

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
水和発熱の影響について

Effect of Hydration Heat 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

近年、環境への負荷を低減するため、高炉セメントなど産業副産物の使用が推進されている。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¹⁾。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カ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圧縮強度特性および乾燥収縮特性について検討した。また、水和反応メカニズムの面から検討するために、高強度コンクリートから骨材を除いたセメントペーストを作成し、X線回折装置による分析を行った。

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)、40%(B40)の 2 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。セメントペーストの配合は高強度コンクリートから、粗骨材および細骨材を除去したものを使用している。

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 :3.3%
シリカフューム(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

表-2 コンクリート配合

単位量 (kg/m ³)							
W	C	SF	BFS	S	G	SP	AF
165	495	55	0	851.3	879	6.05	0.018
	275		220	843.2	871	4.675	0.014

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

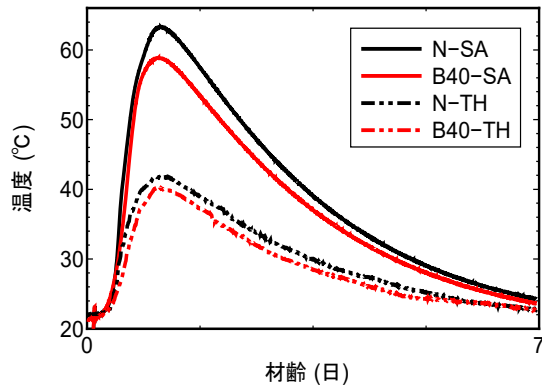


図-1 簡易断熱養生および温度制御養生の温度履歴

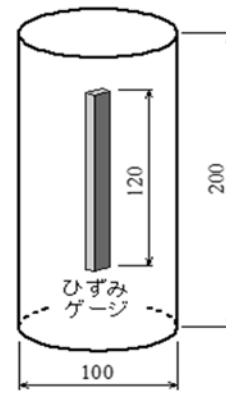


図-2 収縮試験用供試体

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。簡易断熱養生および温度制御養生の温度履歴を図-1 に示す。簡易断熱養生と温度制御養生のいずれも高炉スラグ微粉末の添加により、温度上昇が若干抑制されているのがわかる。セメントペーストに関しては、練り混ぜ後、ジップロックに入れ、厚さ 5mm 程度になるよう薄く伸ばし、コンクリートと同様、3 種類の養生を行った。

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 日で、3 本の結果の平均を圧縮強度とした。

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 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体の中央軸方向にゲージベース長 120 mm 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 28 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。

2.6 X線回折試験

X線回折試験は、作成したセメントペーストを、材齢 0、7、28 日で 2~3 mm に粉碎し、アセトンを用いて水和停止した後、乳鉢と乳棒を用いて粉末にし、45μm ふるいで振ったものを試料とした。その試料を X線回折装置を用いてセメント化合物および水和生成物を同定し、その算出した積分強度を求めた。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を図-3 に示す。図(a), (b), はそれぞれ BFS 置換率 0%(N), 40%(B40), の結果である。図(a)の N 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。図(b)の B40 においては、SA 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 の長期強度増加が遅延している結果となった。TH に関しても図(a)と同様の結果となった。いずれも 20℃養生の強度が最も大きい、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(b)の B40 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 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。また、養生方法別で比較してみると、全ての養生において、N の強度が大きく、高炉スラグ微粉末の温度依存性はセメントと同程度と言える。

3.2 乾燥収縮

配合別の乾燥収縮試験結果を図-4 に示す。図(a), (b), はそれぞれ BFS 置換率 0%(N), 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 28 日で約 400μ となっており、そのひずみは N-TH と約 150μ の差があった。図(b)において、B40-TH が B40-20 のひずみより若干大きい値となった。これら 2 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。また、養生ごとにみると、20℃養生で高炉スラグ微粉末の混和により、乾燥収縮ひずみが低減していることがわかる。また、温度制御養生でも若干低減している。一方で、簡易断熱養生は高炉スラグ微粉末の混和による乾燥収縮ひずみの差が見られないことから、高炉スラグ微粉末の混和により乾燥収縮ひずみが低減されるが、水和熱に

