

高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの強度・収縮に及ぼす
温度履歴の影響について

Effect of Thermal History on Strength and Shrinkage Characteristics of High-Strength Concrete with 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 (Noriyuki Sugata)
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 山田浩貴 (Hiroki Yamada)

1. はじめに

日本のセメント産業による CO₂の排出は温室効果ガスの総排出量の約 4%に相当する。この対策として経済産業省が「混合セメントの利用拡大」を施策の1つとして掲げている。日本の製鉄所の高炉より副産物として製造される高炉スラグ微粉末は年間約 3000 万トンであり、混和材および混合セメントとして広く用いられる。セメントを高炉スラグ微粉末で置換することで、セメントのみを使用した場合よりも CO₂を大幅に削減することが期待できる。また、高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有しており、長期強度の増進や、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。一方でセメント置換によりクリン量が減少し材齢初期の反応が遅延することや、自己収縮が大きくなることが知られている。また、高強度コンクリートの特性として水和発熱量が大きいことがあげられ、コンクリートの性質に及ぼす水和発熱の影響は無視できない。本研究では、簡易断熱養生を用いてコンクリート部材内部の環境に近い状況の供試体を製造し、高炉スラグ微粉末を混和した場合の強度特性および収縮特性について検討した。

表-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：3,280 cm ² /g 密度：3.16g/cm ³
高炉スラグ微粉末(BFS)	比表面積：5,970cm ² /g 密度：2.89g/cm ³ SO ₃ ：0%
シリカフェューム(SF)	比表面積：200,000cm ² /g 密度：2.2g/cm ³
細骨材(S)	陸砂 表乾密度：2.70g/cm ³
粗骨材(G)	JIS A 5005 碎石 2005 表乾密度：2.68g/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. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートの製造に使用した材料を表-1に示す。結合材には普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた。使用した高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 の規格を満たす比表面積 5,970cm²/g、密度 2.89g/cm³ のものである。細骨材として陸砂、粗骨材として碎石 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、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、高炉スラグ微粉末置換率(BFS/B)を 0%(N)、20%(B20)、40%(B40)の3種類に設定した。目標スランプフローを 65cm、目標空気量を 1.0%となるように高性能 AE 減水剤、消泡剤の量を調整し、配合を決定した。

表-2 配合

単位量(kg/m ²)							
W	C	SF	BFS	S	G	SP	AF
165	495	55	0	851.3	879	6.05	0.018
	385		110	847.3	875	4.95	0.015
	275		220	843.2	871	4.675	0.014

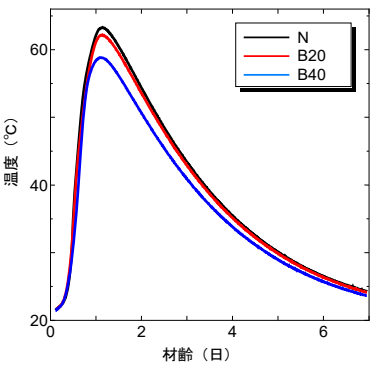


図-1 簡易断熱養生の温度履歴

2.3 養生方法

養生方法は20℃水中養生(20)、簡易断熱養生(SA)、温度制御養生(TH)の3種類で行った。20℃水中養生は材齢24時間まで20℃の環境下で封かん養生したのち脱型し、それ以降は20℃に制御された水中で養生した。簡易断熱養生は部材厚1m程度の中心部を模擬できる発泡スチロールボックスを用いて材齢7日まで養生を行い、脱型後、温度20℃の水中養生とした。温度制御養生は簡易断熱養生で測定された温度履歴において20℃からの温度上昇量1/2の温度で材齢7日まで養生し、脱型後に温度20℃の水中養生とした。簡易断熱養生の温度履歴を図-1に示す。NとB20が同程度の温度になったがB40は若干低い温度となった。

2.4 圧縮強度試験

圧縮強度試験はJIS1108に従い行った。直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用い、材齢は7、14、28、56日で、3本の結果の平均を圧縮強度とした。供試体の端面処理は研磨機を用いて行った。

2.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は図-2に示すように直径100mm、高さ200mmの円柱供試体の中央軸方向にゲージベース長120mmの埋込型ひずみゲージを設置して行った。材齢7日まで20℃封緘状態で養生されたものを用い、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℃、相対湿度60%で、試験期間は材齢56日までである。乾燥収縮試験においては、同様の処理を行った供試体の質量測定も行い、質量減少率を算出した。

