

# 論文 高炉スラグ微粉末を高含有した結合材の SO<sub>3</sub> 量がマスコンクリート温度応力解析に用いる諸係数に及ぼす影響

辻 大二郎\*1・小島 正朗\*2・Di QIAO\*3

**要旨:**本研究では、高炉セメント C 種相当とした高炉スラグ微粉末を高含有した結合材中の三酸化硫黄量(SO<sub>3</sub>量)がマスコンクリートの温度応力解析に必要な圧縮強度発現、ヤング係数、熱膨張係数および自己膨張収縮ひずみなどの諸係数に及ぼす影響について市販セメントとの比較により実験的に検討した。その結果、結合材中の SO<sub>3</sub> 量を増加するほど、温度上昇時のひずみ量が膨張側に増大すること、温度下降時の見掛けの熱膨張係数が低減されて高炉セメント B 種よりも小さい傾向を示すことなどが示された。また、SO<sub>3</sub> 量の増加による自己膨張収縮ひずみへの影響を簡易的に評価する定量化モデルの作成を試みた。

**キーワード:** 高炉セメント C 種, 高炉スラグ微粉末, SO<sub>3</sub>, マスコンクリート, 熱膨張係数, 自己ひずみ

## 1. はじめに

コンクリート構造物の CO<sub>2</sub>削減および副産物の利用促進を目標として、鉄鋼製造の副産物である高炉スラグの混和材料の積極利用が検討されている。

著者らは高炉スラグ微粉末使用率が 60~70%程度の高炉セメント C 種相当の高炉スラグ高含有セメント (HS: High Slag) を用いたコンクリートの実用化研究を進めており<sup>2)</sup>, HS 中の三酸化硫黄量 (SO<sub>3</sub>量) を通常 2%程度から 3.5%程度に高めることで強度発現性の向上, 自己収縮・乾燥収縮ひずみの低減により収縮ひび割れ抵抗性の向上が図れることを 20°C 環境の実験で見出している<sup>3)</sup>。

HS コンクリートはクリンカ使用量を 30%程度に抑制していることから発熱量が小さく地下のマスコンクリートに使用する場合の温度ひび割れ抑制に優れることが期待できる。マスコンクリートは 20°C 一定環境とは異なり, 自己の水和発熱による温度上昇・降下の温度変化の影響が, 硬化過程の圧縮強度の発現性, 自己収縮ひずみ, 熱膨張係数などの各種物性・熱特性に影響する。さらに, HS コンクリートの SO<sub>3</sub> 量を増加させた場合は, 硬化初期に膨張をとまなうことで自己膨張ひずみの影響が加わることで, 物性・熱特性の変化の把握がさらに複雑となると予測される。しかし, SO<sub>3</sub> 量増加の影響による自己膨張収縮の効果を取り入れたマスコンクリートの熱特性評価モデルの構築と高度化を目指した研究例<sup>4)5)</sup>は幾つかあるものの, 未だ明らかとなっていない点が多い。

そこで本研究では, HS コンクリートの結合材中の SO<sub>3</sub> 量がマスコンクリートの温度応力解析に必要な諸係数に及ぼす影響について基礎的検討を行った。同一強度 (呼び強度 33) を想定したコンクリート調合での比較実験を実施し, 比較セメント 3 種類 (N, M, BB) および SO<sub>3</sub>

量の異なる 4 種類の高炉スラグ微粉末を高含有させた結合材 (以下, HS 系結合材) を用いたコンクリートを比較することで, マスコンクリートの強度発現性, ヤング係数, 断熱温度上昇量の各係数, 自己収縮を含む見掛けの熱膨張係数, 自己膨張収縮ひずみなどの諸物性を把握することを目的とした。また, HS コンクリートの SO<sub>3</sub> 量の増加による自己膨張収縮ひずみへの影響を簡易的に評価する定量化モデルの作成を試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験因子と水準

実験因子と水準を表-1に, 実験の組み合わせを表-2に示す。結合材の種類は, 市販の普通ポルトランドセメント (N), 中庸熱ポルトランドセメント (M), 高炉セメント B 種 (BB) および高炉セメント C 種相当 (HS 系結合材) の 4 種類とした。ここで, BB は高炉スラグ微粉末 4000 を 40~45 重量%の混合率としたものを用い, HS 系結合材は市販品がないため, 高炉スラグ微粉末と無水石膏を混合して試製した混和材を普通ポルトランド

表-1 実験因子と水準

実験因子	水準数	水準
結合材の種類	4	N, M, BB, HS系結合材
結合材のSO <sub>3</sub> 量	4	0.6%, 2.0%, 3.1%, 4.2%

表-2 実験の組み合わせ

種別	No.	記号	結合材の構成比 (重量比)						結合材のSO <sub>3</sub> 量
			セメント			高炉スラグ微粉末			
			種類	SO <sub>3</sub> 量	重量%	種類	SO <sub>3</sub> 量	重量%	
比較セメント	1	N-2.0	N	2.0%	100	-	-	-	2.0%
	2	M-2.0	M	2.0%	100	-	-	-	2.0%
	3	BB-2.0	BB	2.0%	100	-	-	-	2.0%
HS系結合材	4	HS-0.6	N	2.0%	32	BFS(0.0)	0.0%	68	0.6%
	5	HS-2.0	N	2.0%	32	BFS(2.0)	2.0%	68	2.0%
	6	HS-3.1	N	2.0%	32	BFS(3.6)	3.6%	68	3.1%
	7	HS-4.2	N	2.0%	32	BFS(5.2)	5.2%	68	4.2%

