

論文 高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの強度・乾燥収縮特性に及ぼす水和発熱の影響

尾久 智基*1・菅田 紀之*2・山田 浩貴*1・岡田 雄樹*1

要旨：高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの強度および乾燥収縮に及ぼす水和発熱の影響を検討するために、水結合材比を 30%とする配合に対して、高炉スラグ微粉末の置換率を 0%, 20%, 40%の 3 水準、養生方法を 20℃養生、簡易断熱養生、温度制御養生の 3 水準の組み合わせでコンクリートを製造し圧縮強度試験、乾燥収縮試験および X 線回折試験を行った。その結果、初期養生時の温度が高温であるほど材齢 14 日までの圧縮強度が大きくなること、BFS 置換率が高いほど乾燥収縮が小さくなること、初期養生時の温度が高温であるほど乾燥収縮が小さくなることを明らかにした。

キーワード：高炉スラグ微粉末、高強度コンクリート、簡易断熱養生、水和発熱、圧縮強度、乾燥収縮

1. はじめに

近年、コンクリート分野において地球環境問題への対応を目的とした産業廃棄物の有効利用が進められており、その成果が各種指針等として示されている^{1),2)}。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」³⁾を実施の 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排出される高炉スラグは年間約 3000 万トンであり、混合セメント用として広く用いられている。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 の排出量を大幅に削減することが可能である。また、高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有しており、長期強度の増進が期待できる他、コンクリートの水和発熱の抑制、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。一方で高炉スラグ微粉末をセメントに置換することでクリンカ量が減少し材齢初期の反応が遅延することによる初期強度の低下や自己収縮が大きくなることが知られている^{4),5)}。また、コンクリートの水和反応は発熱を伴うため、部材厚の大きい構造部材へ適用した場合に初期材齢時においてコンクリートの温度が上昇する。高強度コンクリートではセメント量が多く発熱による温度上昇量がさらに大きくなるため強度や収縮特性等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ボックスおよび温度制御水槽を用いて高炉スラグ微粉末を混和した高強度コンクリートに水和発熱による温度履歴を与え、その影響を検討するために、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、質量変化試験および X 線回折試験を実施した。

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：3.16g/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 ：2.9%
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、高炉スラグ微粉末、さらに材料分離抵抗性を高めるためにシリカフェュームを用いた。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

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学系専攻（学生会員）

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域准教授 博（工）（正会員）

表-2 配合

配合名	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	単位量(kg/m ³)								スランプフロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	SF	BFS	S	G	SP	AF		
N	30	0	165	495	55	0	851	879	6.05	0.0182	69	1.6
B20		20	165	385	55	110	847	875	4.95	0.0149	70	1.2
B40		40	165	275	55	220	843	871	4.68	0.0140	70	0.7

