 $17^\circ\text{C}/\text{h}$ の昇温速度で 20°C から 55°C まで 3 時間かけて昇温し、 55°C で 6 時間保持し、その後 20°C まで自然冷却を行った。打込みから 17 時間で脱型後、供試体を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生槽に移し、材齢 7 日および 14 日まで水中養生を継続した。

2. 4 試験項目

(1) 圧縮強さ試験

モルタル供試体を用いて、脱型直後 (材齢 17 時間) および材齢 7 日、14 日に JISA1108 に準拠して実施した。

(2) XRD 分析

セメントペースト供試体を材齢 17 時間で脱型した後、水和停止処理を行い、 $150\mu\text{m}$ 以下に粉碎した試料を用いて、X 線回折装置で実施した。

表一 1 高炉スラグ微粉末の物理特性と化学組成

分類	GGBS 工場	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	化学成分 (%)											塩基度
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	
6000 品	A	6280	2.91	33.64	13.04	0.26	43.69	5.50	2.81	0.22	0.28	0.55	0.16	0.02	1.81
4000 品	A	3950	2.91	33.88	12.10	0.24	44.92	6.20	2.14	0.22	0.29	0.50	0.17	0.02	1.81
	B	4160	2.88	33.11	12.16	0.37	42.70	6.49	1.98	0.23	0.33	0.54	0.18	-	1.78
	C	4480	2.89	32.98	13.16	0.31	43.27	5.11	2.09	0.24	0.27	0.60	0.22	-	1.76
	D	4520	2.88	32.08	13.58	0.40	43.50	5.46	1.74	0.24	0.30	0.50	0.22	-	1.89

3. 結果および考察

3. 1 モルタルの圧縮強さ

図-1に6000品および4000品を用いたモルタルの圧縮強さ試験結果を示す。本検討では、6000品無添加の強度を基準とし、4000品に対する各種硬化促進材料の添加効果に着目した。まず全体的な傾向として、4000品に対して硬化促進材料を添加することで、無添加の場合と比較して、おおむね初期強度（材齢17時間）および長期強度（材齢14日）の改善が見られた。ここで、GGBSの製造工場による違いに着目すると、工場Bは無添加配合において他の工場（A, C, D）よりも高い強度を示した。この傾向は硬化促進材料を添加した場合においても維持され、工場Bを用いた配合は総じて高い強度レベルを示している。このようにGGBS工場間で強度発現性に明確な差異が確認された要因としては、GGBSの比表面積や化学成分の違いに加え、粉碎方法などの製造工程上の違いが反応活性に寄与していると考えられる。次に、基準とする6000品無添加の強度との比較を行う。初期強度は、工場Bを除くすべての配合で6000品の強度に達しなかった。しかし、長期強度は、工場BだけでなくすべてのGGBS工場で、主に促進材料βおよびzを用いた配合における強度が6000品を上回ることが確認された。促進材料ごとの特徴を詳しく述べると、初期においてはα, β, γの間で強度発現に大きな差は見られなかったが、長期ではβの強度が大きく伸びる傾向が見られた。一方でγは、工場A, Cにおいて他の促進材料と比較して長期強度が低下する傾向が得られた。この原因として、γの添加量が多い場合、コンクリートの中長期的な強度が低下することが報告¹⁾されており、本検討で用いた添加量が適切でなかったことが考えられる。また、工場AおよびCのみで実施した促進材zは、どちらの工場においても初期・長期ともに極めて良好な強度発現性を示した。初期強度は6000品に匹敵し、長期強度では6000品を上回る結果となった。なお、zは結合材単位量に対して内割で添加しており、セメント量が減少しているにもかかわらず、これほど良好な強度発現が得られた点は特筆すべきである。以上の結果より、適切な硬化促進材料を選定することで、4000品による6000品の代替が可能であることが示された。

3. 2 XRD分析による硬化促進材料の作用機構

硬化促進材料の添加が初期強度発現に及ぼす影響を考察するため、工場Aの各配合について、材齢17時間の硬化体を用いたXRD分析を行った。その結果、強度発現が良好であったβやzを添加した配合においては、無添加と比較してエトリンサイト（AFt）の積分強度比が大きい傾向が見られた。一般にAFtは材齢の経過とともにモノサルフェートに転移するが、強度発現が良好な配合では、材齢17時間の段階においてAFtが転移せずに多

表-2 硬化促進材料の主成分および添加量

分類	種類	主成分	添加量 (B×wt%)
化学混和剤	α	カルシウムシリケート水和物	4.0
	β	無機系窒素化合物（亜硝酸塩、硝酸塩）	4.0
	γ	非塩素系無機化合物と特殊界面活性剤	1.5
早強混和材	z	カルシウムサルホアルミネート系水和物	3.7

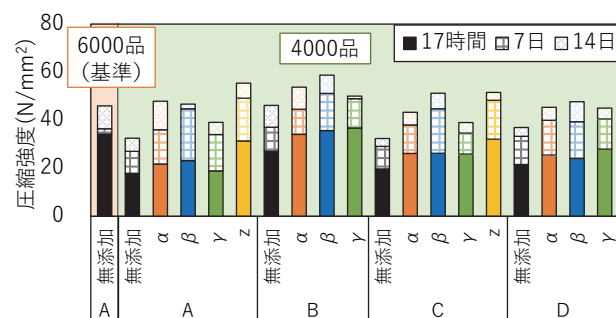


図-1 モルタルの圧縮強さ

く残存しており、これが初期強度の増進に寄与したと考えられる。なお、長期的な強度増進メカニズムや詳細な水和生成物の挙動については、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 蒸気養生において、GGBS4000品に硬化促進材料を添加することで、無添加の場合と比較して初期（材齢17時間）および長期（材齢14日）強度の改善が認められた。
- 2) 硬化促進剤βおよび硬化促進材zの添加による強度増進効果が顕著であり、zについてはセメント量が低下しているにもかかわらず、初期・長期ともに良好な結果が得られた。
- 3) 強度発現性が高い硬化促進材料は、初期段階においてエトリンサイトをモノサルフェートへ転移させずに安定して残存させることで、初期強度の増進に寄与していると推察される。

【参考文献】

- 1) 猪瀬亮ほか：高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性におよぼす高炉スラグ専用硬化促進剤の影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.47, No.1, pp.1470-1475 (2025)
- 2) 田中館悠登ほか：高炉スラグ微粉末を使用したモルタルの強度発現性に及ぼすカルシウムサルホアルミネート系早強材の影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.77, pp.206-212 (2023)