

論文 高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と SO₃ の影響

二戸 信和*¹・大澤 友宏*²・鯉淵 清*³・宮澤 伸吾*⁴

要旨: 高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度, スラグ置換率と SO₃ の影響について高炉セメントの JIS 規格の範囲外まで検討した。また, スラグの粉末度は 1500 から 4000cm²/g 程度まで SO₃ は 1% から最大 9% まで検討した。高炉スラグの置換率と高炉セメントの SO₃ が同一の場合に高炉セメントの高炉スラグ粉末度が小さいほどコンクリートの発熱および収縮が抑えられた。高炉スラグの粉末度と置換率が同一の場合に SO₃ が高いほど収縮が抑制された。しかし, スラグの粉末度 1500cm²/g 程度で SO₃ が 4% 以上では, コンクリートが膨張傾向を示す場合があり, 適正なスラグ粉末度と SO₃ の範囲がある。

キーワード: 高炉セメント, 高炉スラグ粉末度, SO₃, 断熱温度上昇, 自己収縮

1. はじめに

近年, 高炉セメントは, 高炉スラグの微粉末化, 高炉セメント中のスラグ混合量の低減によるセメントの初期強度の増進が功を奏し, 普通ポルトランドセメントと置き換わって利用されてきた。その結果, 従来の高炉セメントとは異なり, 初期強度の増進により, 水和発熱が大きくなった。高炉セメントを用いたコンクリートは普通ポルトランドセメントを用いた場合より発熱量が大きくなる場合があり, また比表面積の高い高炉スラグを用いた場合は自己収縮が大きくなり¹⁾, 特にマスコンクリートを用いた場合にその傾向が顕著になるという報告もある²⁾。また, 同じ高炉セメント B 種でも自己収縮特性が異なる事例^{3), 4)}の報告もある。

このような背景から著者らの一部は, 発熱量および自己収縮を抑制した高炉セメントの研究を継続している。これまでの研究により高炉セメント B 種の JIS 規格範囲内で高炉スラグの比表面積を小さくし, 高炉スラグ置換率および SO₃ 量を大きくすると自己収縮および断熱温度上昇量が低減され⁵⁾, 同一圧縮強度で比較しても従来の高炉セメント B 種と比較してひび割れ抵抗性の向上が期待できることを明らかにした⁶⁾。高炉スラグの粒度と化学成分を JIS R 5211 に適合する範囲で調整した高炉セメント B 種のコンクリートの断熱マスブロックを検討した。その結果, 発熱量および自己収縮を抑制され, 温度履歴を受けた状態での初期に膨張ひずみを示すことを明らかとした⁷⁾。

しかし, いずれの検討も高炉セメントの JIS 規格範囲内での検討である。そこで, 本研究では, 粉末度および SO₃ を高炉セメントの JIS 規格に適合しない範囲まで広げた場合に断熱温度上昇と自己収縮に及ぼす粉末度お

よび SO₃ の影響について検討をした。

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

使用した高炉スラグ, セメント, 無水石膏の化学成分を表-1 に示す。高炉スラグは粉末度の異なる 3 種類を使用した。ここで使用した 3 種類の高炉スラグは, 工場の実機で粉砕したものを使用した。無水石膏はタイ産の天然無水石膏の粉砕品を使用した。セメントは市販の普通セメントを使用した。

表-1 の材料を混合して高炉セメントを試製した。試製した高炉セメントの粉末度, 化学成分, スラグ置換率および置換したスラグの水準を表-2 に示す。スラグの粉末度は 1500 から 3900cm²/g 程度のものを使用し, 高炉セメントの SO₃ は 1% から 9% 程度にした。スラグ置換率は 30% から 60% にした。なお, 高炉セメントの JIS 規格は粉末度で 3000cm²/g 以上で SO₃ が 4% 以下のため, 高炉セメントの JIS 規格を満たす水準は No2, 3, 4 のみである。

細骨材は表乾密度 2.59g/cm³ の鬼怒川産川砂, 粗骨材は表乾密度 2.64g/cm³ の葛生産碎石を使用した。AE 減水剤は市販のリグニン系 AE 減水剤を使用した。