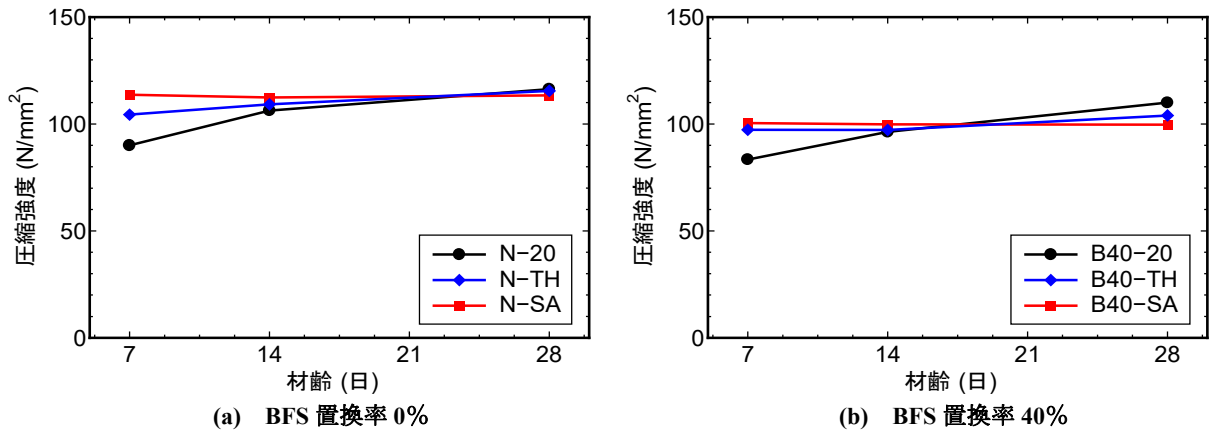


図-3 圧縮強度試験結果

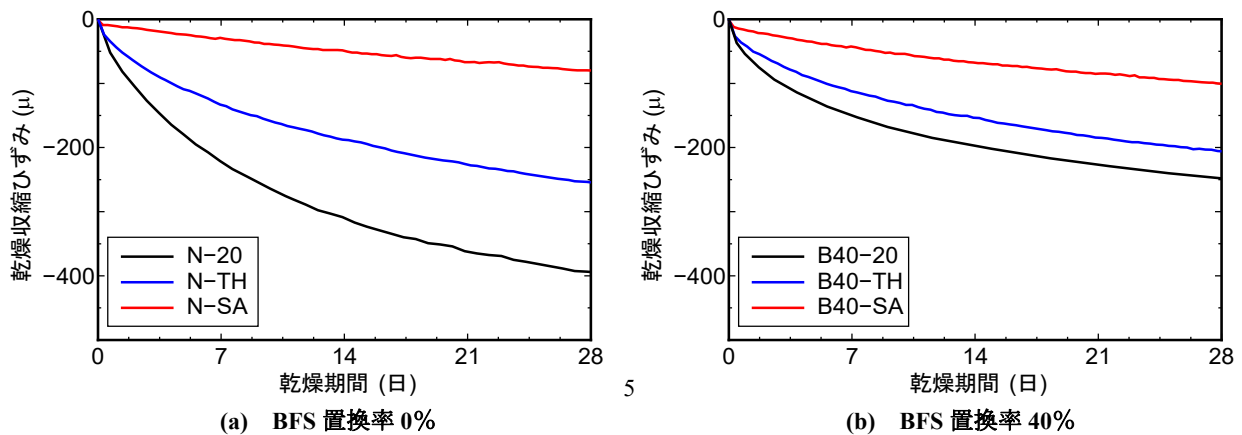


図-4 乾燥収縮試験結果

より高温である場合、その影響を受けないことがわかる。

3.3 質量減少率

図-5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-5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。養生方法別で比較すると、いずれも高炉スラグ微粉末を混和した方の減少率が低いことがわかる。また、図-4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。

3.4 X線回折試験結果

図-6(a)および(b)は、 2θ が 32.2° から 32.5° の間にある C_2S および C_3S のピークの積分強度の和を材齢0日(未反応の粉体)で除したものである。また、図-7(a)および(b)

は、 2θ が 18.0° の $Ca(OH)_2$ のピークの積分強度を示している。図-6より、材齢7日において、SAのセメント化合物量が最も少なく、セメントの水和反応が進んでいることがわかる。このことは、強度増加および収縮低減につながっているものと考えられる。材齢28日においては、置換率40%の $20^\circ C$ 養生での減少量が大きく、水和反応が推進していることがわかる。圧縮強度と比較をしても $20^\circ C$ 養生で強度が大きくなっている。また、図-7より、材齢7日において、高温であるほど $Ca(OH)_2$ 量が少なくなっている。Nにおいては、シリカフェームによるポズラン反応が高温であるほど活発であり、B40では、シリカフェームと高炉スラグ微粉末によるポズラン反応により $Ca(OH)_2$ 量が減少したものと考ええる。また、Nの材齢28日での $Ca(OH)_2$ の減少はシリカフェームのポズラン反応が継続したためと考えられる。

