

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強度および収縮特性

Compressive Strength and Shrinkage of High-Strength Concrete with Ground-Granulated Blast-Furnace Slag and Silica Fume

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 小亀大佑 (Daisuke Kogame)
室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域 正会員 菅田紀之 (Noriyuki Sugata)

1. はじめに

我が国で発生する産業副産物のうち高炉水砕スラグは製鉄過程において大量に副産されている。この高炉水砕スラグは高炉セメントの混合材、コンクリート用混和材、地盤改良材、コンクリート用骨材などに利用されている。この高炉水砕スラグを微粉碎した高炉スラグ微粉末を高炉セメント用混合材あるいはコンクリート用混和材として用いた場合、セメント使用量が減ることによるコンクリート製造に起因する CO₂ 排出量の削減効果が期待できる。さらに水和熱の抑制、耐海水性向上効果などがある。また、産業副産物の一種であるシリカフュームは高強度コンクリート用混和材として利用されており、これまで高炉スラグ微粉末あるいはシリカフュームを混和したコンクリートに関する研究は多く行われてきている。高強度コンクリートでは、その自己収縮が大きくなることが知られており、これら混和材の影響についても明らかにする必要がある。自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響に関しては、混和量および粉末度が高くなると自己収縮が大きくなるという報告¹⁾、高炉スラグ微粉末中の石こう量が増えると自己収縮が小さくなるという報告²⁾がある。自己収縮に及ぼすシリカフューム混和の影響に関しては、シリカフュームの混和量が多くなると

自己収縮が大きくなるという報告³⁾がある。これらの混和材の影響については、それ以後いくつか研究がおこなわれてきている。しかしながら、高炉スラグ微粉末とシリカフュームを併用した圧縮強度が 80 N/mm²を超えるような高強度コンクリートの特性については不明な点が多い。

本研究では、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームの混和が高強度コンクリートの収縮にどのような影響を及ぼすのか明らかにするために、水結合材比を 30 %とし高炉スラグ微粉末の結合材に対する置換率を 0 %から 40 %、シリカフューム置換率を 0 %から 20 %まで変化させた高強度コンクリートの圧縮強度試験および自己収縮試験、乾燥収縮試験を行い検討した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

本研究において高炉スラグ微粉末とシリカフュームを併用した高強度コンクリートの製造に用いた材料を表-1に示す。結合材として普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末およびシリカフュームを用いた。使用した高炉スラグ微粉末は JIS 粉末度 6000 の規格を満足する比表面積 6,010 cm²/g、密度 2.89 g/cm³のものである。シリカフュームはノルウェー産の粉体系のものであり、比表面積は 200,000 cm²/g、平均粒径は約 0.2 μm、密度は 2.2 g/cm³のものである。細骨材としては陸砂、粗骨材としては JIS 規格 2005 碎石を用いた。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、空気量を調整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

本研究に用いたフライアッシュとシリカフュームを併用した高強度コンクリートの配合を表-2に示す。水結合材比 (W/B, B=C+BFS+SF) を 30 %とし、シリカフューム置換率 (SF/B) を 0 %、10 %および 20 %の3水準、高炉スラグ微粉末置換率 (BFS/B) を 0 %、20 %および 40 %の3水準の配合とした。また、目標スランブフローは材料分離を配慮して、W/B = 30 %の配合で BFS/B = 0 %では 60 cm、その他の配合では 65 cm として配合を決定した。各配合で練混ぜたコンクリートのスランブフローの実測値は、目標フロー60 cm に対して 58 ~ 63 cm、目標フロー65 cm に対して 65 ~ 69 cm、空気量の実測値は、0.4 ~ 2.4 %であった。

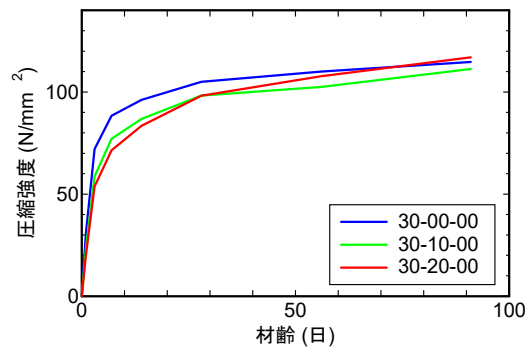
表-1 使用材料

材 料	性 質 等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm ³
高炉スラグ 微粉末 (BFS)	比表面積：6,010 cm ² /g 密度：2.89 g/cm ³ SO ₃ ：2.9%
シリカフューム (SF)	比表面積：200,000 cm ² /g 平均粒径：0.2 μm 密度：2.2 g/cm ³
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.73 g/cm ³
粗骨材 (G)	JIS 2005 碎石 表乾密度：2.66 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