2.2 実験方法

コンクリートの配合はすべての水準において W/C=40%, 単位水量 170kg/m³, s/a=43.1% で統一した。コンクリートのフレッシュ性状は, スランプ 12±2.0cm および空気量 4.5±1.0% で調整した。圧縮強度は標準水中養生で材齢 7 日と 28 日で試験した。

コンクリートの断熱温度上昇試験は, 周囲を厚さ 200mm の発泡スチロールで全面覆われた保温型枠を用い, コンクリート供試体(200×200×200mm)中心部の温

*1 (株) デイ・シイ 事業開発部 工修 (正会員)

*2 (株) デイ・シイ セメント事業本部営業部営業技術課 工修 (正会員)

*3 (株) デイ・シイ 執行役員 技術情報室長 (正会員)

*4 足利工業大学 工学部都市環境工学科 工博 (正会員)

表-1 母体材料の化学成分

	ブレン (cm^2/g)	90 μm 残 分 (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)
スラグ1	3870	0.3	33.29	15.07	1.18	41.39	5.85	-
スラグ2	2800	3.1	32.68	14.80	3.03	40.71	5.75	-
スラグ3	1530	9.2	31.96	14.48	5.23	39.90	5.64	-
無水石膏	4320	0.2	0.73	0.21	0.08	41.12	0.07	57.05
普通セメント	3200	0.6	20.62	5.21	3.16	63.83	2.30	2.09

表-2 高炉セメントの化学成分

No	ブレン (cm^2/g)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	スラグ量 (%)	母体スラグ
1	3600	25.84	9.86	2.00	51.34	3.95	4.12	50	1
2	3000	26.65	10.01	3.10	52.27	4.03	1.05	50	2
3	3030	26.13	9.88	3.02	51.72	3.97	2.53	50	2
4	3090	24.57	8.83	2.97	53.58	3.58	3.67	40	2
5	3060	25.54	9.72	2.92	51.00	3.90	4.12	50	2
6	3040	26.52	10.63	2.88	48.44	4.22	4.52	60	2
7	2460	23.75	9.50	3.82	47.27	3.78	9.41	60	3
8	2510	24.73	9.13	3.94	51.93	3.69	3.90	50	3
9	2740	23.55	7.78	3.70	56.67	3.22	2.32	30	3
10	2720	23.83	7.91	3.75	56.66	3.27	1.81	30	3

度上昇を熱電対で測定した。この温度の測定値を基に保温型枠を用いた場合の熱伝達率を $0.47\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$ として文献⁸⁾の方法により断熱温度上昇量の推定を行った。熱伝達率の値は、本研究と同じ保温型枠を使用した過去の研究⁵⁾において、断熱温度上昇試験機(空気循環式)を用いた測定値と一致するように決定されたものである。以上のような方法で求めた各配合の断熱温度上昇量を式(1)で近似させた。

$$T=K(1-\exp(-\alpha t)) \quad (1)$$

ここに、T：断熱温度上昇量 (°C)

K：終局断熱温度上昇量 (°C)

t：材齢 (日)

α ：温度上昇速度の定数

コンクリートの自己収縮試験は、JCI 自己収縮研究委員会の「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」(JCI-1996)により凝結始発から材齢 28 日まで測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 スラグ粉末度の及ぼす影響

図-1、図-2、図-3 にスラグ量 50%、 SO_3 量が 4% における粉末度の異なる水準 No1(母体スラグ粉末度 $3870\text{cm}^2/\text{g}$)、水準 No5(母体スラグ粉末度 $2800\text{cm}^2/\text{g}$)、水準 No8(母体スラグ粉末度 $1530\text{cm}^2/\text{g}$)の圧縮強度、断熱温度上昇、自己収縮の結果をそれぞれ示す。

図-1 より粉末度の低下により圧縮強度が低下する。スラグ粉末度が 2800 から $1530\text{cm}^2/\text{g}$ に低下した場合の圧縮強度は材齢 28 日で $8\text{N}/\text{mm}^2$ 程度低下し、3870 から

