

報告 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度補正值の実験的検討

依田 和久^{*1}・閑田 徹志^{*2}・全 振煥^{*3}・玉木 伸二^{*4}

要旨：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートは環境負荷低減のために有効である。ここでは、建築工事で大量に使用するマスコンクリート部材への実用化を目指し、調合設計上必要となる構造体強度補正值 (mSn 値) について実験的に検討した。実験では、3シーズン (標準期, 夏期, 冬期) について、標準養生強度と、構造体強度の推定のため模擬柱部材から採取したコア供試体および簡易断熱養生供試体の圧縮強度との差から mSn 値を求めた。実験の結果、mSn 値のうち最も一般的な $_{28}S_{91}$ 値は、通期において JASS 5-2009 に示されている高炉セメント B 種コンクリートの値に比べ同等以下であることが明らかになった。

キーワード：高炉セメント, 高炉スラグ微粉末, 構造体コンクリート強度, 温度履歴, 構造体強度補正值

1. はじめに

ポルトランドセメント製造時の焼成 (温度 1450°C) に要するエネルギーは、原料の石灰石から分離・排出されるものと合わせて CO₂ 換算で国全体の CO₂ 総排出量 13 億 7100 万 t-CO₂ の約 3.7% を占める¹⁾。一方、コンクリート構造体のエネルギー・CO₂ 原単位の 60~70% がコンクリートに由来するものであり、そのほぼ全量がセメントに由来するなど、CO₂ 排出量に及ぼすセメントの影響は大きい。筆者らの研究グループでは CO₂ 削減効果の向上を目的として高炉スラグ微粉末 (ブレーン 4000~6000cm²/g 程度) を 65% 程度含む新しいセメント (以下 HS) を用いた構造部材への用途開発²⁾を行っている。用途として既報の高強度コンクリート³⁾や場所打ち杭⁴⁾に加え、コンクリートの使用量が多い耐圧盤や基礎梁に用いられるマスコンクリートが挙げられる。既報⁵⁾では標準期および夏期の構造体強度について検討した。本報では、およそ 1 年半かけて実機練り実験を通じて蓄積した冬期を含むコンクリートの圧縮強度をもとに構造体強度補正值 (以降 mSn 値) について検討した結果を述べる。

2. 実験概要

2.1 実験要因と組合せ

実験の要因と水準を表-1 に示す。実験要因は圧縮強度に影響を与えるものを過去の知見をもとに取り上げた。水準のうち、標準としたものは、結合材種類は高炉スラグ系 (記号 HS)、高炉スラグの比表面積は 4000cm²/g、碎石の岩種は石灰岩とした。これらに対し比較とした水準は、結合材種類は高炉セメント B 種 (記号 BB) および中庸熟セメント (記号 M)、高炉スラグ微粉末の比表

面積は 6000 cm²/g、碎石の岩種は硬質砂岩とした。季節は通期 (通年) とし、3 期に分け、材齢 28 日までの平均養生温度の結果から標準期 (20°C)、夏期 (30°C)、冬期 (10°C) とした。水結合材比は、呼び強度 21~36 程度を想定し、55, 45, 42, 38% とした。AE 減水剤の形は標準形 (S) のほか、長期でのコアの強度増進を期待して遅延形 (R)、超遅延形 (B) とし、季節に応じて使い分けた。実験要因と水準を組み合わせたコンクリートの種類を表-2 に示す。実験は全て実機練りとして実施した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準1	水準2	水準3	水準4
結合材種類	高炉スラグ系(HS)	高炉B種(BB)	中庸熟(M)	—
高炉スラグの比表面積	4000 (cm ² /g)	6000 (cm ² /g)	—	—
碎石の岩種	石灰岩	硬質砂岩	—	—
季節	標準期(N)	夏期(S)	冬期(W)	—
水結合材比*	55%	45%	42%	38%
AE減水剤の形	標準(S)	遅延(R)	超遅延(B)	—