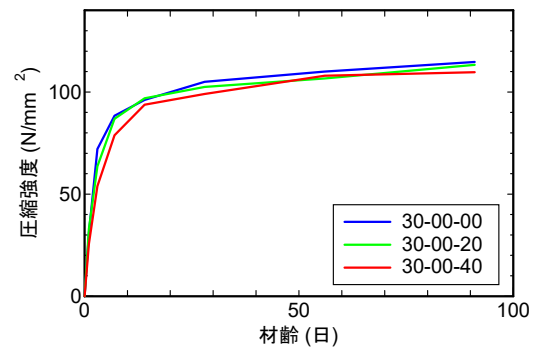
表－2 配合

配合名	W/B (%)	SF/B (%)	BFS/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	C	SF	BFS	S	G	SP	AF
30-00-00	30	0	0	49	165	550	0	0	868	890	2.86	0.008
30-00-20	30	0	20	49	165	440	0	110	863	885	2.31	0.007
30-00-40	30	0	40	49	165	330	0	220	859	881	2.15	0.006
30-10-00	30	10	0	49	165	495	55	0	858	879	5.78	0.017
30-10-20	30	10	20	49	165	385	55	110	853	875	4.95	0.015
30-10-40	30	10	40	49	165	275	55	220	849	871	4.02	0.012
30-20-00	30	20	0	49	165	440	110	0	847	869	8.25	0.025
30-20-20	30	20	20	49	165	330	110	110	843	865	6.88	0.021
30-20-40	30	20	40	49	165	220	110	220	839	860	5.50	0.017

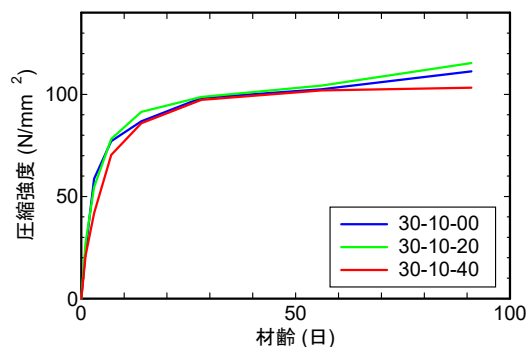
$$B = C + SF + BFS$$



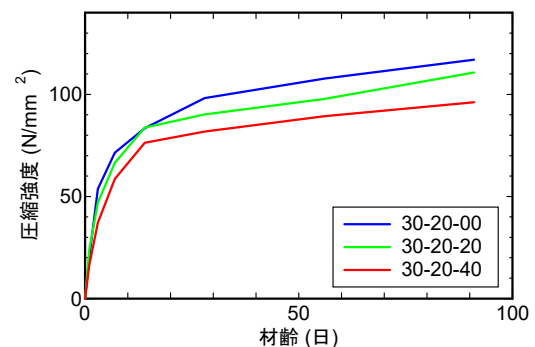
(a) BFS/B = 0 %



(b) SF/B = 0 %



(c) SF/B = 10 %



(d) SF/B = 20 %

図－2 圧縮強度

2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従った。試験には直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用い、3 本の結果の平均を圧縮強度とした。供試体の養生は材齢 1 日まで 20℃の恒温室における封かん養生、それ以降は 20℃の水中養生とした。供試体の端面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、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体の中央軸方向に埋込み型ひずみゲージを配置して行った。また、供試体中央に熱電対を埋込み、供試体温度の測定を行った。ひずみの測定は型枠にコンクリートを打ち込んだ後から封かん状態で行った。試験環境は温度 20℃である。測定本数は各ケースで 2 本であり、測

定結果の 2 本の平均を自己収縮ひずみとした。

2.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮も自己収縮と同様に直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体に埋込み型ひずみゲージを配置して行った。供試体の上下面にはアルミテープを貼り付け、供試体側面のみを乾燥面として測定を行った。ひずみの測定は材齢 7 日から行った。測定本数は各配合 1 本とし。試験環境は温度 20℃で相対湿度は 60%である。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図－2 は材齢 91 日までの圧縮強度を示している。図 (a) は BFS/B=0%、図(b)は SF/B=0%、図(c)は SF/B=10%、図(d)は SF/B=20%の結果である。図から、材齢