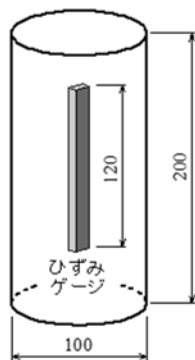


図-2 収縮試験用供試体

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

配合別の圧縮強度試験の結果を図-3に示す。図(a)、(b)、(c)はそれぞれBFS置換率0%(N)、20%(B20)、40%(B40)の結果である。図(a)のNシリーズでは材齢7日でN-SA、N-TH、N-20の順になっており、高温履歴であるほど強

度が高い。しかしながら、材齢28日ではN-SAの強度増加が見られず、高温履歴であるほど強度は低くなった。材齢56日ではN-20の強度が増加する一方でN-SAの強度は増加せず材齢28日のN-20の値を下回る結果となった。N-THは増加傾向にあるがN-20を下回っている。図(b)のBFS20%シリーズ、図(c)のBFS40%シリーズにおいては、SAシリーズに関して図(a)と同様の結果が得られ、BFS置換率の変化にかかわらずSAシリーズの長期強度増加が遅延している結果となった。THシリーズに関しても図(a)と同様の結果となった。いずれも20℃養生の強度が1番大きい。長期材齢において温度制御養生を行った供試体は強度が増加傾向にあり、特に図(c)のBFS置換率40%では強度の増加率が20℃養生よりも高い。材齢7日においてSAシリーズの強度が高かったのは高温履歴により水和反応が促進されたためと考えられる。

次に養生方法別の圧縮強度試験の結果を図-4に示す。図(a)、(b)、(c)はそれぞれ20℃水中養生、簡易断熱養生、温度制御養生の結果である。図(a)の20℃水中養生では材齢56日までNの強度が1番高くBFS置換率が高いほど強度は低い。図(b)の簡易断熱養生では強度の増加傾向が図(a)と同じになったが、材齢56日までを通してBFS置換率にかかわらず強度の増加がほぼ見られないことがわかる。図(c)の温度制御養生では材齢14日からNとBFS置換率40%は強度の差はあるが、同じ傾向となった。BFS置換率20%は他に比べて材齢28日から増加傾向にあり、高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応が若干促進していると考えられる。

3.2 乾燥収縮

配合別の乾燥収縮試験結果を図-5に示す。図(a)、(b)、(c)はそれぞれBFS置換率0%(N)、20%(B20)、40%(B40)の結果を示している。図(a)はN-20、N-TH、N-SAの順で乾燥収縮ひずみが大きくなっていることがわかる。特にN-20は材齢56日で約500μmとなっておりそのひずみはN-THと約200μmの差があった。図(b)図(a)と同様の結果となった。図(c)はB40-THがB40-20のひずみより若干大きい値となった。これら3つの図よりBFS置換率に関わらず高温履歴を受けると乾燥収縮が小さくなる。

次に養生方法別の乾燥収縮試験結果を図-6に示す。図(a)、(b)、(c)はそれぞれ20℃水中養生、簡易断熱養生、温度制御養生を示している。図(a)、(c)より、BFS置換率が高いほど乾燥収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。20℃水中養生ではその差はBFS置換率を20%増やすごとに100μm程度も低減している。図(b)の簡易断熱養生では若干差はあるが、BFS置換率の影響を受けているというほどの差はないため、養生時の温度が高いほど乾燥収縮に及ぼすBFS置換率の影響が小さくなるといえる。