$2800\text{cm}^2/\text{g}$ に低下した場合の圧縮強度は $2\text{N}/\text{mm}^2$ 程度低下した。スラグが低粉末度になるほど圧縮強度の低下は著しい。

図-2 によりスラグの粉末度の増加により断熱温度上昇量も低下傾向にある。スラグ粉末度が 2800 から $1530\text{cm}^2/\text{g}$ に低下した場合の終局断熱温度上昇量は 3°C 程度低下し、3870 から $2800\text{cm}^2/\text{g}$ に低下した場合では 3°C 程度低下した。スラグの粉末度が $1000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の低下で断熱温度上昇量が 3°C 程度低下した。また、温度上昇速度の定数は、スラグ粉末度が $1530\text{cm}^2/\text{g}$ のときのみ 0.50 から 0.28 に低下した。

図-3 より、スラグ粉末度が $3870\text{cm}^2/\text{g}$ の水準 No1 では、材齢 1 日まで膨脹してその後収縮する。スラグ粉末度が $2800\text{cm}^2/\text{g}$ の水準 No5、スラグ粉末度が $1530\text{cm}^2/\text{g}$ の水準 No8 では、材齢 3 日まで膨脹してその後収縮する。この膨脹は、無水石膏の添加によるエトリンタイトの生成量が増加したことによるものと考えられる⁹⁾。材齢 28 日における自己収縮は、水準 No1、5、8 でそれぞれ -131×10^{-6} 、 -75×10^{-6} 、 -12×10^{-6} となり、スラグの粉末度の低下により自己収縮量が低下した。ただし、スラグ粉末度が $1530\text{cm}^2/\text{g}$ のときは、材齢 14 日の自己収縮量が -24×10^{-6} であり、材齢 14 日から材齢 28 日で 12×10^{-6} と自己収縮量が増加し膨脹傾向を示した。

以上の結果により、スラグの粉末度の低下により圧縮強度、断熱温度上昇量および自己収縮量が低下した。スラグの粉末度の低下によりスラグの反応が抑制されたことによるものと考えられる。また、スラグ粉末度が $1530\text{cm}^2/\text{g}$ のときの材齢 14 日以降の膨脹の理由は、無水

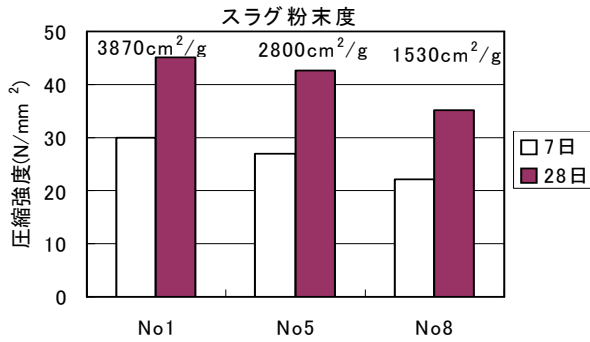


図-1 圧縮強度(スラグ粉末度の影響)

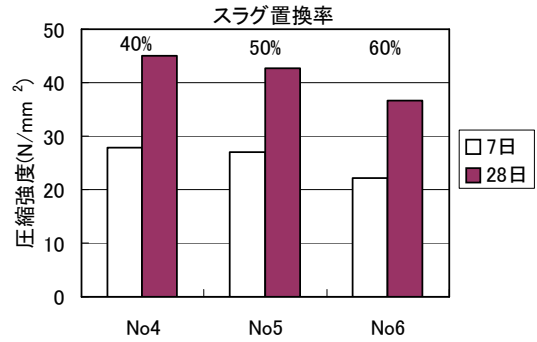


図-4 圧縮強度(スラグ置換率の影響)

