

高炉スラグ微粉末を混和した高強度コンクリートの強度発現および収縮特性に及ぼす無水石こうの影響

Effect of Anhydrite on Strength and Shrinkage Properties of High-Strength Concrete using Ground-Granulated Blast-Furnace Slag.

室蘭工業大学大学院工学研究科もの創造系領域 正 員 菅田紀之 (Sugata Noriyuki)
室蘭工業大学大学院工学研究科環境創生工学系専攻 ○学生員 尾久智基 (Ogyu Tomoki)

1. はじめに

近年、CO₂削減を地球環境の保全を目的として、産業副産物のコンクリートに対する有効利用が進められており、高炉スラグに関する成果は指針等として示されている¹⁾²⁾。高炉スラグをセメントの代用として使用した場合、大幅なCO₂排出量削減を期待できる。さらに、コンクリートの温度上昇の抑制、水密性の向上、化学抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制などの効果も期待できるため多くの場面で適用されている。一方で、初期強度の低下や高強度コンクリートにおける自己収縮の増大が指摘されている³⁾。この指摘を改善する目的として、高炉スラグ微粉末に無水石こうを添加して使用されることがある。無水石こう添加に伴い材齢初期のエトリンガイト生成量の増加などにより、初期強度低下が改善されることや自己収縮が低減されることなどの報告がある。しかしながら、圧縮強度が100 N/mm²を超えるような高強度コンクリートにおける高炉スラグ微粉末や無水石こうの影響についてはよくわかっていないのが現状である。

本研究では、圧縮強度100 N/mm²を超える高強度コンクリートの強度発現および収縮特性に及ぼす高炉スラグ微粉末および無水石こうの影響を明らかにするために、高炉スラグ微粉末の置換量および無水石こうのスラグへの添加量を変化させ、圧縮強度試験、自己収縮試験、乾燥収縮試験、XRD試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

本研究において高強度コンクリートの製造に用いた材料を表一1に示す。セメントとしては普通ポルトランドセメントを用い、高炉スラグ微粉末としてはJISの微粉末4000の品質を満足する比表面積4,020 cm²/gで無水石こう無混合のものを用いた。混和材としては、その他に高強度コンクリートに用いられることが多いシリカフェームを用いた。高炉スラグ微粉末に添加した無水石こうは平均粒径20 μm程度のものであり、SO₃量は56%である。細骨材としては陸砂、粗骨材としてはJISの碎石2005を用いた。また、流動性を確保するためにポリカルボン酸系の高性能AE減水剤、エントレインドエアの導入を抑制するためにポリエチレングリコール系の消泡剤を用いた。

2.2 配合

配合およびフレッシュ性状を表二2に示す。水結合材比(W/B、B=C+SF+BS+AH)を25%、シリカフェーム置換率(SF/B)を10%で一定、高炉スラグ微粉末の置換率((BS+AH)/B)を0%、20%および40%の3水準とした。高炉スラグ微粉末への無水石こうの添加率(SO₃/

(BS+AH))はSO₃量換算で0%、1.5%、3.0%、4.5%の4水準である。高性能AE減水剤については、スランプフローが65 cm程度となるように使用量を設定した。配合名については、高炉スラグ微粉末を混和していない配合はN、混和している配合はBで示し、Bに続き高炉スラグ微粉末の置換率、無水石こうの添加率(SO₃換算)として示した。なお、スランプフローの実測値は、63~69 cm、空気量の実測値は1.2~2.4%であった。

表一1 使用材料

材 料	性 質 等
普通ポルトランドセメント (C)	比表面積：3,260 cm ² /g 密度：3.16 g/cm ³
高炉スラグ微粉末 (BS)	比表面積：4,020 cm ² /g SO ₃ : 0 % 密度：2.91 g/cm ³
シリカフェーム (SF)	比表面積：200,000 cm ² /g 密度：2.2 g/cm ³ SiO ₂ : 97 %
無水石こう (AH)	平均粒径: 20 μm 程度 SO ₃ : 56 % 密度：2.97 g/cm ³
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.70 g/cm ³
粗骨材 (G)	JIS A 5005 碎石 2005 表乾密度：2.68 g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
消泡剤 (AF)	ポリエチレングリコール系

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS A 1108に従い行った。試験に用いた供試体は直径100 mm、高さ200 mmの円柱供試体であり、材齢1日まで20℃で封緘養生、その後20℃の水中養生を継続したものである。強度試験は材齢1, 3, 7, 14, 28日において行い、3本の平均を圧縮強度とした。供試体の打込み面の処理は研磨機による研磨仕上げである。