\*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 構造材料グループ 主任研究員 修士 (正会員)

\*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 構造材料グループ グループ長 修士 (正会員)

\*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 構造材料グループ 研究主任 博士 (工学) (正会員)

セメントに混合させて、高炉セメント C 種の範囲（60 を超え 70%以下）として結合材としたものを用いた。実験の組み合わせは、結合材の種類と SO<sub>3</sub> 量の組み合わせであり、比較セメント No.1-3 の N, M, BB の水準は SO<sub>3</sub> 量を通常の汎用値である 2%とし、HS 系結合材の No.4-7 は SO<sub>3</sub> 量を結合材全体でそれぞれ 0.6%, 2.0%, 3.1%, 4.2%とした。高炉セメント規格(JIS R 5211)は高炉セメント C 種の SO<sub>3</sub> 量を 4.5%以下と定めており、本実験はこの範囲を満足する中での水準とした。

コンクリートの使用材料を表-3に示す。使用材料は市中のレディミクストコンクリート工場通常使用されているセメント、細骨材、粗骨材を取り寄せて用いた。混和剤は、比較セメント N, M, BB には N 用の高性能 AE 減水剤 Ad1 を、HS 系結合材には高炉スラグ高含有セメント用に流動保持性を高めた高性能 AE 減水剤 Ad2 を用いた。セメントの品質を表-4に、高炉スラグ微粉末（試製品）の品質を表-5に示す。試製した高炉スラグ微粉末は SO<sub>3</sub> 量をそれぞれ 0%, 2.0%, 3.6%, 5.2%となるようにせっこう添加なしの高炉スラグ微粉末（BFS）と無水石膏（CS）を予め混合して混和材を作成し、この試製した混和材と普通ポルトランドセメントを重量比 68:32 で混合することで、表-6に示す HS 系結合材を高炉セメント C 種相当の範囲で試作した。混合後の結合材の SO<sub>3</sub> 量は 0.6%, 2.0%, 3.1%, 4.2%となっている。

表-3 コンクリートの使用材料

項目	記号	種類	物性値
水	W	水道水	
結合材 (B)	N	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup> 、SO <sub>3</sub> 量=2.0%
	M	中熟ポルトランドセメント	密度3.21g/cm <sup>3</sup> 、SO <sub>3</sub> 量=2.0%
	BB	高炉セメントB種	密度3.04g/cm <sup>3</sup> 、SO <sub>3</sub> 量=2.0%
	HS(0.6)	高炉セメントC種相当結合材試製品 (SO <sub>3</sub> 量=0.6%)	密度2.96g/cm <sup>3</sup>
	HS(2.0)	高炉セメントC種相当結合材試製品 (SO <sub>3</sub> 量=2.0%)	密度2.96g/cm <sup>3</sup>
	HS(3.1)	高炉セメントC種相当結合材試製品 (SO <sub>3</sub> 量=3.1%)	密度2.96g/cm <sup>3</sup>
	HS(4.2)	高炉セメントC種相当結合材試製品 (SO <sub>3</sub> 量=4.2%)	密度2.95g/cm <sup>3</sup>
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末4000 (せっこう添加なし)	密度2.87g/cm <sup>3</sup> 、SO <sub>3</sub> 量=0%
	CS	天然無水石膏	密度2.89g/cm <sup>3</sup> 、SO <sub>3</sub> 量=57.3%
細骨材	S1	山砂 (千葉県市原産) 混合比60%	表乾密度2.57g/cm <sup>3</sup>
	S2	石灰砕砂 (高知県鳥形山産) 混合比40%	表乾密度2.68g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	石灰砕石 (高知県鳥形山産)	表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup>
混和剤	Ad1	高性能AE減水剤標準形 (ポリカルボン酸系化合物)	N, M, BB用
	Ad2	高性能AE減水剤標準形 (ポリカルボン酸系化合物)	HS系結合材用

表-4 セメントの品質

品質	普通 (N)		中熟 (M)		高炉B種 (BB)		
	規格値 (JIS R 5210)	試験成績	規格値 (JIS R 5210)	試験成績	規格値 (JIS R 5211)	試験成績	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	-	3.15	-	3.21	-	3.04	
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	2500以上	3300	2500以上	3360	3000以上	3900	
凝結	水量 (%)	-	27.3	-	27.1	-	28.5
	始発 (h-min)	60min以上	2-15	60min以上	3-02	60min以上	2-54
	終結 (h-min)	10h以下	3-36	10h以下	5-11	10h以下	4-32
安定性 (バット法)	良	良	良	良	良	良	
圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )	3d	12.5以上	33.2	7.5以上	19.3	10.0以上	22.4
	7d	22.5以上	46.5	15.0以上	29.1	17.5以上	36.3
	28d	42.5以上	61.5	32.5以上	57.3	42.5以上	60.5
水和熱 (J/g)	7d	-	337	290以下	257	-	-
	28d	-	390	340以下	314	-	-
化学成分 (%)	MgO	5.0以下	1.23	5.0以下	0.63	6.0以下	3.41
	SO <sub>3</sub>	3.5以下	2.03	3.0以下	1.96	4.0以下	2.04
	強熱減量	5.0以下	2.63	3.0以下	0.61	5.0以下	1.65
	全アルカリ	0.75以下	0.55	0.75以下	0.40	-	-
	塩化物イオン	0.035以下	0.018	0.02以下	0.007	-	0.013