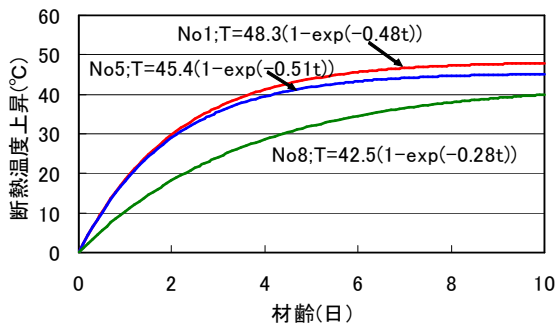


図-2 断熱温度上昇(スラグ粉末度の影響)

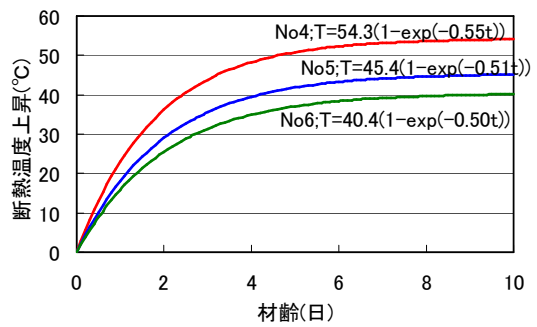


図-5 断熱温度上昇(スラグ置換率の影響)

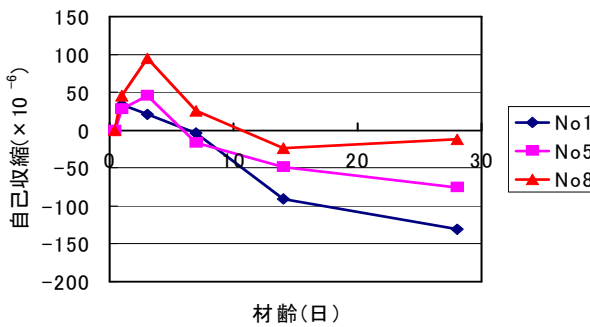


図-3 自己収縮(スラグ粉末度の影響)

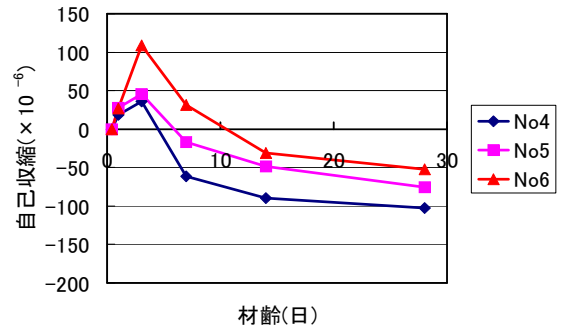


図-6 自己収縮(スラグ置換率の影響)

石膏の存在による粒度の大きい高炉スラグの水和反応によるものと考えられる。粒度の大きい高炉スラグの水和反応についての詳細な検討が今後の課題である。

3.2 スラグ置換率の及ぼす影響

図-4, 図-5, 図-6 にスラグ粉末度 2800cm²/g, SO₃ が約 4%におけるスラグ置換率の異なる水準 No4(スラグ置換率 40%), 水準 No5(スラグ置換率 50%), 水準 6(スラグ置換率 60%)の圧縮強度, 断熱温度上昇, 自己収縮の結果をそれぞれ示す。

図-4 より置換率の増加により圧縮強度が低下する。スラグ置換率が 40%から 50%に増加した場合の圧縮強度は材齢 28 日で 2N/mm²程度低下し, 50%から 60%に増加した場合の圧縮強度は 6N/mm²程度低下した。スラグ置換率が 50%から 60%に増加した場合の圧縮強度の低下は著しい。

図-5 によりスラグの置換率の増加により断熱温度上昇量も低下傾向にある。スラグ置換率が 40%から 50%に増加した場合の終局断熱温度上昇量は 9℃程度低下し, スラグ置換率が 50%から 60%に増加した場合では 5℃程度低下した。スラグ置換率が 40%から 50%に増加した場合の断熱温度上昇量の低下は著しい。また, 温度上昇速度の定数は 0.50~0.55 の範囲であった。