$$B=C+SF+BFS$$

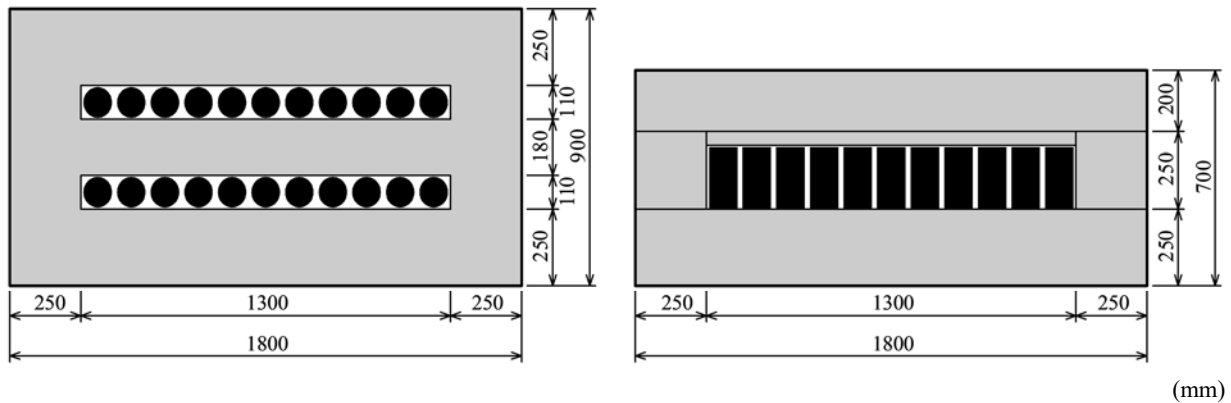


図-1 簡易断熱養生ボックス

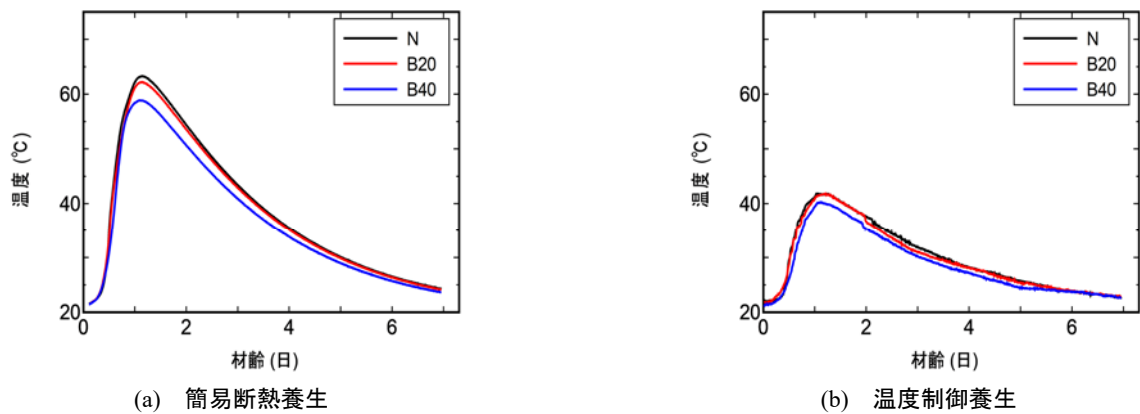


図-2 温度履歴

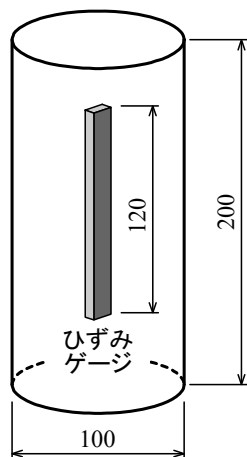


図-3 収縮試験供試体

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, $B=C+SF+BFS$)を30%とし、高炉スラグ微粉末置換率(BFS/B)を0%, 20%, 40%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 減水剤および消泡剤の量を調節し配合を決定した。スランプフローおよび空気量の測定結果は表-2に示すとおりである。なお、高炉スラグ微粉末置換率0%をN, 20%をB20, 40%をB40で表すことにする。

2.3 養生方法

養生方法は20℃養生(20), 簡易断熱養生(SA), 温度制御養生(TH)の3種類である。20℃養生は、強度試験用については材齢24時間まで20℃の環境下で封かん養生し