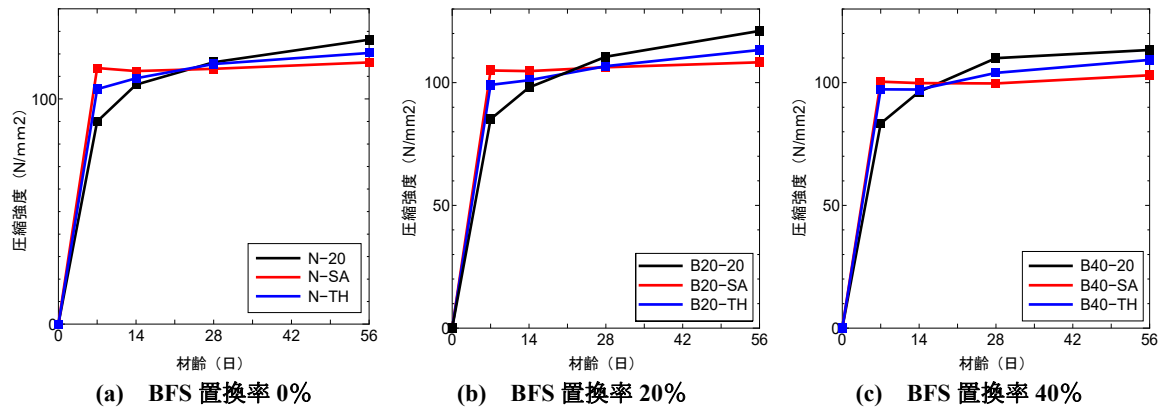


図-3 配合別圧縮強度試験結果

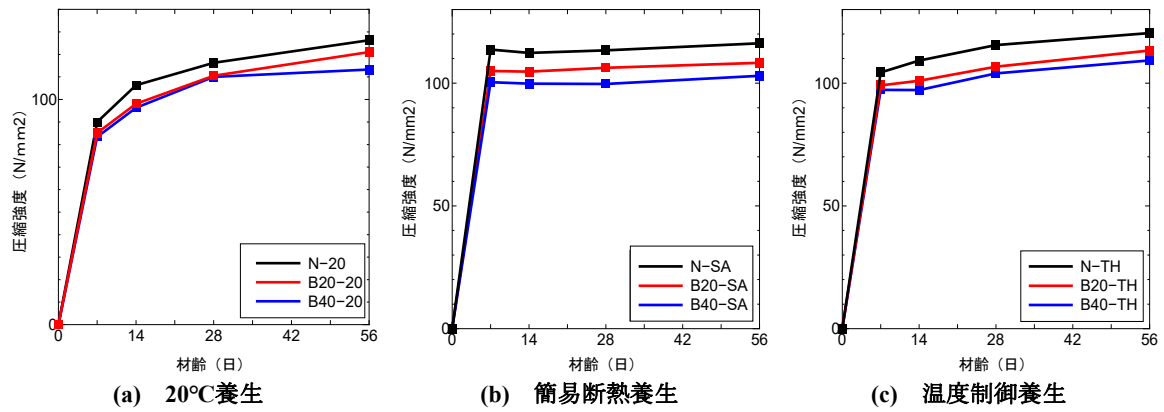


図-4 養生別圧縮強度試験結果

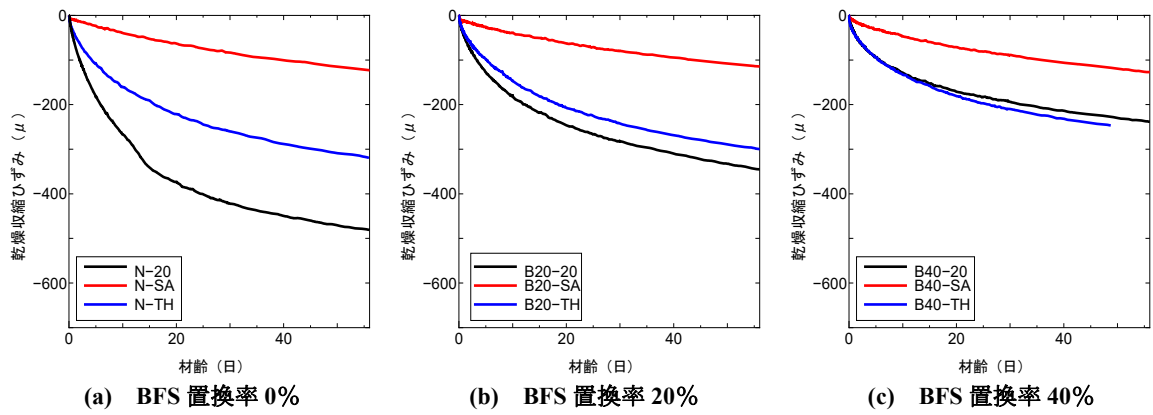


図-5 配合別乾燥収縮試験結果

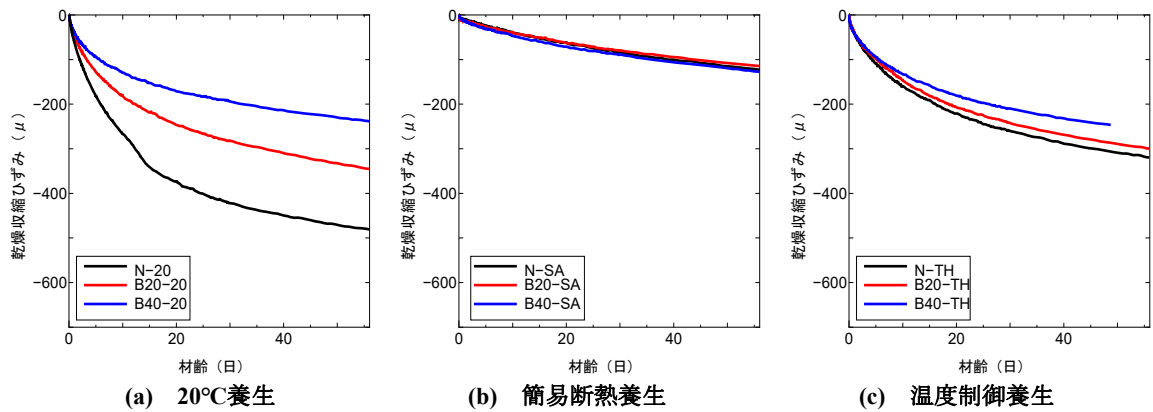
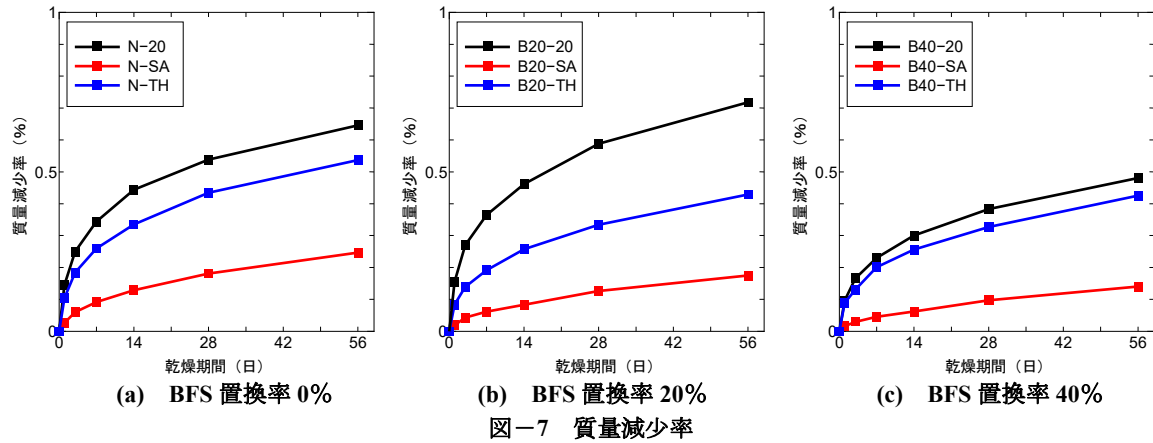


図-6 養生別乾燥収縮試験結果



3.3 質量減少率

図-7 に各配合で材齢ごとに質量測定した供試体の質量減少率の結果を示す. 質量減少率の算出に用いた式(1)は以下となっている.

$$\text{質量減少率}(\%) = 100(1 - M/M_0) \quad (1)$$

ここで, M : 測定開始時の質量

M_0 : 材齢ごとの質量

図-7 より, 養生温度が高いほど質量減少率が小さくなっていることから温度履歴を受けると乾燥が抑制されることがわかる. 簡易断熱養生および温度制御養生については BFS 置換率による減少率の変化は見られないが 20°C 養生には BFS 置換率 20% と 40% で 0.2% 程度の差が見られた.

図-5 の乾燥収縮試験結果と比較すると質量減少率が高いほど乾燥収縮ひずみが大きくなっていることがわかる.

4. まとめ

本研究では簡易断熱養生を行い, コンクリート部材内部の環境に近い状況の供試体を製造し, 高炉スラグ微粉末を混和した場合の強度特性および収縮特性について検討した. その結果明らかとなったことを次に示す.

- 1) 材齢初期において温度履歴が高温であるほど圧縮強度が大きくなる.
- 2) BFS 置換しているコンクリートは強度発現が遅延するが温度制御養生を行うと強度回復ができる.
- 3) BFS 置換率が高いほど乾燥収縮は小さくなる.
- 4) 高い温度での養生は乾燥収縮ひずみの抑制に有効的である.

参考文献

- 1) 経済産業省: 混合セメントの普及拡大方策, 2016