図-6 より, 材齢 3 日までの自己収縮がいずれの水準において膨脹をした。材齢 28 日における自己収縮は, 水準 No4, 5, 6 でそれぞれ -102×10⁻⁶, -75×10⁻⁶, -52×10⁻⁶ となり, スラグの置換率の多いほど自己収縮量が低下した。なお, スラグ置換率の増加とともに SO₃ 量が 3.67, 4.12, 4.52%と増加していることも自己収縮の低下に寄与していると考えられる。

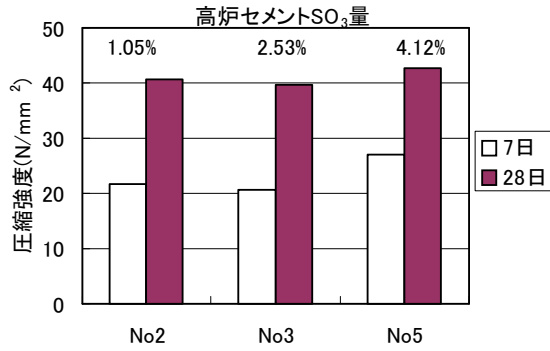


図-7 圧縮強度 (SO₃の影響)

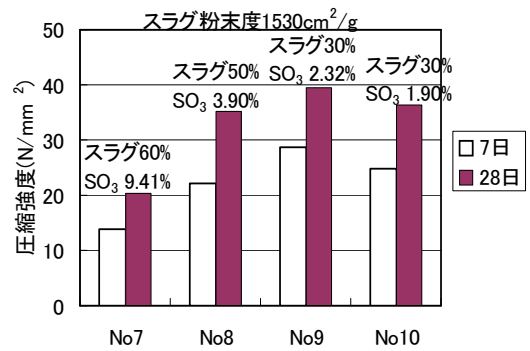


図-10 圧縮強度 (粉末度 1530cm²/g)

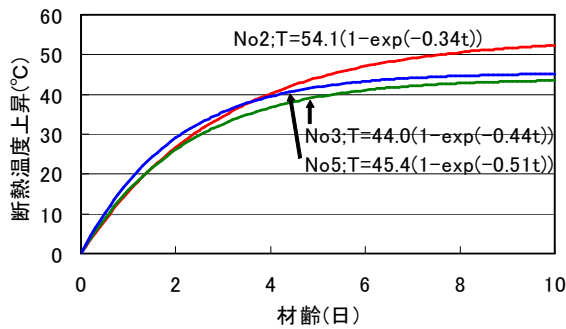


図-8 断熱温度上昇 (SO₃の影響)

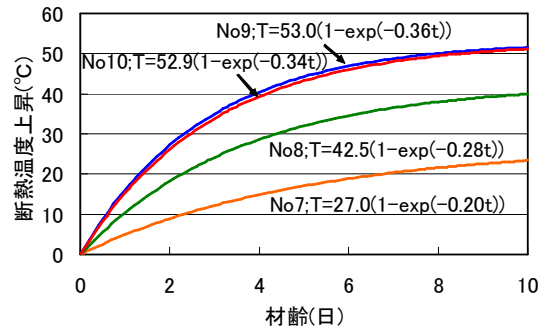


図-11 断熱温度上昇 (粉末度 1530cm²/g)

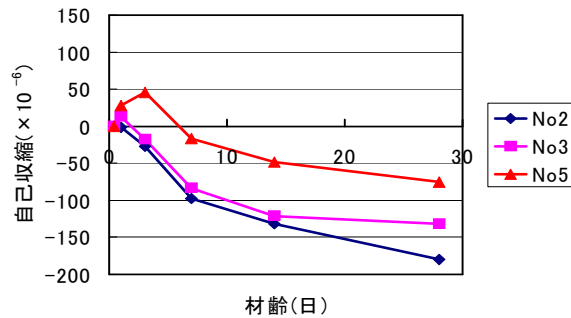


図-9 自己収縮 (SO₃の影響)