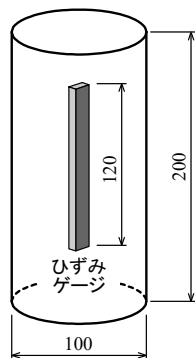
2.4 自己収縮試験

自己収縮試験は図一1に示すように直径100 mm、高さ200 mmの円柱供試体の中央軸方向にゲージ長120 mmの埋込型ひずみゲージを設置して行った。また、供試体中央に熱電対を設置し温度測定を行った。ひずみの測定は型枠にコンクリートを打込み、封緘状態としたのちに開始し、凝結始発を起点として以後のひずみを自己収縮ひずみとした。供試体作成に用いた型枠は鋼製缶であり、上面をポリエチレンシートおよびアルミテープを用いて密封し封

表—2 配合およびフレッシュ性状

配合名	W/B (%)	SF/B (%)	BS'/B (%)	SO ₃ /BS' (%)	単位量 (kg/m ³)									フロー (cm)	空気量 (%)
					W	C	SF	BS	AH	S	G	SP	AF		
N	25	10	0	0	165	594	66	0	0	803	830	7.59	0.023	64	1.2
B20-0.0	25	10	20	0	165	462	66	132	0	798	825	6.40	0.019	65	2.0
B20-1.5	25	10	20	1.5	165	462	66	128.5	3.54	798	825	6.40	0.019	63	2.4
B20-3.0	25	10	20	3.0	165	462	66	124.9	7.07	798	825	6.40	0.019	65	1.9
B20-4.5	25	10	20	4.5	165	462	66	121.4	10.6	798	825	6.40	0.019	66	1.6
B40-0.0	25	10	40	0	165	330	66	264	0	793	820	5.61	0.017	69	1.9
B40-1.5	25	10	40	1.5	165	330	66	256.9	7.07	793	820	5.61	0.017	69	1.3
B40-3.0	25	10	40	3.0	165	330	66	249.9	14.1	793	820	5.61	0.017	64	1.8
B40-4.5	25	10	40	4.5	165	330	66	242.8	21.2	793	820	5.61	0.017	69	2.0

B = C + SF + BS + AH, BS' = BS + AH



図一 収縮試験用供試体

減とした。試験環境は 20 °C に制御された恒温室内で、試験期間は材齢 30 日までである。

2.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は自己収縮試験と同様に直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体の中央軸方向にゲージ長 120 mm の埋込型ひずみゲージを設置して行った。試験は材齢 7 日まで 20 °C 封緘状態で養生したものを用い、脱型後に供試体の上下面にアルミテープを貼付け、供試体側面のみを乾燥面とした。試験環境は温度 20 °C、相対湿度 60 % で、試験期間は材齢 30 日までである。

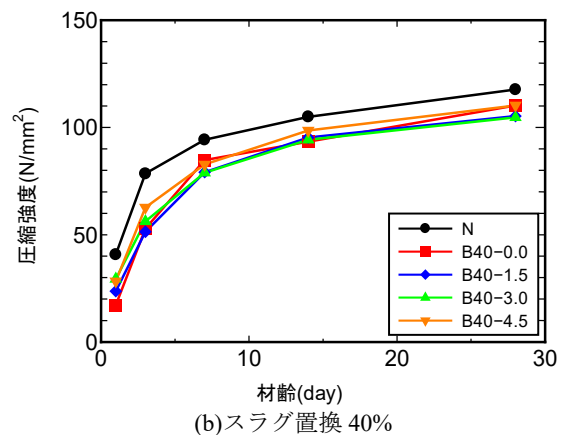
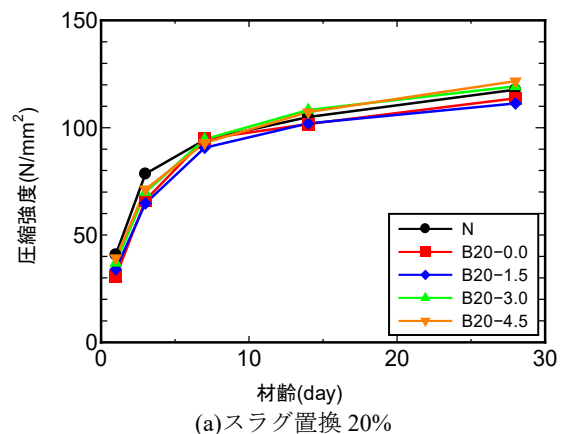
2.6 X 線回折試験