コンクリート調査を表-7に示す。比較用セメント N, M, BB のコンクリート調査は、生コン工場の呼び強度 33 の配合を参考に作成し、W/C はそれぞれ 50.0% (N), 43.5% (M), 48.5% (BB) とした。HS 系結合材のコンクリート調査は事前の試し練りによって呼び強度 33 相当となる水結合材比を 42.5%に定めた。混和剤添加量は N, M が B×0.80%, BB が B×0.40%, HS 系結合材が B×0.70%であった。

2.3 試験項目および練り混ぜ

試験項目を表-8に示す。通常のフレッシュ試験のほか凝結試験を実施した。圧縮強度の養生方法は 3 種類とし、標準養生は材齢 7,28 日で、封かん養生 (20℃) は材齢 1,3,7,14,28,91 日で、簡易断熱養生は材齢 28,56,91 日で供試体を採取した。熱特性は、コンクリートの断熱温度上昇量の測定および簡易断熱養生内の内部温度の測定を実施して、マスコンクリート部材内の温度上昇量の把握を試みた。ひずみ測定は、20℃環境のコンクリートの自己収縮ひずみ測定、およびマスコンクリートの温度変化が与えられた場合の自己膨張収縮ひずみの測定を目的して簡易断熱養生のコンクリート内部のひずみ測定を試みた。自己収縮ひずみ測定 (20℃) の概要を図-1に、簡易

表-5 高炉スラグ微粉末 (試製品) の品質

品質	規格値 高炉スラグ微粉末 4000(JIS A 6206)	試験値 高炉スラグ微粉末 (試製品)				
		BFS(0.0)	BFS(2.0)	BFS(3.6)	BFS(5.2)	
混和材の構成比率 (%)	BFS	-	100	96.5	93.7	90.9
	CS	-	0	3.5	6.3	9.1
密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.80以上	2.90	2.89	2.89	9.1
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)		3500以上5000未満	4410	4460	4370	4350
活性度指数 (%)	7d	55以上	61	68	-	-
	28d	75以上	95	98	-	-
	91d	95以上	108	108	-	-
フロー値 (%)		95以上	101	99	-	-
化学成分 (%)	MgO	10.0以下	6.32	6.08	5.95	5.75
	SO <sub>3</sub>	4.0以下	0	2.01	3.60	5.20
	強熱減量	3.0以下	0.41	0.35	0.46	0.49
	塩化物イオン	0.02以下	0.004	0.004	0.004	0.004
高炉水砕スラグの塩基度 (%)		1.60以上	1.87	1.87	1.87	1.87

表-6 HS系結合材の構成

HS系結合材	混合割合(重量%)				SO <sub>3</sub> 量(%)			
	ベースセメント (C)	混和材(BFS+CS)		結合材	ベースセメント	混和材		
		高炉スラグ微粉末 (試製品)	量				構成	
		BFS	CS					
HS-0.6	N 32	BFS(0.0)	68	68.0	0.0	0.6	2.0	0.0
HS-2.0	N 32	BFS(2.0)	68	65.6	2.3	2.0	2.0	2.0
HS-3.1	N 32	BFS(3.6)	68	63.7	4.3	3.1	2.0	3.6
HS-4.2	N 32	BFS(5.2)	68	61.8	6.2	4.2	2.0	5.2

表-7 コンクリート調査

練り混ぜ日	No.	記号	結合材 SO <sub>3</sub> 量 (%)	調査条件		単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
				W/C (W/B)	s/a	水 W	結合材 種類	量	細骨材 S1 S2	粗骨材 G	混和剤 Ad1 Ad2		
1回目	1	N-2.0	2.0	50.0	45.3	168	N	336	475	330	1004	2.69	-
2回目	2	M-2.0	2.0	43.5	43.6	168	M	386	450	311	1015	3.09	-
3回目	3	BB-2.0	2.0	48.5	44.4	168	BB	346	460	322	1010	1.38	-
4回目	4	HS-0.6	0.6	42.5	43.7	173	HS(0.6)	407	434	303	980	-	2.85
	5	HS-2.0	2.0	42.5	43.7	173	HS(2.0)	407	434	303	980	-	2.85
5回目	6	HS-3.1	3.1	42.5	43.7	173	HS(3.1)	407	434	303	980	-	2.85
	7	HS-4.2	4.2	42.5	43.7	173	HS(4.2)	407	434	303	980	-	2.85

断熱養生と埋め込み型ひずみ計の概要を図-2に示す。簡易断熱養生中のひずみ測定用の供試体はφ10×20cmサミットモールドを用い、コンクリートの膨張収縮時に作用する摩擦抵抗を極力除去する目的で内部側面にテフロンシートを貼付けした。熱電対付き埋め込み式ひずみ計（見掛けの弾性係数：40N/mm<sup>2</sup>）を用いて針金でサミットモールドの中心部に設置した。

コンクリートの練り混ぜは容量50Lのパン型ミキサーを用いて40L練の2バッチ合せとした。細骨材、セメント、水の順に投入して60秒練り混ぜをして掻き落とし後、粗骨材を投入して90秒練り混ぜて排出した。直ちにフレッシュ試験を実施して目標値範囲内に合格後に供試体の作製を行った。実験は計5回の日に分けて実施した。