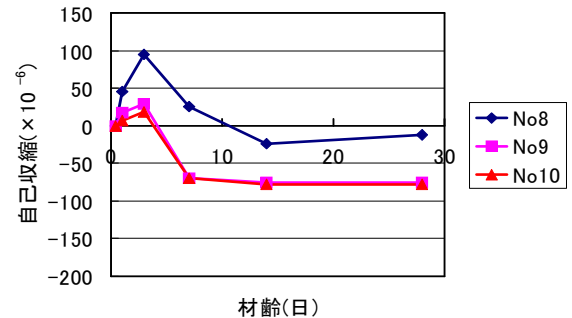


図-12 自己収縮 (粉末度 1530cm²/g)

3.3 高炉セメントの SO₃ 量の及ぼす影響

図-7, 図-8, 図-9 にスラグ粉末度 2800cm²/g, スラグ置換率が 50%における SO₃ の異なる水準 No2(SO₃ 量 1.05%),水準 No3(SO₃ 量 2.53%),水準 No5(SO₃ 量 4.12%)の圧縮強度, 断熱温度上昇, 自己収縮の結果をそれぞれ示す。

図-7より SO₃量が 1.05%から 2.53%までは圧縮強度の変化がないが, 2.53%から 4.12%になると圧縮強度が増加する。とくに, 材齢 7 日では 6N/mm²程度増加し, SO₃量の増加による強度増加の効果が大きい。

図-8により SO₃量が 2.5%以上になると断熱温度上昇量が減少する。また, 温度上昇速度の定数は SO₃量が 1%の水準 No2 のみ 0.34 と小さい値であった。

図-9 より, SO₃量が 4.12%の水準 No5 のみが材齢 3

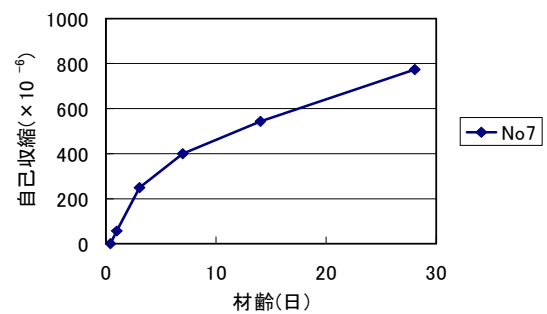


図-13 自己収縮 (粉末度 1530cm²/g)

日まで自己収縮が膨脹を示した。材齢 28 日における自己収縮は, 水準 No2, 3, 5 でそれぞれ -180×10⁻⁶, -132×10⁻⁶, -75×10⁻⁶となり, 高炉セメントの SO₃量の増加により自己収縮量が低下した。

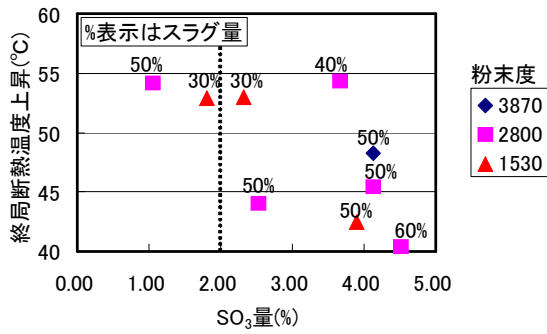


図-14 終局断熱温度上昇量と SO₃量との関係

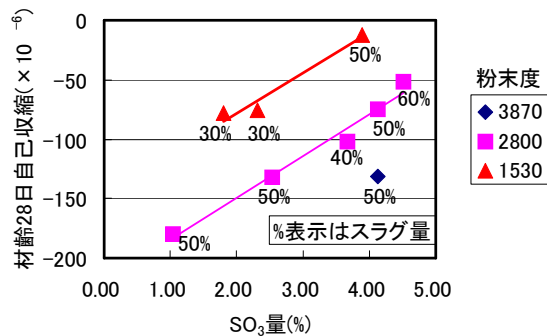


図-15 材齢 28 日自己収縮量と SO₃量との関係

3.4 粉末度 1500cm²/g の高炉スラグを用いた影響

図-10 にスラグの粉末度が 1530cm²/g の水準における圧縮強度の結果を示す。図-10 よりスラグ量が 60% の水準 7 では材齢 28 日でも 20.4N/mm² と低い結果となった。