*1.比較用のコンクリートの水結合材比は呼び強度36相当とし、高炉Bは43.5%、中庸熟は46.5%とした
*2.グレーで示した水準は標準としたもの

表-2 コンクリートの種類

記号	結合材	AE減水剤	水結合材比 (%)	季節
HSS45N	HS	S	45.0	標準期(N)
HSR42S		R		
HSB42S		B		
HSR42S-6000 ^{*1}		R		夏期(S)
HSR42S-S ^{*2}		R		
BBR44S	BB	R	43.5	冬期(W)
HSS42W1 ^{*3}	HS	S	42.0	
HSS42W2 ^{*3}	HS	S	42.0	
HSR55S	HS	R	55.0	夏期(S)
HSR45S		R	45.0	
HSR38S		R	38.0	
HSB45S		B	45.0	
MR47S	M	RB	46.5	夏期(S)

*1.高炉スラグ微粉末は比表面積6000cm²/gのものを使用
*2.碎石に硬質砂岩を使用、*3.再現性の確認

*1 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ グループ長 Ph.D (正会員)

*3 鹿島技術研究所 建築生産グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 竹本油脂株式会社 第三事業部 研究開発部 化学グループ マネージャー 工修 (正会員)

2.2 使用材料，調合，練混ぜ

使用材料を表-3に、コンクリートの調合を表-4に示す。HSは、既報で述べた通り、クリンカーの比率が30%程度で、SO₃の使用量が高炉セメントC種の上限に近い4%程度となっている。表-5中のHS〔比表面積(ブレン)4000 cm²/g〕の圧縮強さから材齢3, 7, 28日全ての材齢で高炉セメントB種の値と比べてやや低いものの、同セメントの規格を満足しており、課題であった初期強度についても懸念が小さい。また、AE減水剤は、HS用に開発した試作品で、高炉スラグを大量混和したコンクリートで課題のスランプロスの抑制が可能である。

表-4のコンクリートの調合は、生コン工場の試験室における試験練りにより決定した。スランブは15 cmのほか、他の建築部材への展開を考慮した実験においては18 cmとした。これにスランプロスを考慮して練上り直後のスランブは18 cm又は20 cmとした。空気量は4.5%とし、ロスを考慮して練上り直後を5.0%とした。BBおよびMは、HSコンクリートと同一呼び強度、スランブに対する生コン工場の標準調合である。練混ぜは、強制二軸ミキサを用い、練混ぜ時間は材料投入後40秒とした。

2.3 試験項目と方法

試験項目と方法を表-6に示す。フレッシュコンクリートの試験結果は、いずれも練上り直後のものとした。ブリーディング試験は一部(表-7参照)で実施した。

構造体コンクリート強度はコア供試体、および簡易断熱養生供試体の2つの推定方法によるものとした⁶⁾。これらに加え、mSn値を算出するため、標準養生による供試体についても圧縮強度試験を実施した。

コア供試体および簡易断熱養生供試体は、それぞれJASS 5 T-605, JASS 5 T-606に基づき採取した。コア供試体は、図-1に示す通り、上下断熱材で覆い、柱中央部と類似の条件を有する1 m角の模擬柱部材から採取した。模擬柱部材の温度履歴は、部材中心部、コア(内側)の中心、コア(外側)の中心の3点で計測した。簡易断熱養生供試体は、図-2に示す通り、断熱型枠を用いて養生を行い、型枠中の供試体内部の温度を計測した。