## 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状

フレッシュ試験結果および材齢28日の標準養生圧縮強度試験結果を表-9に示す。いずれの水準もスランプ、空気量は所定の目標値内となった。練上がりのコンクリート温度は19~23℃の範囲だった。凝結時間は始発が4~7時間程度、終結が6~10時間の範囲となっていたが、水準間でばらつきがあり、本実験では傾向が把握できなかった。要因として、練混ぜ日、練上がりのコンクリート温度、混和剤添加量の違いの影響が考えられた。また、標準養生28日強度は全ての水準で呼び強度33の1.2倍程度が目安となる配合強度39.6N/mm<sup>2</sup>を上回る強度値となり、おおむね同一強度での比較が実施できたとと言える。

### 3.2 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度の発現性について比較セメントの水準を図-3に、HS系結合材の水準を図-4に示す。マスコンクリートに関する指針の圧縮強度予測式<sup>9)</sup>を用いて、硬化過程における圧縮強度を、標準養生28日圧縮強度を基準とした強度発現率と有効材齢 $t_e$ (日)の関係を用いて表現した。なお、簡易断熱養生の有効材齢 $t_e$ (日)は測定した内部温度履歴から計算により求めている。圧縮強度予測式に用いる各定数として、セメント種類に関わる定数 $s$ および硬化原点のための補正項 $s_f$ を用い、それぞれNは $s=0.31$ ,  $s_f=0.5$ を、Mは $s=0.60$ ,  $s_f=0$ を、BBは $s=0.54$ ,

表-9 フレッシュ試験結果

練り混ぜ日	No.	記号	フレッシュ試験結果			凝結 (hh:mm)		圧縮強度標準養生28日 (N/mm <sup>2</sup> )
			スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)	始発	終結	
1回目	1	N-2.0	21.5	4.9	19.0	5:25	7:35	40.7
2回目	2	M-2.0	21.0	4.2	23.0	4:25	6:25	47.6
3回目	3	BB-2.0	20.5	4.5	18.2	5:40	9:35	42.0
4回目	4	HS-0.6	21.5	5.0	20.6	6:55	9:00	42.3
	5	HS-2.0	21.5	4.0	20.4	7:15	9:25	47.8
5回目	6	HS-3.1	21.5	5.0	20.4	5:45	9:20	48.7
	7	HS-4.2	21.5	4.9	20.5	5:40	9:45	50.9

表-8 試験項目

試験項目	試験規格	試験方法、目標値
スランプ	JIS A 1101	練り上げ時の目標値：20±2.5cm ※目標スランプ18cmに対しロス分2cmを加えた
空気量	JIS A 1128	練り上げ時の目標値：5.0±1.0% ※目標空気量4.5%に対し、ロス分を0.5%加え、実験水準間の空気量の差による圧縮強度の違いの影響を極力除く目的で、±1.0%の通常よりも狭い管理幅とした
コンクリート温度	JIS A 1156	目標値：20±3℃
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生：材齢7、28日(N=3本) 20℃封かん養生：材齢1、3、7、14、28、91日(N=3本) 簡易断熱養生：材齢28、56、91日(N=3本)
静弾性係数	JIS A 1149	圧縮強度試験時に実施
凝結	JIS A 1147	コンクリートの凝結時間測定試験方法
自己収縮ひずみ (20℃)	-	10×10×40cm供試体 埋め込み型ひずみ計KM-100BTを用いてN=2体測定 測定試料は約41℃の材料14日まで測定 (後)凍結処理の断熱温度測定機で測定
断熱温度上昇量	-	供試体は図-2に示すように設置し、中心部に設置したひずみ測定用試験体の内部温度を埋め込み型ひずみ計(KM-100BT:東京測器社製)で測定
簡易断熱養生温度	JASS5 T-606	
簡易断熱養生中のひずみ測定	-	φ10×20cmサミットモールド内の内部側面にテフロンシートを張付し、KM-100BTを中心に針金で固定して打込み後からの温度およびひずみ量(温度ひずみと膨張収縮ひずみの和)を測定。