図-11 にスラグの粉末度が 1530cm²/g の水準における断熱温度上昇の結果を示す。図-11 よりスラグ量が 30% の水準 No9, 10 では断熱温度上昇量は 53℃程度を示し、スラグ量が 50% の水準 No8, スラグ量が 60% の水準 No7 ではそれぞれ 42.5℃, 27.0℃を示した。スラグの粉末度が小さいときにスラグ置換率の増加による断熱温度上昇量の減少の効果が大きい傾向を示す。図-12 にスラグの粉末度が 1530cm²/g の水準における自己収縮の結果を示す。スラグの置換率が大きいほど、また SO₃ 量が多いほど自己収縮量が小さい傾向を示す。図-12 のいずれの水準でも材齢 3 日までの自己収縮が膨脹を示す。とくに、スラグ量 60%, SO₃ 量が 9.4% の水準 No7 では、図-13 に示すとおり材齢の経過とともに膨脹傾向を示した。

粉末度 1500cm²/g 程度の高炉スラグを用いた場合は、SO₃ 量が同一の場合に断熱温度上昇量の減少および自己収縮が抑制され、圧縮強度の低下が著しい。ただし、スラグ量 50%以上、SO₃ 量が 3%以上で自己収縮試験において膨脹傾向を示した。膨脹傾向の抑制のためにスラグ量および SO₃ 量を減少した場合では、断熱温度上昇量が水準 No9, 10 において 53℃程度と他の水準と比較して断熱

温度上昇量の抑制が困難となる。

3.5 各要因の影響度についての検討

図-14 は終局断熱温度上昇量と SO₃ 量との関係を示す。同一のスラグ量において、終局断熱温度上昇量は SO₃ 量が 1% から 2% で減少したが 2% から 4% では変わらない傾向を示した。この結果は、宮澤ら⁵⁾の結果と一致した。一方、スラグの粉末度が 1000cm²/g の増加で終局断熱温度上昇量が 3℃上昇した。したがって、終局断熱温度上昇は SO₃ 量が 2% 以上においてスラグの粉末度の影響が大きい。同一のスラグ粉末度における終局断熱温度上昇量は、スラグ量が 10% の増加で 5~10℃の低下となる。したがって、終局断熱温度上昇量はスラグ量による影響が最も大きい。図-15 は材齢 28 日自己収縮と SO₃ 量との関係を示す。SO₃ 量が増加するほど自己収縮が小さく、同一の SO₃ 量ではスラグ粉末度が小さいほど自己収縮が小さい。

今回の実験範囲において、材齢 7 日および 28 日圧縮強度、終局断熱温度上昇と材齢 28 日の自己収縮(収縮をマイナスとする)を SO₃ 量、スラグ量およびスラグ粉末度をパラメーターにして重回帰分析を行った。ただし、終局断熱温度上昇量については、前述よりスラグ量およびスラグ粉末度をパラメーターにして検討した。材齢 7 日、28 日圧縮強度、終局断熱温度上昇および材齢 28 日の自己収縮の重回帰分析による回帰式をそれぞれ式(2)、式(3)、式(4)、式(5)に示す。重相関係数はそれぞれ 0.87, 0.94, 0.96, 0.95 である。

$$Y_1 = 0.26X_1 - 0.41X_2 + 0.0043X_3 + 31.9 \quad (2)$$

$$Y_2 = -1.1X_1 - 0.27X_2 + 0.0064X_3 + 39.7 \quad (3)$$

$$Y_3 = -0.75X_2 + 0.0050X_3 - 68.6 \quad (4)$$

$$Y_4 = 99.8X_1 + 0.93X_2 - 0.12X_3 - 146 \quad (5)$$

ここに、X₁: SO₃ 量(%)

X₂: スラグ量(%)

X₃: スラグ粉末度 (cm²/g)