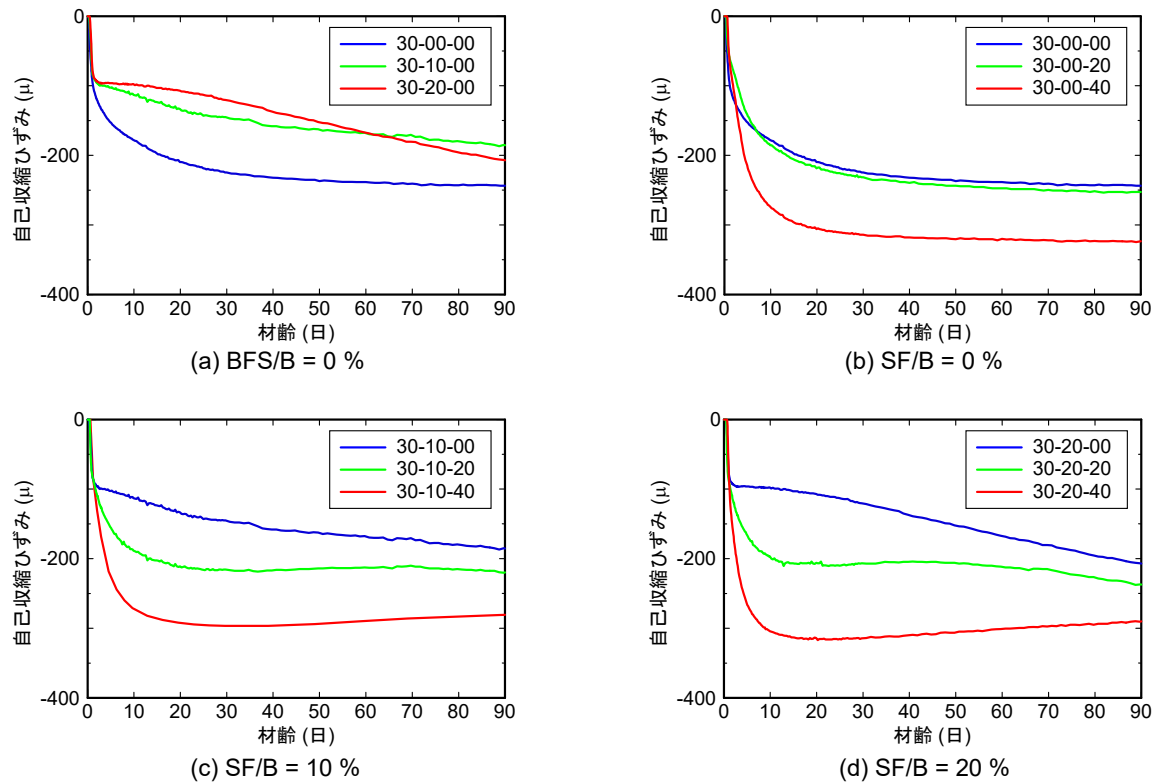


図-3 自己収縮ひずみ

28 日において $98 \sim 120 \text{ N/mm}^2$ の圧縮強度が得られていることがわかる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなっていることが確認できる。特にシリカフェーム置換率 $\text{SF/B} = 20\%$ において、圧縮強度の減少が大きくなっている。このケースでは、シリカフェーム量と高炉スラグ微粉末量の和が多いため、セメント量が少なくなっていることにより、水和反応により生成される水酸化カルシウムが少なくなり、シリカフェームのポゾラン反応および高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応に必要な水酸化カルシウムが不足し、圧縮強度が大きく減少したものと考えられる。高炉スラグ微粉末置換率 $\text{BFS/B} = 0\%$ において、シリカフェーム混和の影響について着目すると、材齢 28 日程度では、シリカフェーム置換率が大きくなるに従い圧縮強度が若干小さくなっていることが分かる。その程度は、シリカフェーム置換率 $\text{SF/B} = 0\%$ における高炉スラグ微粉末の影響より小さい。