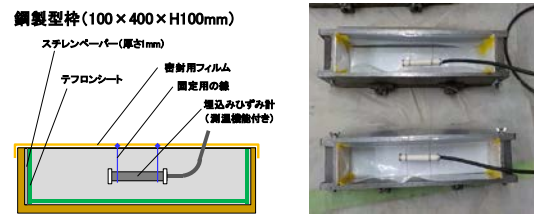


図-1 自己収縮ひずみ測定 (20℃) の概要

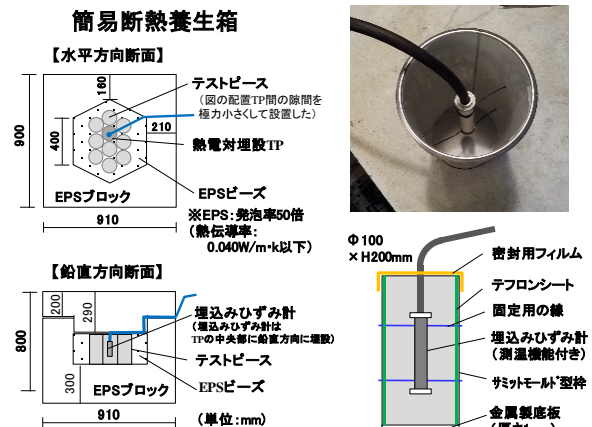


図-2 簡易断熱養生と埋め込み型ひずみ計の概要

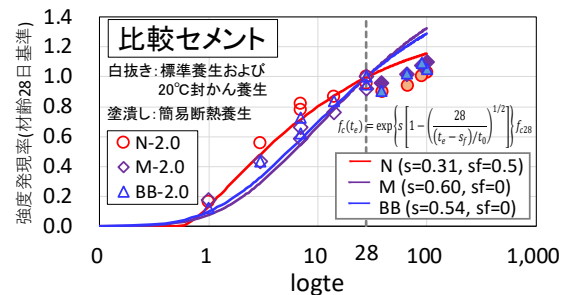


図-3 圧縮強度の発現 (比較セメント)

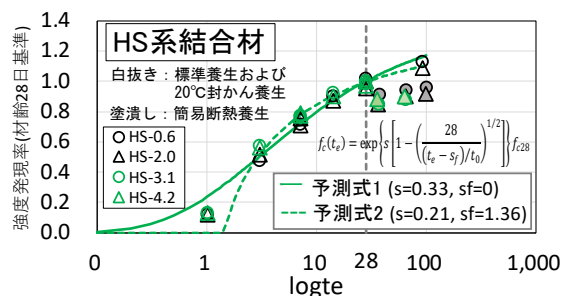


図-4 圧縮強度の発現 (HS系結合材)

sf=0 を用いている。比較セメントの3水準は標準養生および封かん養生（20℃）の実強度が予測式とよく一致する傾向を示した。一方、簡易断熱養生の圧縮強度発現率は予測式よりも下方にずれる傾向を示した。これはマスコンクリート内部の強度発現が予測式よりも小さい可能性を示しているが、同様の傾向はHS系結合材の水準にも認められた。

HS系結合材はSO<sub>3</sub>量の差による強度発現率の違いは見られず、全ての水準を1つの予測式として扱うことが可能と言えた。材齢28日までの強度試験結果を最小二乗法によりフィッティングした結果、sfが0の場合はs=0.32, sf=0の予測式1, sfが0でない場合はs=0.21, sf=1.36の予測式2として強度発現率が評価可能と考えられた。

圧縮強度とヤング係数の関係を図-5に示す。また、参考値として予測式1<sup>6)</sup>（以下、RC基準式）および予測式2<sup>7)</sup>（以下、AIJマスコン式）を示す。AIJマスコン式では、骨材による係数をk<sub>1</sub>=1.2（石灰岩砕石）、混和材による係数をk<sub>2</sub>=0.95（高炉スラグ微粉末）とした。今回の実験結果は比較セメントの水準とHS系結合材の水準ともAIJマスコン式によく一致しており、通常のコンクリートと同様に予測式2を用いて評価が可能と考えられる。また、HS系結合材の圧縮強度とヤング係数の関係はSO<sub>3</sub>量の違いによる影響はほとんどないことから、まとめて1つの予測式に定式化が可能と考えられる。

### 3.3 自己収縮ひずみ（20℃）

自己収縮ひずみの測定結果を図-6に示す。試験体は材齢1日で脱型後、厚手ビニールで封かんして20℃で14日間継続した。2体のひずみ履歴はほぼ同一であったため平均値をプロットした。

比較セメント3水準（No.1-3）のNおよびMの自己収縮ひずみは小さく、ほとんど推移していないが、BBは材齢とともに収縮ひずみが増大する傾向を示した。対してHS系結合材4水準（No.4-7）はSO<sub>3</sub>量によって違いがあった。SO<sub>3</sub>量の少ない0.6%と2.0%の水準は打込み直後から収縮してその後も収縮ひずみが増大する傾向があったが、一方、SO<sub>3</sub>量の多い3.1%と4.2%の水準は打込み後から材齢1日にかけて膨張してその後緩やかに収縮していく傾向だった。HS系結合材はSO<sub>3</sub>量が多いほど収縮ひずみが抑制される傾向があり、材齢14日のひずみはSO<sub>3</sub>量4.2%の水準が膨張側に90μ程度、SO<sub>3</sub>量0.6%の水準が収縮側に200μと300μ程度の差があった。

### 3.4 断熱温度上昇量

材齢14日までの断熱温度上昇量の経時変化を図-7に示す。また、下記の式(1)<sup>7)</sup>に従ってフィッティングにより求めた断熱温度上昇量の係数K, αの比較を図-8に示す。HS系結合材のNo.4-7の水準ではSO<sub>3</sub>量の増加とともにα値が増加する傾向を示した。