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、その結果明らかとなったことを次に示す。

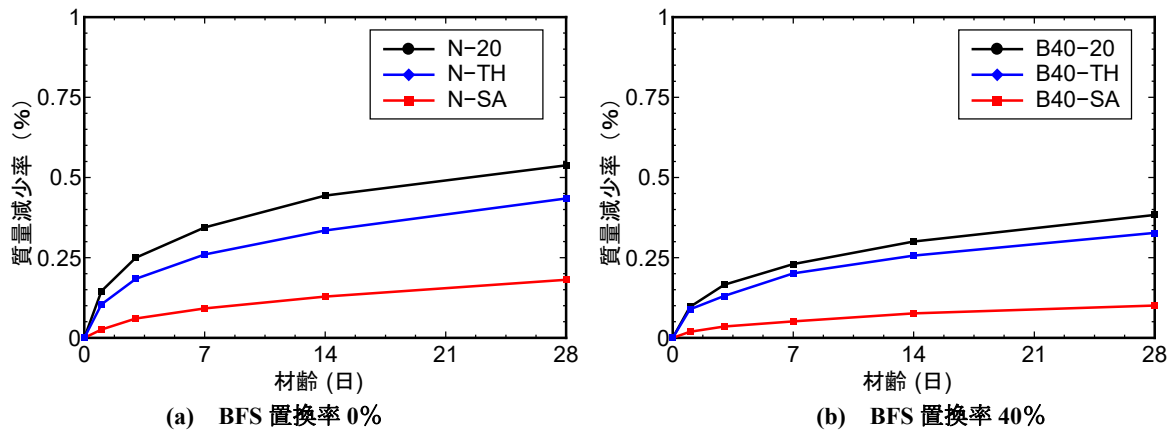


図-5 質量減少率

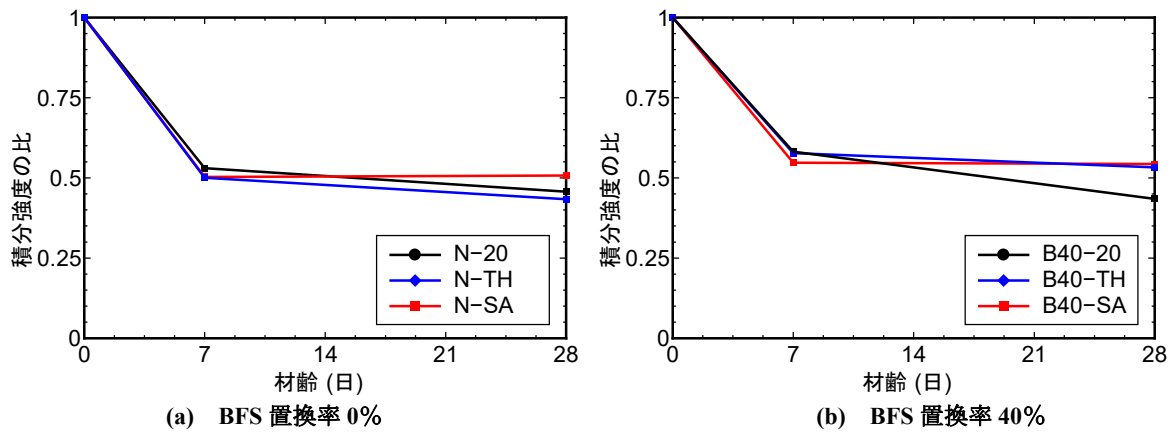


図-6 C_2S+C_3S の積分強度の比

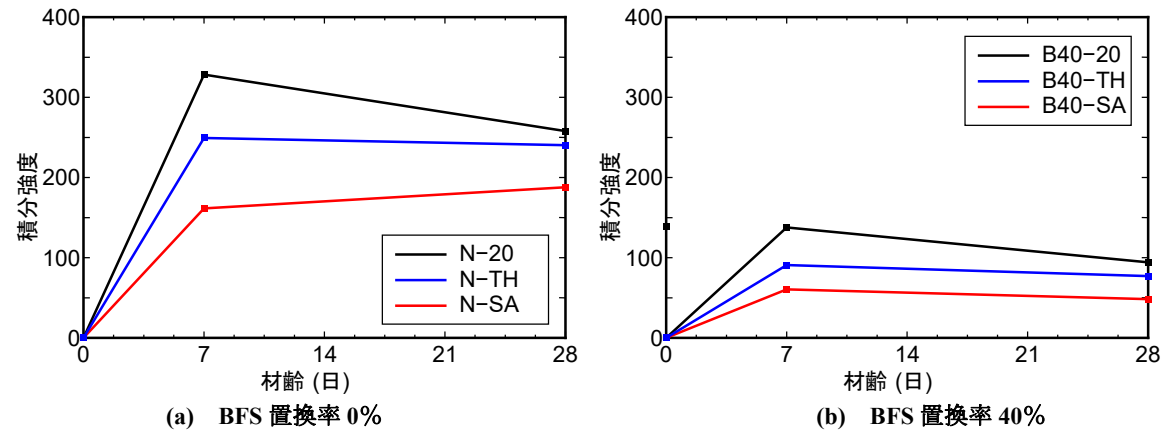


図-7 $Ca(OH)_2$ の積分強度

- 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。

- 5) 水和発熱により、材齢初期では高温であるほど水和反

参考文献

- 1) 経済産業省：混合セメントの普及拡大方策，2016