3.2 自己収縮

図-3 に材齢と自己収縮の関係を示す。図 (a) は $\text{BFS/B} = 0\%$ 、図 (b) は $\text{SF/B} = 0\%$ 、図 (c) は $\text{SF/B} = 10\%$ 、図 (d) は $\text{SF/B} = 20\%$ の結果である。まず、図 (a) によりシリカフェームを単独使用した場合について検討する。シリカフェームを混和することにより、自己収縮ひずみの立ち上がり材齢が遅くなっていることが分かる。また、材齢 14 日においてシリカフェーム未混和の自己収縮ひずみが 194μ であるのに対して、混和した自己収縮ひずみは 121μ および 101μ である。 $\text{SF/B} = 20\%$ では材齢 20 日以後のひずみ増加量が $\text{SF/B} = 0\%$ および 10% よりも大きくなっている。これは材齢 20 日以後における継続的なポゾラン反応による細孔構造の緻密

化の影響ではないかと考えられる。図 (b) により高炉スラグ微粉末を単独使用した場合について検討する。高炉スラグ微粉末を混和することにより、自己収縮ひずみの立ち上がり材齢が遅くなり、材齢 2 日あるいは 7 日程度までの初期の自己収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。それ以後の材齢については、 $\text{BFS/B} = 20\%$ のひずみは未混和と同程度、 $\text{BFS/B} = 40\%$ では $80 \sim 100 \mu$ 大きくなっている。また、収縮ひずみの増加量は材齢 14 日程度までが大きく、それ以後の増加量は小さくなっている。高炉スラグ微粉末が多いほどひずみの立ち上がり材齢が遅くなる要因としては、セメント量が少いため水和反応量が少なくなること、およびそれに伴い水酸化カルシウム生成量が少なくなり、高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応の進行が遅くなることにより、高炉スラグ微粉末が多いほど全体の水硬反応速度が小さくなったことが考えられる。次に図 (c) および図 (d) によりシリカフェームと高炉スラグ微粉末を併用した場合について検討する。図 (c) の $\text{SF/B} = 10\%$ より、高炉スラグ微粉末の混和により収縮ひずみの立ち上がり材齢は、 $\text{SF/B} = 0\%$ のケースと同様に遅くなっているが、材齢初期における自己収縮の低減はない。材齢 20 日以後において、 $\text{BFS/B} = 0\%$ では収縮ひずみが継続的に増加しているのに対して、 $\text{BFS/B} = 20\%$ ではひずみがほぼ一定。 $\text{BFS/B} = 40\%$ ではひずみが若干減少している。図 (d) の $\text{SF/B} = 20\%$ の自己収縮ひずみは $\text{SF/B} = 10\%$ と類似した結果になっている。 $\text{BFS/B} = 20\%$ および 40% では材齢 20 日以後において収縮ひずみが若干減少している。

3.3 乾燥収縮

図-4 に $\text{W/B} = 30\%$ における材齢と乾燥収縮の関係を示す。図 (a) は $\text{BFS/B} = 0\%$ 、図 (b) は $\text{SF/B} = 0\%$ 、