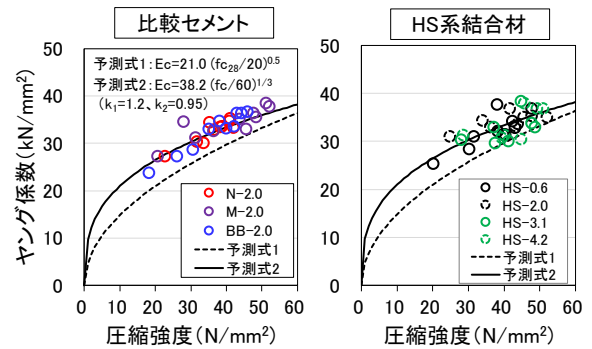


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

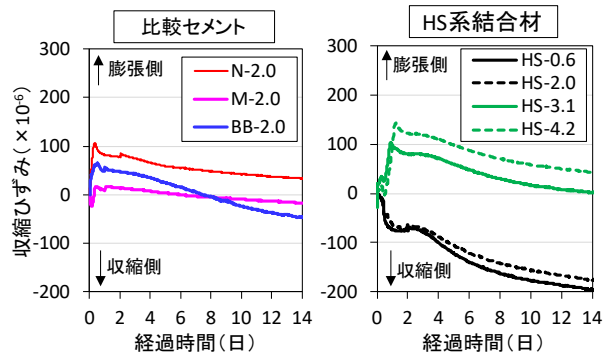


図-6 自己収縮ひずみ測定結果（20℃）

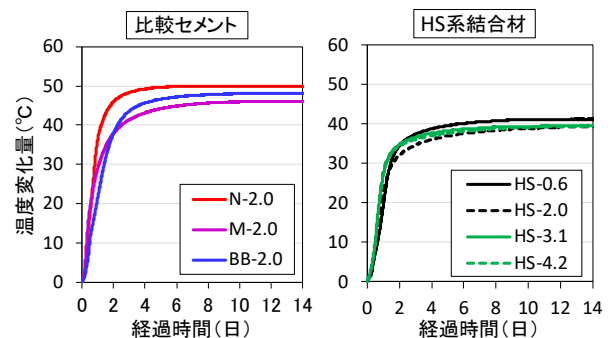


図-7 断熱温度上昇量の経時変化

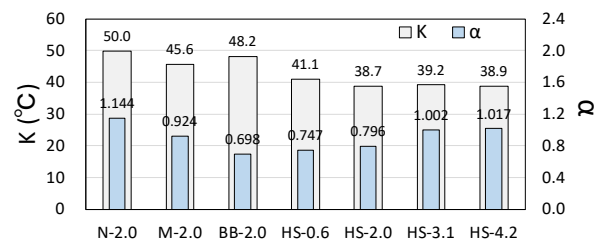


図-8 断熱温度上昇予測式の係数

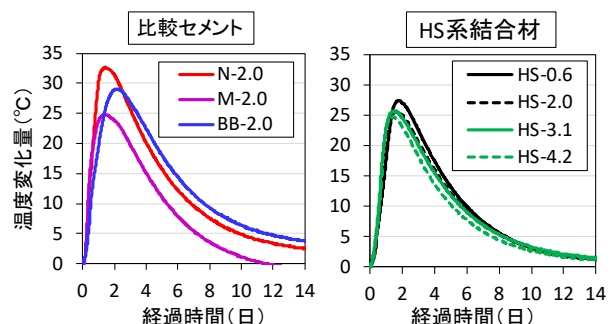


図-9 簡易断熱箱内部の温度上昇量

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

t : 材齢 (日)

Q(t) : 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C)

K : 終局断熱温度上昇量 (°C)

α : 温度上昇速度に関する定数 (-)

終局断熱温度上昇量の係数 K は N>BB>M>HS 系結合材の順に大きい傾向を示し、HS 系結合材の 4 水準は発熱量が最も小さい傾向を示した。

### 3.5 簡易断熱養生中の内部温度

簡易断熱箱内部の温度上昇量の経時変化を図-9に示す。最高到達温度は、Nが最も高く、BB、HS系結合材、Mの順に高い傾向となった。HS系結合材がMよりも最高到達温度が大きくなった理由として、HS系結合材はMよりもK値は小さいがα値が大きいいため、注水後から材齢2日までの内部温度の上昇速度が高まったことが要因と推測される。

### 3.6 簡易断熱養生中のひずみ

簡易断熱養生中の温度変化量とひずみ変化量を図-10に示す。比較セメントN、Mは温度上昇時と下降時の傾きがほぼ同じであり、最終ひずみが原点に近づく傾向であったが、BBおよびHS系結合材は温度上昇時と下降時の挙動が一致しない傾向を示した。また、HS系結合材

はSO<sub>3</sub>量が増加するほど温度上昇時のひずみ量(温度ひずみ+自己膨張収縮ひずみ)が膨張方向に増大しており、温度変化量が最大となる時のひずみ変化量が膨張側に大きくなる傾向を示した。SO<sub>3</sub>量が多いほど温度上昇時のエトリンサイト生成量が多いことが影響していると考えられる。

既往の研究<sup>5)</sup>を参考として、図-11に示すように温度上昇・下降域を区分することで見掛けの熱膨張係数の算定を試みた。温度上昇時における原点O点からA点までが生成活性化区間(赤線)、A点から最高到達温度B点までを膨張停滞域(緑線)とした。また、温度下降域では、B点から急激に収縮が増大するC点までを収縮遷移域(桃線)、C点から温度が降下して到達する最終D点までを収縮区間(青線)と定義して4区間に区分した。その結果、簡易断熱養生中のひずみの挙動はType1~3の3つに分類され、NとMは収縮遷移区間(B→C区間)のないType1に、BBとHS系結合材のSO<sub>3</sub>量の少ない0.6%と2.0%の水準はType2に、HS系結合材のSO<sub>3</sub>量の多い3.1%と4.2%の水準はType3に区分された。