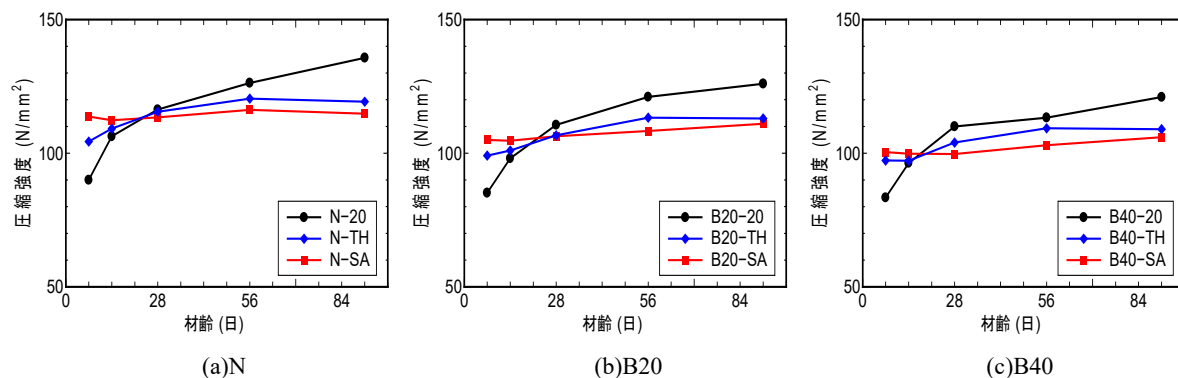


図-4 圧縮強度

たのち脱型し、それ以降は 20℃に制御された水中における養生、乾燥収縮試験用については材齢 7 日まで 20℃の環境下の封かん養生である。簡易断熱養生は図-1 に示す部材厚 1m 程度の部材中心部を模擬できる発泡スチロール製の養生ボックスに供試体を設置し、空間に発砲ビーズを詰めて材齢 7 日まで養生し、脱型後、温度 20℃における水中養生とした。測定された供試体中心部の温度履歴を図-2(a)に示す。温度制御養生は、図-2(a)の簡易断熱養生の温度履歴に対して 20℃からの温度上昇量が 1/2 になるように制御を行った水槽内に封かん状態の供試体を設置し、材齢 7 日まで養生し、脱型後、温度 20℃における水中養生である。図-2 (b)に温度制御養生による供試体の温度履歴を示す。なお養生方法について、20℃養生を-N20、簡易断熱養生を-SA、温度制御養生を-TH で表す。

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、試験材齢は 7, 14, 28, 56, 91 日である。測定は 3 本の供試体で行い、その結果の平均値を圧縮強度とした。なお、供試体の端面処理は研磨機を用いて行った。

2.5 乾燥収縮試験および質量変化試験

乾燥収縮試験は図-3 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。試験は 20℃養生、温度制御養生および簡易断熱養生の 3 種類の条件で、材齢 7 日まで封かん養生したのち供試体を脱型し、脱型後に供試体の上下面にアルミテープを貼り付け、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%であり、2 本の供試体で乾燥収縮ひずみを測定した。質量変化試験は乾燥収縮試験と同様の条件で行い、乾燥開始から 0 日、1 日、3 日、7 日、14 日、28 日、91 日に質量を測定し、質量減少率(%)の算出に式(1)を用いた。

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

ここで、 M_0 : 乾燥開始時の質量(g)

M : 各材齢における質量(g)

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、各試験材齢用の保存袋に 150g 程度入れ密封した後、コンクリートの温度履歴と同様の履歴を封かん状態で与えた。養生後、アセトンを用いて水和を停止し、45μm 以下に微粉末化したものを試料として X 線回折試験を行った。試験は粉末 X 線回折法により行い、測定条件は、使用 X 線 CuKα、管電圧 40kV、管電流 30mA、測定速度 2.0deg/min、測定ステップ 0.02deg である。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 圧縮強度試験結果

図-4 に材齢と圧縮強度の関係を示す。材齢 7 日における強度は、すべての高炉スラグ微粉末(BFS)置換率において、20℃養生、温度制御養生(TH)、簡易断熱養生(SA)の順に大きくなり、養生初期における温度が高いほど強度が大きいことがわかる。材齢 28 日における SA の強度は、材齢 7 日とほぼ等しいか若干減少、TH の強度は若干の増加であり、強度は SA、TH、20℃養生の順に変わっている。材齢 28 日から 91 日までの SA と TH の強度増加は若干であり、初期養生時に水和発熱による高温履歴を受けることにより初期強度は増加するものの、長期的な強度増加が生じなくなっている。これは、初期に高温で養生したことによりセメント粒子のまわりに緻密な水和物が生成され、未水和セメントと未水和水との接触が阻害されたことが、長期強度が増加しなかった原因として考えられる。養生方法別に比較を行うと、いずれの養生方法においてもすべての材齢の強度は、BFS 置換率が高いほど小さくなっている。また、材齢 91 日までにおい