Y₁: 材齢 7 日強度 (N/mm²)

Y₂: 材齢 28 日強度 (N/mm²)

Y₃: 終局断熱温度上昇量 (°C)

Y₄: 材齢 28 日自己収縮 (×10⁻⁶)

圧縮強度に対してはスラグ粉末度およびスラグ量の影響が大きく、スラグ粉末度 1000cm²/g の増加とスラグ量 25% の減少が 28 日圧縮強度の増加にほぼ同等の効果がある。終局断熱温度上昇量に対してはスラグ量とスラグ粉末度の影響が大きく、スラグ粉末度 1000cm²/g の減少とスラグ量 7% の増加が終局断熱温度上昇量の減少にほぼ同等の効果がある。自己収縮に対してはスラグ粉末度と SO₃ 量の影響が大きく、粉末度 1000cm²/g の減少と SO₃ 量の 1.2% 増加が材齢 28 日の自己収縮低減にほぼ同等の効果がある。

今回の試験では同一の W/C および s/a で行った。材齢 28 日においてコンクリートの圧縮強度を合わせ W/C を変化させた場合での高炉スラグの粉末度 3000cm²/g, スラグ量 60%の断熱温度上昇量は従来の高炉セメント B 種より 9℃低下し, 自己収縮が抑制された報告¹⁰⁾がある。

無水石膏の効果により初期強度の増進, 自己収縮の低減, 断熱温度上昇量の低減となった。断熱温度上昇量の低減は, スラグの反応の抑制によると考えられるが, 今後詳細な検討が必要である。

4. まとめ

本研究では, 粉末度および SO₃ 量を高炉セメントの JIS 規格に適合しない範囲まで広げた場合に高炉セメントの断熱温度上昇と自己収縮に及ぼす粉末度および SO₃ 量の影響について検討をした。結果を以下に示す。

- (1) 圧縮強度は, スラグ粉末度の低下, スラグ置換率の増加に伴い低下した。SO₃ 量の増加によって初期強度が増加した。
- (2) 断熱温度上昇量は, スラグ粉末度の低下, スラグの置換率の増加により低下した。SO₃ 量は 1%から 2%の範囲では増加に伴い低下したが、2%以上では関係がなかった。
- (3) 自己収縮は, スラグ粉末度の低下, SO₃ 量の増加により低下した。
- (4) 粉末度 1500cm²/g 程度の高炉スラグを用いた場合の自己収縮は, スラグ量 60%, SO₃ を 9%とした場合では材齢 1 日から膨張傾向を示した。

参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤伸吾:セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集,

No.502/V-24, pp.43-52, 1994.9

- 2) 大友健ほか:各種セメントを使用したコンクリートの異なる温度条件下での自己収縮特性, 第 57 回セメント技術大会講演要旨, pp.176-177, 2003.5
- 3) 久保征則ほか:高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究, コンクリート工学年次論集, Vol.19, No.1, pp.763-768, 1997.7
- 4) 大友健, 宮原茂禎, 岡本修一:高炉セメント B 種を用いたコンクリートのマス養生温度履歴下での自己収縮特性, 第 58 回セメント技術大会講演要旨集, pp.184-185, 2004.5
- 5) 宮澤伸吾ほか:高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.154-159, 2005.2
- 6) 宮澤伸吾ほか:低発熱・低収縮型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005.7
- 7) 二戸信和ほか:スラグ粒度と化学成分の異なる高炉セメント B 種を用いたコンクリートの特性, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.231-238, 2006.2
- 8) 葛西康幸ほか:簡易な断熱試験による高強度コンクリートの断熱温度上昇特性に関する検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 第 5 部門, pp.1167-1168, 2002.9
- 9) 井上和久, 田中敏嗣, 下山善秀:高炉スラグ系混合セメントの初期水和に及ぼす石こうの影響, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.74-79, 1992.12
- 10) 菅野智治ほか:トータルな性能を評価したマスコンクリート用高炉セメントの検討, 第 61 回セメント技術大会講演要旨, pp.50-51, 2007.5