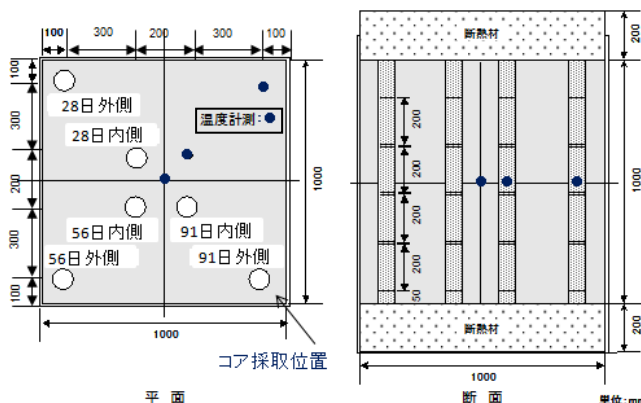


図-1 模擬柱部材のコア採取位置

表-3 使用材料

種類	記号	種類	密度(g/cm ³)	生コン工場
結合材(B)	HS	高炉スラグ系 (高炉セメントC種相当, ブレン4000, 6000cm ² /g)	2.98	-
	BB	高炉セメントB種	3.04	-
	M	中庸熟	3.21	-
細骨材(S)	RS	陸砂	表乾2.58	A
	CS1	砕砂	表乾2.65	A
	S2	砂 ^{*2}	表乾2.58	B
	CS2	砕砂 ^{*2}	表乾2.62	B
	CG1	石灰岩	表乾2.70	A
粗骨材(G)	CG2	石灰岩	表乾2.70	A
	CG3	硬質砂岩(単味使用)	表乾2.64	A
	CG4	石灰岩(単味使用) ^{*2}	表乾2.70	B
	S	標準形(試作品)	1.08	-
AE減水剤(Ad)	R	遅延形(試作品)	1.09	-
	B	超遅延形(試作品)	1.09	-
	RB	遅延形(Mセメント用)	1.09	-
	水	W	上水道水	1

*1.混合比(質量)RS:CS1=4:6, S2:CS2=5:5, CG1:CG2=5:5

*2.コンクリートHSR55S, HSR45S, HSR38S, HSB45Sで使用

表-4 コンクリートの調合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤の添加量(B×%)
			W	B	S	G	
HSS45N	45.0	46.0	175	389	782	948	B×0.9%
HSR42S	42.0	44.0	178	424	732	962	B×0.9%
HSB42S							B×0.9%
HSR42S-6000							B×1.1%
HSR42S-S							B×0.95%
BBR44S	43.5	42.6	186	428	702	974	B×0.8%
HSS42W1	42.0	44.8	177	422	748	948	B×1.0%
HSS42W2							B×0.85%
HSR55S	55.0	46.2	162	295	834	1008	B×1.1%
HSR45S	45.0	42.9	170	378	734	1015	B×1.1%
HSR38S	38.0	39.4	179	471	317	1010	B×1.2%
HSB45S	45.0	42.9	170	378	734	1015	B×1.05%
MR47S	46.5	45.4	176	379	788	960	B×1.2%

表-5 結合材の品質

品質	HS		M	BB	BBの規格値	
	ブレン4000	ブレン6000				
密度(g/cm ³)	2.98	2.98	3.21	3.04	-	
比表面積(cm ² /g)	4170	5070	3170	3800	≥3300	
凝結(h-min)	始発	3-55	4-00	2-16	3-03	60min以上
	終結	6-10	5-00	3-24	4-21	10h以下
安定性(バット法)	良	良	良	良	良	
圧縮強さ(N/mm ²)	材齢3日	18.2	28	21.5	21.6	≥10.0
	材齢7日	31.5	45.2	30.8	37.1	≥17.5
	材齢28日	52.0	63.5	56.1	64.6	≥42.5
酸化マグネシウム(%)	5.0	4.7	0.86	3.35	≤6.0	
三酸化硫黄(%)	3.57	3.42	2.25	2.21	≤4.0	
強熱減量(%)	0.3	0.19	0.66	1.3	≤5.0	
塩化物イオン(%)	0.006	0.006	0.014	0.011	-	

表-6 試験項目および試験方法

区分	試験項目	試験方法	養生
フレッシュ	スランブ	JIS A 1101	-
	スランブフロー	JIS A 1150	-
	空気量	JIS A 1128	-
	温度	JIS A 1156	-
	性状	目視	-
硬化過程	ブリーディング ^{*2}	JIS A 1123	-
	温度	熱電対による	-
強度 ^{*1}	圧縮強度	JIS A 1108	標準養生
		JASS 5 T-605	コア
		JASS 5 T-606	簡易断熱