表-10に各点までの到達時間、ひずみ変化量、温度変化量、自己膨張収縮ひずみを含んだ見掛けの熱膨張係数をそれぞれまとめた。ここで温度下降時(C→D)の見掛

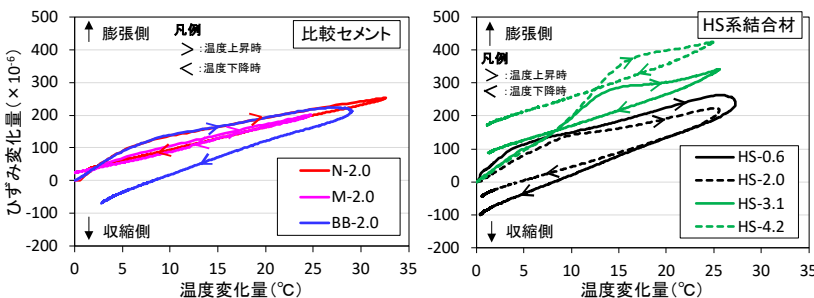


図-10 簡易断熱養生中のコンクリートのひずみ変化量

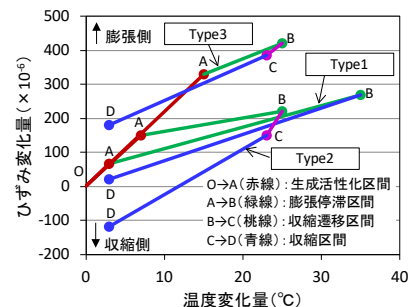


図-11 見掛けの熱膨張係数の概要

表-10 ひずみ変化量、温度変化量、見掛けの熱膨張係数

実験水準	ひずみ変化のパターン	到達時間 (日)				ひずみ変化量 (×10 <sup>-6</sup> )				温度変化量 (°C)				見掛けの熱膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)				
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	O→A	A→B	B→C	C→D	
1	N-2.0	Type1	0.27	1.30	28.9	107	253	29	6.3	32.6	1.1	18.7	5.3	7.0				
2	M-2.0	Type1	0.15	1.25	24.1	60	201	15	4.1	24.8	-2.0	15.5	6.6	6.8				
3	BB-2.0	Type2	0.41	1.57	3.03	18.9	116	224	176	-69	7.2	27.2	26.6	-2.8	17.0	5.3	11.7	10.5
4	HS-0.6	Type2	0.33	1.65	2.70	19.2	107	245	175	-99	4.3	27.3	23.9	0.5	24.0	6.8	18.5	11.7
5	HS-2.0	Type2	0.54	1.56	2.60	21.7	143	220	160	-45	10.1	25.6	22.4	0.5	15.3	5.6	17.9	9.0
6	HS-3.1	Type3	0.62	1.36	2.51	15.1	282	342	290	88	14.4	25.6	22.2	1.3	19.5	5.2	15.5	9.3
7	HS-4.2	Type3	0.72	1.37	2.39	15.1	364	424	370	173	15.7	24.9	21.2	1.1	22.6	5.7	14.4	9.5

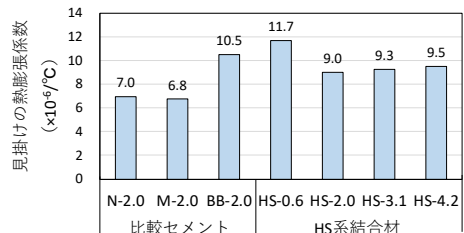


図-12 見掛けの熱膨張係数

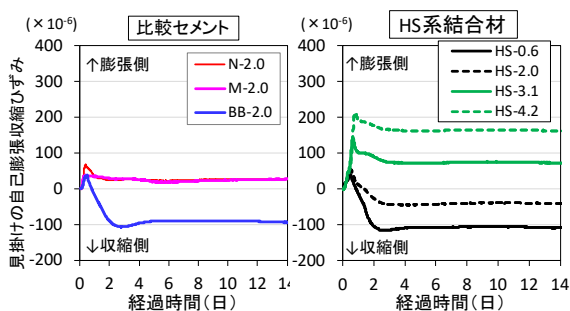


図-13 見掛けの自己膨張収縮ひずみ

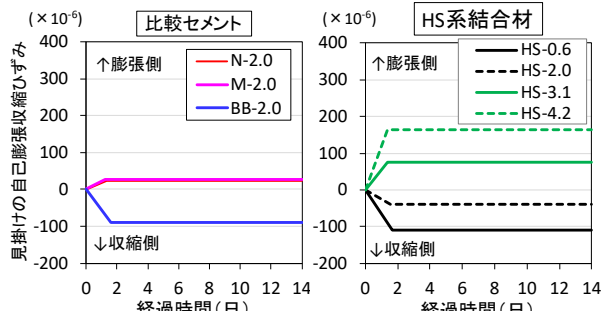


図-14 見掛けの自己膨張収縮ひずみの定量化検討の一例



けの線膨張係数を全区間の熱膨張係数の設定値として用いると温度応力解析が簡略化される。CD 間の見掛けの熱膨張係数を図-12 に示す。BB および HS 系結合材の見掛けの熱膨張係数は N, M よりも 2~3 $\mu$  程度大きい傾向を示した。HS 系結合材の SO<sub>3</sub> 量=0.6%は特に大きく 11.7 $\mu$ であったが、SO<sub>3</sub> 量を 2.0~4.1%とした場合は BB の 10.5 $\mu$  よりも 1.0~1.5 $\mu$  程度小さくなる傾向を示した。