表—2 に示した配合において骨材を除いたセメントペーストを作製し、養生後、アセトンを用いて水和を停止し、粉末状にしたものを試料として X 線回折試験を行った。得られた結果からセメント化合物および生成物を同定し積分強度を求めた。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図—2 に材齢 28 日までの圧縮強度、図—3 に材齢 7 日までの圧縮強度を示す。図—2, 3 から、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に従い圧縮強度が低下していることがわかる。また、図—3 から初期強度の低下は著しいが、図—2 の材齢 28 日での強度は回復しているといえる。これは、シリカフェームによるポズラン反応が影響していると考えられる。図—3(a), (b) ともに無水石こうの添加率が高いほど初期強度が増加していることがわかる。これは、無水

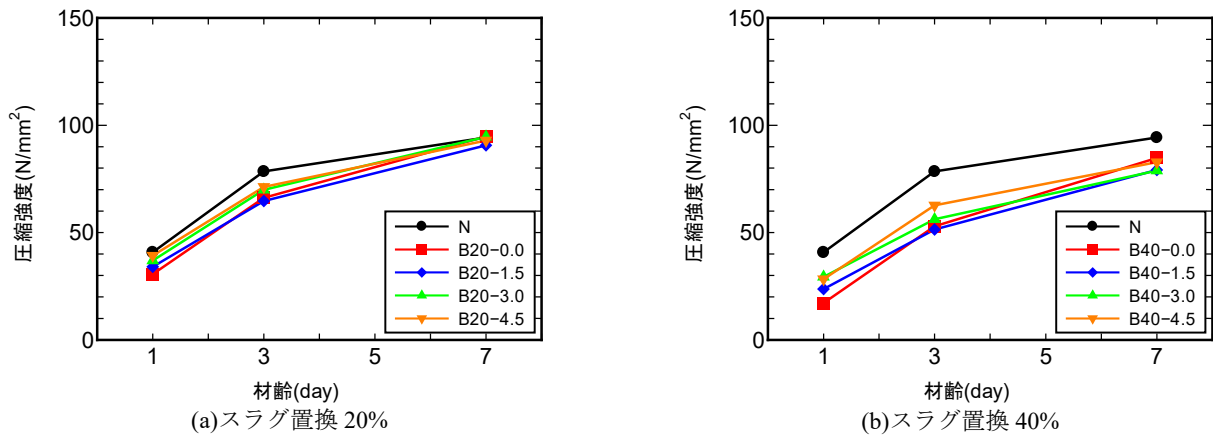


図—2 材齢 28 日までの圧縮強度の経時変化

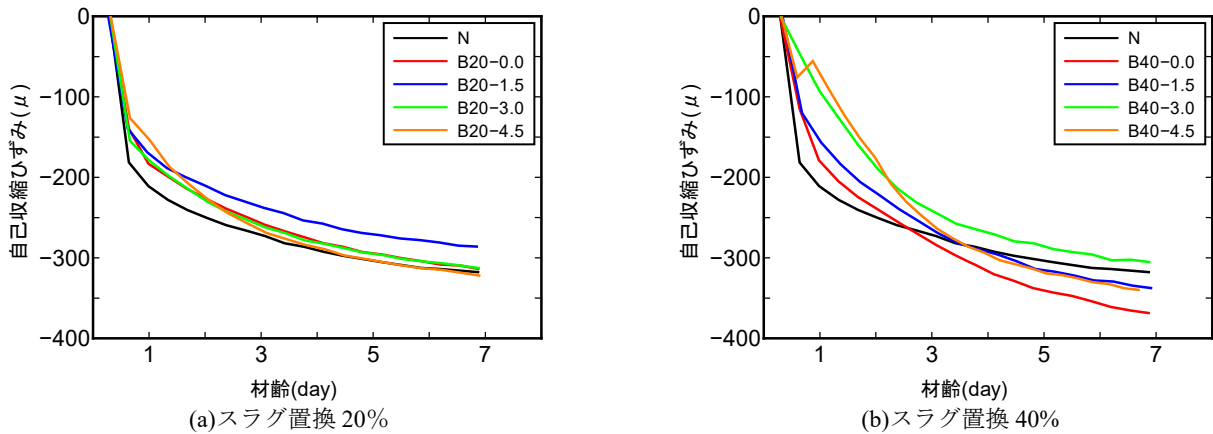
石こうを添加することで、エトリンガイトの生成量が増大したためだと考えられる。

3.2 自己収縮