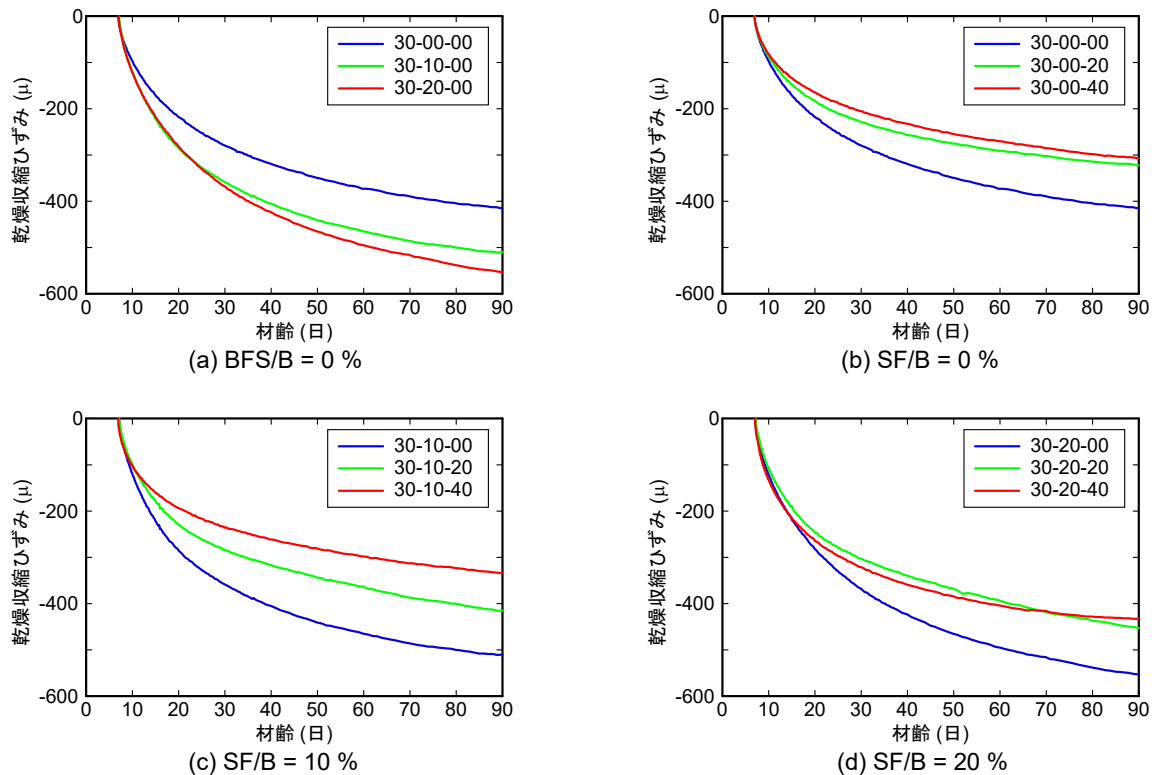


図-4 乾燥収縮ひずみ

図 (c) は $SF/B = 10\%$ 、図 (d) は $SF/B = 20\%$ の結果である。図 (a) によりシリカフェームを単独使用した場合について検討する。材齢初期から、 SF 置換率が増加するほどひずみが増大する傾向が見られる。材齢 90 日では、シリカフェーム未混入の場合 424μ であるのに対して、 513μ および 569μ である。この要因としては、シリカフェームにより反応の遅延が起こり、未反応水が多く残ることにより、蒸発水量が多くなったためと考えられる。図 (b) により高炉スラグ微粉末を単独使用した場合について検討する。材齢 90 日において、高炉スラグ微粉末を混和することにより、乾燥収縮ひずみが小さくなっていることが分かる。高炉スラグ微粉末が未混入の場合、 569μ であるのに対して、 328μ および 315μ である。次に図 (c) および図 (d) によりシリカフェームと高炉スラグ微粉末を併用した場合について検討する。 $SF/B=10\%$ の初期材齢では $BFS/B=40\%$ のひずみ増加量が大きいことが分かる。 $SF/B=20\%$ でも同様に材齢 14 日程度までは $BFS/B=40\%$ のひずみ増加量が若干大きい、それ以後の増加量は小さくなっていることがわかる。このことから、高炉スラグの使用によりシリカフェームによる乾燥収縮を抑制しているのがわかる。これはシリカフェームのポズラン反応より高炉スラグの潜在水硬反応が先行し、水を多く消費し蒸発水量が少なくなったためであると考えられる。

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末とシリカフェームを併用した高強度コンクリートの強度、収縮特性を検討するために、水結合材比を 30%、高炉スラグ微粉末の結合剤に対する置換率を 0% から 40%、シリカフェームの置換率を 0% から 20% に変えて、圧縮強度試験および自己

収縮試験、乾燥収縮試験を行い、材齢 91 日までの圧縮強度および材齢 90 日までの自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみを示した。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末の混和は圧縮強度を低下させる場合がある。特に、シリカフェーム置換率 20% における、高炉スラグ微粉末の混和による強度低下は大きい。
- 2) シリカフェームの単独混和は初期材齢における自己収縮を減少させる。
- 3) 高炉スラグ微粉末は自己収縮の立ち上がりを遅延、あるいは立ち上がり時における収縮ひずみの増加率を減少させる。
- 4) シリカフェームは乾燥収縮を増加させる。
- 5) 高炉スラグ微粉末は乾燥収縮を抑制する。

参考文献

- 1) 三浦智哉ほか：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
- 2) 原田克己・松下博通・後藤貴弘・三小田典史：高炉セメント使用コンクリートの高温化における歪み特性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23、No.2、pp.901-906、2001
- 3) 今本啓一・大谷博：高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No.1、pp.1061-1066、1995