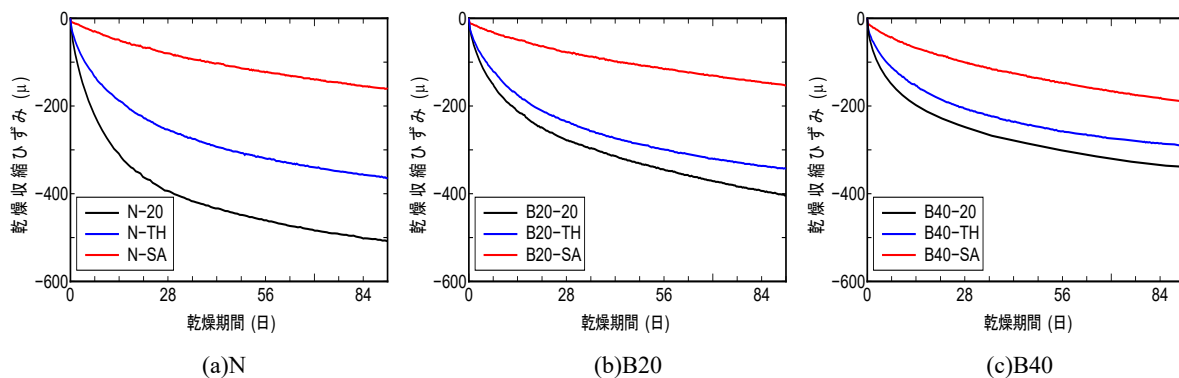


図-5 乾燥収縮

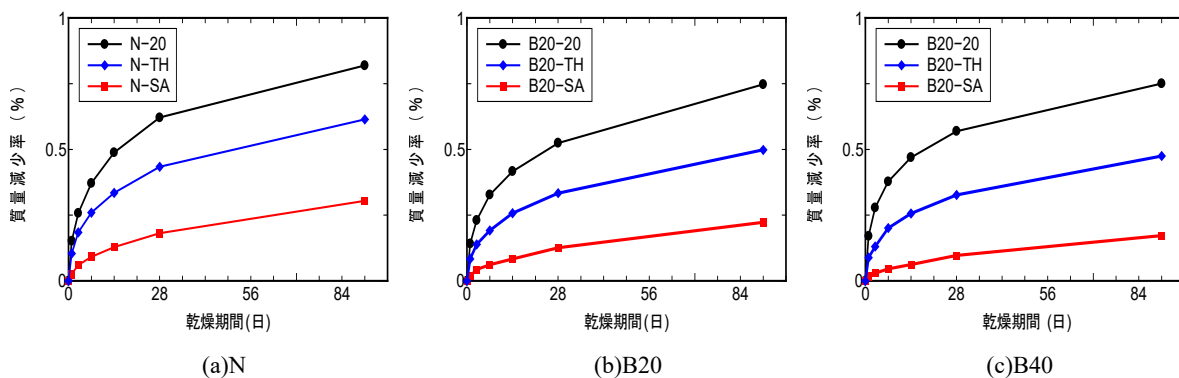


図-6 質量減少率

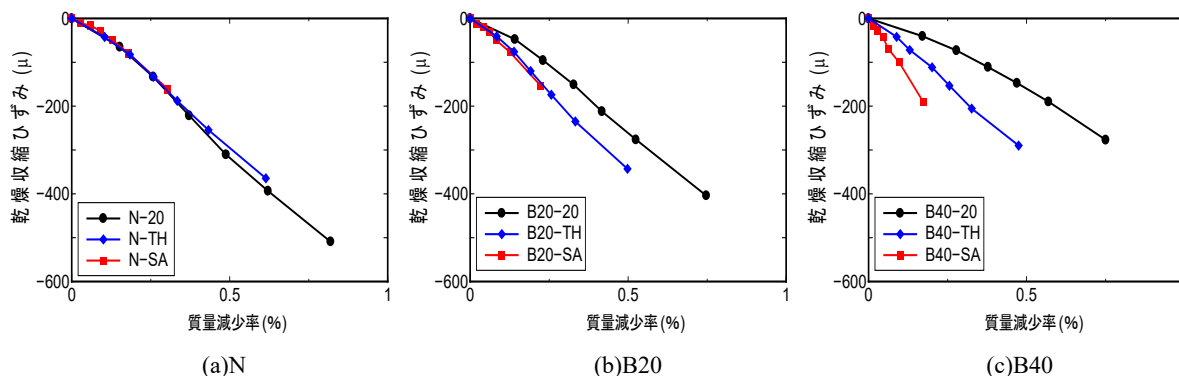


図-7 質量減少率と乾燥収縮の関係

てBFSを用いた場合の強度が無混和の強度に近づくことはなかった。

3.2 乾燥収縮試験結果

図-5 に乾燥期間と乾燥収縮ひずみの関係を示す。すべての高炉スラグ微粉末(BFS)置換率において、簡易断熱養生(SA)、温度制御養生(TH)、20℃養生の順に乾燥収縮が増大していることがわかる。乾燥収縮には環境条件の他、コンクリート内部の未水和水、空隙構造、ペーストの剛性などが影響する。乾燥収縮の低減は、材齢7日の強度増加から推定される水和反応の促進による未水和水の減少およびペースト剛性の増加による影響が大きいと考えられる。また、20℃養生ではBFS置換率が高いほど

乾燥収縮が低減されていることがわかる。初期養生時の温度が高温であると、BFS置換率による乾燥収縮の差は小さくなりSAではほぼ等しくなっていることがわかる。

図-6 に乾燥による質量減少率の結果を示す。すべての高炉スラグ微粉末(BFS)置換率において、初期養生時の温度が高温であるほど質量減少率が小さくなっていることがわかる。材齢7日の強度増加から推定される未水和水の減少および空隙構造の緻密化によるものと考えられる。

図-7 に質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。同一の質量減少率における比較において、乾燥収縮の大小は空隙構造およびペーストの剛性の影響を受けた結果と考えて考察する。BFS置換率0%(N)では同一減少率に