### 3.6 見掛けの自己膨張収縮ひずみ

図-13 に見掛けの自己膨張収縮ひずみを示す。見掛けの膨張収縮ひずみは、簡易断熱養生中の実ひずみから温度上昇・下降時に相当する温度ひずみ（この際、全区間を温度下降時の CD 間の見掛けの熱膨張係数を用いて算定した）を差し引いたひずみと本論文では定義した。図-14 は、図-13 のひずみ挙動を 2つの直線で構成できるモデル化を検討した一例を示す。原点からの立ち上がり直線と最終の収縮ひずみの定常値の直線の 2つで構成し、その交点となる点はひずみ量が最大となる B 点を仮に設定している。このようなモデル化が仮に可能になれば、マスコンクリート温度応力解析に、膨張による圧縮応力を導入した評価や SO<sub>3</sub> 量の違いによる自己膨張ひずみの影響を簡便に導入できる可能性がある。ただし、熱膨張係数が大きい初期材齢部分の取り扱い、2 直線で構成したモデルの交点の定め方の妥当性、そして見掛けの自己膨張ひずみが部材断面依存性に及ぼす影響などについて検討をする必要があり、今後の課題としたい。

表-11 は、定量となった時の自己膨張収縮ひずみ量と、温度下降時に見掛けの熱膨張係数と温度下降量から求められる温度ひずみ量から、2つの合計値として総ひずみ量を試算した結果を示す。また、図-15 に総ひずみ量の試算値を示す。HS 系結合材は SO<sub>3</sub> 量が多いほど、合計のひずみ量が小さくなることから、温度ひび割れ抵抗性の向上に効果がある可能性が示唆される。

## 5. まとめ

高炉セメント C 種相当の結合材（HS 系結合材）中の三酸化硫黄量（SO<sub>3</sub> 量）がマスコンクリートの温度応力解析に用いる諸係数に及ぼす影響を市販セメントとの比較により検討した。今回の実験結果から以下の知見が得られた。

- 1) HS 系結合材中の SO<sub>3</sub> 量が増加するほど、自己収縮ひずみが低減する傾向、断熱温度上昇曲線の温度上昇速度に関する定数  $\alpha$  が増加する傾向がある。
- 2) HS 系結合材の圧縮強度の発現および圧縮強度とヤング係数の関係は、SO<sub>3</sub> 量の違いによらず有効材齢を用いた同一の予測式として評価が可能である。
- 3) 温度下降時の見掛けの熱膨張係数は、HS 系結合材は SO<sub>3</sub> 量を 2.0%以上に増加させることで BB よりも

表-11 総ひずみ量の試算結果

項目	比較セメント			HS系結合材				
	N-2.0	M-2.0	BB-2.0	HS-0.6	HS-2.0	HS-3.1	HS-4.2	
A: 自己膨張収縮ひずみ量 ( $\times 10^{-6}$ )	25	25	-90	-110	-40	75	165	
B: 温度ひずみ量 ( $\times 10^{-6}$ )	-228	-195	-300	-300	-226	-234	-232	
B=a $\times$ b	a: 温度上昇量 (°C)	32.6	28.7	28.6	25.6	25.1	25.2	24.4
	b: 見掛けの熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	7.0	6.8	10.5	11.7	9.0	9.3	9.5
C: 総ひずみ量の試算値 ( $\times 10^{-6}$ ) C=A+B	-203	-170	-390	-410	-266	-159	-67	

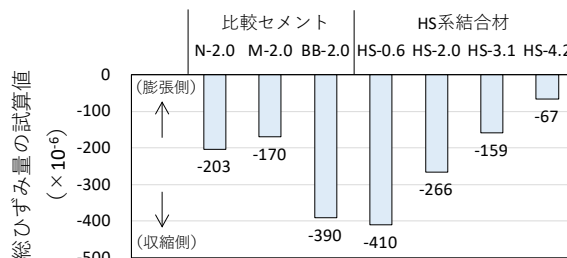


図-15 総ひずみ量の試算値

1~1.5 $\mu$  小さい傾向を示す。

- 4) 見掛けの自己膨張収縮ひずみをモデル化する検討を実施した。もし簡易なモデル化が可能になれば、HS 系結合材を用いたコンクリートの SO<sub>3</sub> 量の違いによる自己膨張収縮ひずみの影響を温度応力解析に簡便に導入できる可能性がある。

### 参考文献

- 1) 特集 産業副産物起源のコンクリート用混和材の有効利用, コンクリート工学, Vol.52, No.5, 2014.5
- 2) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp69-73, 2010.9
- 3) 辻大二郎, 小島正朗, 野口貴文: 高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に関する実験検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.201-206, 2016.6
- 4) 閑田徹志, 稲葉洋平, 石関浩輔, 小島正朗: 高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリート中の温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.1720-1725, 2014.7
- 5) 溝淵利明, 石関浩輔, 佐川孝広, 閑田徹志: 高炉スラグ高含有セメントに含まれる少量混合材がマス養生下でのコンクリートの熱特性に与える影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1339-1344, 2017.7
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 1991
- 7) 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, pp.62-64, 2008.2