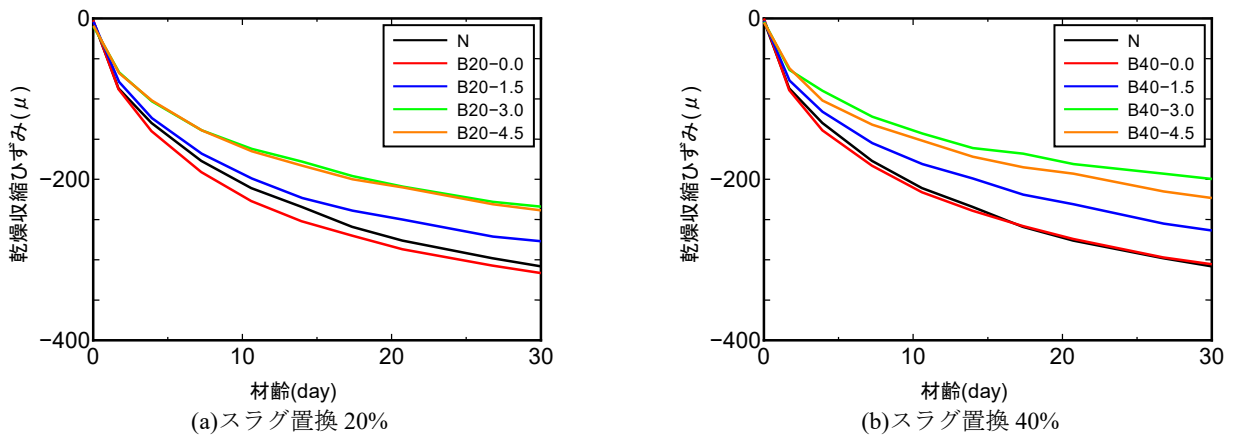
図—4 に材齢 7 日までの自己収縮ひずみを示す。(a) からスラグ置換 20% の自己収縮ひずみは、高炉スラグ微粉末を混和していない N よりもひずみの増大が低減されていることがわかる。また、(b) から、スラグ置換 40% の自己収縮ひずみは材齢 3 日程度まで、高炉スラグ微粉末を混和していない N よりもひずみの増大が低減されていることがわかる。さらに、(b) の B40-4.5 の材齢 1 日程度で自己収縮ひずみが 25μ ほど減少していることがわかる。これは、無水



図—3 材齢7日までの圧縮強度の経時変化



図—4 材齢7日までの自己収縮ひずみの経時変化



図—5 材齢30日までの乾燥収縮ひずみの経時変化

石こう添加率が高いほど膨張性のあるエトリンガイトが生成され、自己収縮ひずみの低減につながったと考えられる。

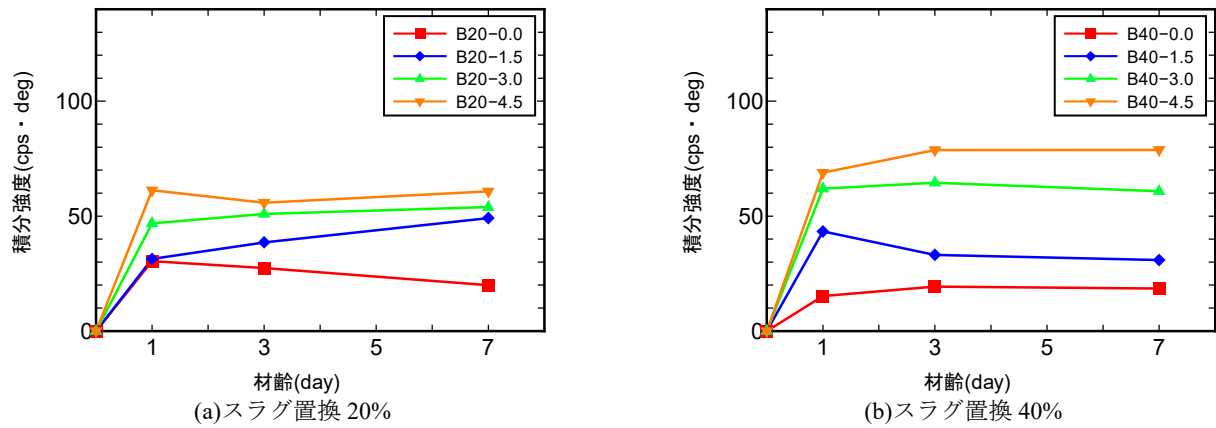
3.3 乾燥収縮

図—5 に材齢 30 日までの乾燥収縮ひずみを示す。B40-0.0 は B20-0.0 に比べ乾燥収縮ひずみは低減されているが、高炉スラグ微粉末を混和していない N とほぼ同値だといえる。また、無水石こうを添加した場合はスラグ 20% 置換よりもスラグ 40% 置換の方が乾燥収縮ひずみが低減され