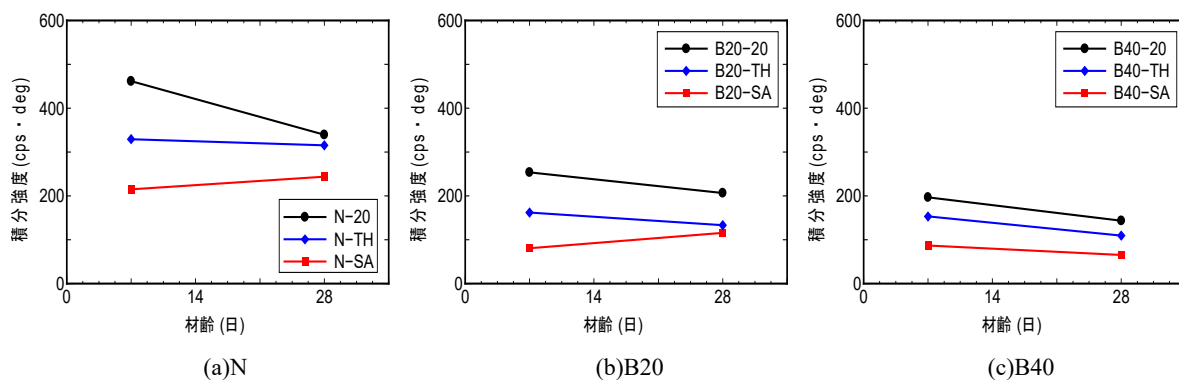


図-8 Ca(OH)_2 の積分強度

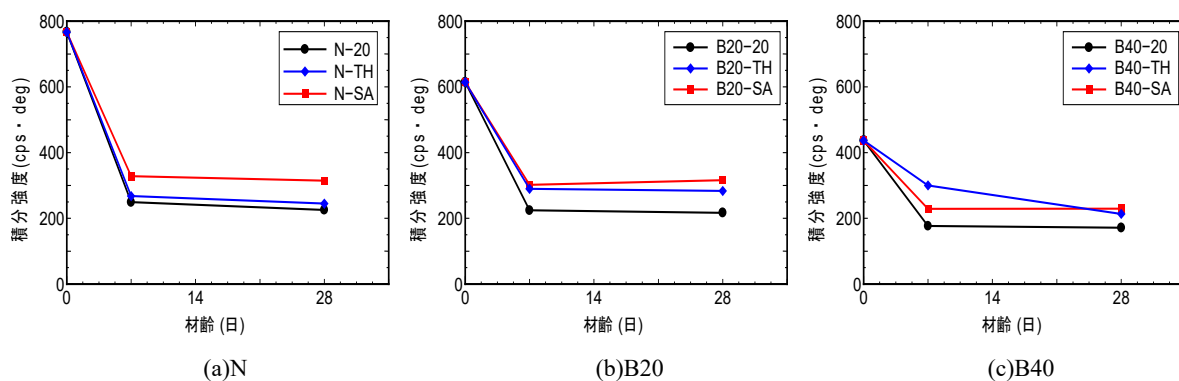


図-9 C_3S の積分強度

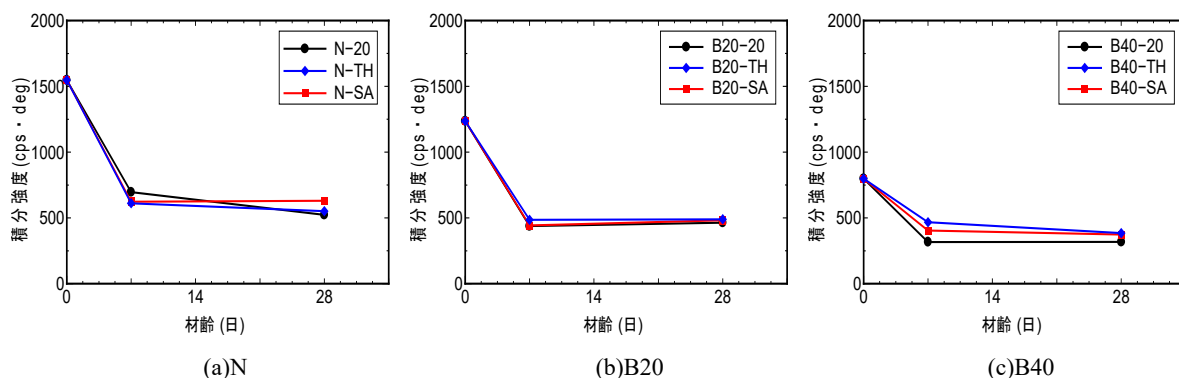


図-10 $\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}$ の積分強度

において乾燥収縮は同程度、BFS 置換率 20%(B20)および BFS 置換率 40%(B40)においては初期養生時の温度が高温であるほど乾燥収縮が大きくなっている。水和促進の影響によるペースト剛性の増加の影響よりも、空隙構造の緻密化による毛細管張力の増加の影響が強く現れて、このような結果になったものと考えられる。

3.3 X線回折試験結果

図-8 に、 $2\theta=18^\circ$ における Ca(OH)_2 の回折ピークの積分強度、図-9 に $2\theta=29.4^\circ$ における C_3S の回折ピークの積分強度、図-10 に $2\theta=32.1^\circ\sim 32.6^\circ$ における C_3S と C_2S の回折ピークの積分強度の和を示す。なお、いくつかのケースで強熱減量を求め、その値は約 9%から 11%であり大きな差がなかったため、結合水量による補正は行っ

ていない。また、 $2\theta=29.4^\circ$ および $2\theta=32.1^\circ\sim 32.6^\circ$ の区間には水和物によるブロードなハローパターンを示すが、その成分については 2 次放物線近似を行い、バックグラウンド成分として処理を行った。

図-8 では、すべての高炉スラグ微粉末(BFS)置換率において、初期養生時の温度が高温であるほど Ca(OH)_2 の積分強度が小さくなっている。また、材齢 7 日から 28 日における Ca(OH)_2 の減少量は、 20°C 養生に対して初期養生時の温度が高温であるほど少なくなっており、BFS 置換率 0%(N)および BFS 置換率 20%(B20)の簡易断熱養生(SA)では増加している。

図-9 において、材齢 0 日から 7 日までの C_3S の積分強度の減少量は、初期養生時の温度が高温であるほど少

なくなる傾向を示している。BFS 置換率 40%(B40)の温度制御養生(TH)を除くと、材齢 7 日から 28 日までの積分強度の変化量は小さい。また材齢 0 日から 28 日までの減少率は、BFS 置換率が高いほど小さくなり、同程度の積分強度になっている。

図-10 より、 C_3S と C_2S を合わせた積分強度は N の材齢 7 日において、TH および SA で小さくなっている。しかしながら、材齢 7 日から 28 日における減少量は、初期養生時の温度が高温であるほどあるほど小さく、材齢 28 日での積分強度は大きくなっている。B20 および B40 では、初期養生時の温度が高温であるほど積分強度が大きくなっている。以上の積分強度の結果より、N では材齢 7 日における C_3S の積分強度の 0 日からの減少量が、初期養生時の温度が高温であるほど小さいことから C_3S の反応が少なくなること、一方で C_3S と C_2S を合わせた積分強度の減少量が大きいということから C_2S の反応が促進されたといえる。また、材齢 7 日における $Ca(OH)_2$ の積分強度は、初期養生時の温度が高温であるほど小さいことから、 $Ca(OH)_2$ を消費するシリカフュームのポズラン反応が促進されたといえる。同様にして材齢 7 日以降の考察を行うと、20℃養生においてセメント化合物とシリカフュームの反応が進んでいるのに対して、初期養生時の温度が高温であるほど反応が停滞しているといえる。これが、初期養生時の温度が高温であるほど初期強度が増大していることと、その後の強度増加の停滞に結びついているといえる。B20 および B40 では初期養生時の温度が高温であるほど、材齢 7 日までのセメント化合物の反応が少なくなるものの、 $Ca(OH)_2$ を消費するシリカフュームおよび BFS 両方の反応が促進される。材齢 7 日以降については、B20 では 20℃養生および温度制御養生においてシリカフュームおよび BFS の反応が進行しているのに対して、簡易断熱養生においてその反応は停滞しているといえる。B40 ではいずれの養生においてもシリカフュームおよび BFS の反応が進んでいるといえる。以上のようなことが、B20 および B40 の初期養生時の温度が高温であるほど、初期強度が増大していることと、その後の強度増加の停滞に結びついているといえる。

4. まとめ

本研究では、構造部材内部を模擬した簡易断熱養生ボックスおよび温度制御水槽を用いて高炉スラグ微粉末を

混和した高強度コンクリートに温度履歴を与え、強度および収縮特性に及ぼす温度履歴および高炉スラグ微粉末置換の影響を明らかにするために、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、X 線回折試験を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 初期養生時の温度が高温であるほど、初期の圧縮強度が大きくなるが、長期強度は 20℃養生よりも小さくなる。いずれの養生方法においても、高炉スラグ微粉末の置換による強度低下の長期材齢における回復は少ない。
- 2) 初期養生時の温度が高温であるほど、乾燥収縮は低減される。高炉スラグ微粉末置換により乾燥収縮は低減されるが、初期養生時の温度が高温であるほど低減量は小さい。
- 3) 高炉スラグ微粉末無混和の場合、初期養生時の温度が高温であるほど、材齢 7 日まで C_2S およびシリカフュームの反応が促進されるが、材齢 7 日以降の反応は停滞する。
- 4) 高炉スラグ微粉末混和の場合、初期養生時の温度が高温であるほど、材齢 7 日までセメントの反応は促進されずシリカフュームおよび高炉スラグ微粉末の反応が促進されるが、高炉スラグ微粉末置換率が 20%では材齢 7 日以降の反応は停滞する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー 第 63 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（案），土木学会，1988
- 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) 経済産業省：混合セメントの普及拡大方策，2016
- 4) 三浦智哉，田澤榮一，宮澤伸吾，保利彰宏：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
- 5) 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，コンクリート年次論文報告集，Vol.38, No.1, pp.183-188, 2016