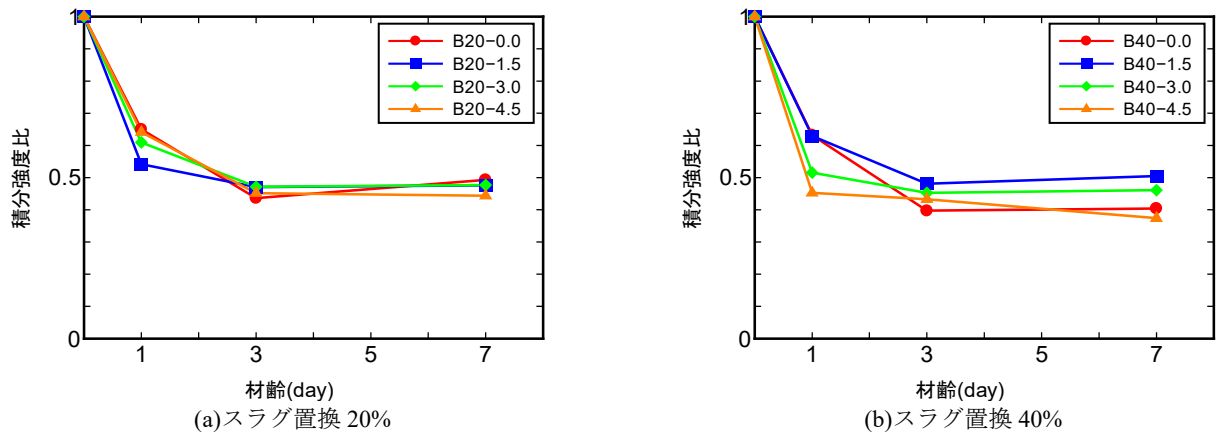
ることがわかる。また、(a),(b)ともに無水石こう添加率が高いほど乾燥収縮ひずみが低減されていることもわかる。これは、無水石こうを添加した場合、初期強度が増加している傾向から、ペースト剛性が大きくなり、収縮低減につながったのではないかと考えられる。

3.4 X 線回折試験

図—6 に X 線回折試験で得た、エトリンガイトの $2\theta=9.1^\circ$ における積分強度を示す。図—6 からエトリンガイトの積分強度は、材齢 1 日にかけて起こる水和反応で増大し、そ



図—6 材齢7日までのエトリンガイトの積分強度



図—7 材齢7日までのセメント化合物の割合

の後ほぼ一定の値をとることがわかる。また、無水石こう添加率が高いほどエトリンガイトの積分強度は増大している。エトリンガイトの生成が初期強度の増加およびそれによる乾燥収縮の低減、また膨張性のエトリンガイトの増加が自己収縮の低減につながったといえる。

図—7 は、 C_3S および C_2S の $2\theta=31.5^\circ\sim33.5^\circ$ におけるピークの積分強度の和を材齢0日(未水和の粉体)の値で除した積分強度比である。図—7 より高炉スラグ微粉末を混和した場合、材齢3日まではセメント化合物が減少し、セメントの水和反応が進行しているといえるが、材齢3日から7日までの変化は少なくセメントの水和反応は停滞しているといえる。また、無水石こう添加率が高いほどセメント化合物量が少ない傾向にあり、セメントの水和反応が促進される傾向にあるといえる。無水石こうの添加による水和反応の促進が初期強度の増加につながったといえる。また、水和反応の促進による細孔径の微細化が、乾燥収縮の駆動力を増加させると考えられるが、ペースト剛性の増加および残存水量の減少による影響が勝り、乾燥収縮ひずみの低減につながったといえる。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を混合した圧縮強度が 100 N/mm^2 を超える高強度コンクリートの強度発現および収縮特性について、高炉スラグ微粉末と無水石こうの影響を検討した。その結果、次のような結果が明らかとなった。

- 1) 高炉スラグ微粉末の混和率が高いほど初期強度は減少し、無水石こう添加率が高いほど初期強度は増大する。
- 2) 無水石こう添加率が高いほど自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみは低減する。
- 3) 無水石こうの添加によるエトリンガイトの生成量の増大とセメントの水和反応の促進が、初期強度の増大および自己収縮ひずみの低減につながったといえる。
- 4) 無水石こう添加率が高いほど水和反応が促進され、ペースト剛性が大きくなるとともに残存水量の減少が、乾燥収縮ひずみの低減につながったといえる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー 第151号 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，土木学会，2018
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー 第76号 高炉スラグ骨材コンクリートの施工指針，土木学会，1993
- 3) 小亀大佑，菅田紀之，横川慶介：高炉スラグ微粉末とシリカフュームを用いた高強度コンクリートの自己収縮について，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.183-188，2016