*1.試験材齢は28, 56, 91日とし、標準養生のみ材齢7日も実施

*2.一部で実施、詳細は表-7参照

3. 実験結果

3.1 フレッシュ試験結果

フレッシュ試験の結果を表-7に示す。スランプ、空気量ともに練上り直後において2.2で示した目標とする管理範囲内の結果であった。また、セメント中のクリンカー量が少ないHSコンクリートではブリーディング量が大きくなること⁷⁾が懸念されたが、今回の骨材との組合せでは、一般に良質なコンクリートの上限とされる $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ を過年で下回った。

3.2 コンクリート各部の温度

(1) コンクリートの各部の温度

代表例としてHSS45Nの模擬柱部材各部および簡易断熱型枠の供試体内部の温度履歴を図-3に示す。模擬試験体中心部とコア内側の最高温度は45℃程度と同等であり、これに対しコア外側は34℃と約11℃低い。この温度差は部材厚で見た場合JASS5に記載されている中庸熱セメント(単位セメント量 $438\text{kg}/\text{m}^3$)の16℃程度⁶⁾に比べ小さい。また、簡易断熱型枠の供試体内部の最高温度は38℃であり、試験体中心部よりも7℃程度小さい。以降、試験体中心部の温度履歴を代表値として検討した。

(2) 結合材種類別温度

結合材種類別のコンクリートの温度履歴を図-4に示す。水結合材比は43.5~46.5%の範囲で若干異なるが呼び強度がほぼ同一のコンクリートにおいて模擬試験体の最高温度はBB(79.4℃) > M(67.6℃) > HS(59.8℃)の順となった。HSは最高温度が低いことからマスコンクリートの用途に向いている⁵⁾。また、中心部とコア外側の最高温度差はBB(18.8℃) > M(13.1℃) > HS(11.6℃)の順となった。HSはBBに比べ、最高温度が低く、中心部と端部の温度差は小さいと言える。

(3) コンクリートの種類別温度

各コンクリートの練上り温度、コアおよび簡易断熱の最高温度、最高温度到達時間、温度上昇速度などのコンクリートの温度測定結果を表-8に示す。温度上昇速度は温度上昇量を最高温度到達時間で除して求めた。

コンクリートの最高温度到達時間を図-5に示す。全体的にみて、コアと簡易断熱養生の最高温度到達時間の差は小さい。標準期のHSS45Nや冬期のHSS42W1やHSS42W2の練上り温度が15℃以下のものや水結合材比

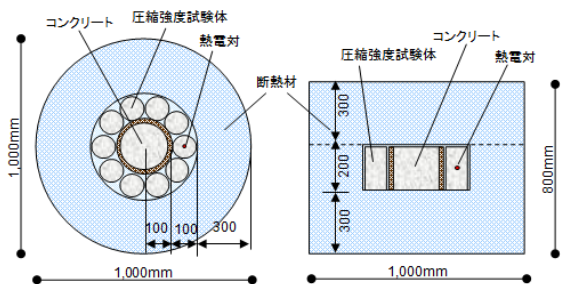


図-2 簡易断熱養生の型枠

が55%のHSR55Sは、後述するmSn値が $3\text{N}/\text{mm}^2$ 以下のものだが、これらの最高温度到達時間が30時間以上となった。

表-7 フレッシュ性状の試験結果

記号	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	性状	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)
HSS45N	19.0(20)	31.5	4.3	20	良	0.12
HSR42S	16.5(18)	27.0	4.0	32	良	—
HSB42S	16.0(18)	27.0	4.5	32	良	—
HSR42S-6000	19.5(18)	31.5	4.6	32	良	—
HSR42S-S	18.0(18)	30.0	5.6	32	良	—
BBR44S	16.5(18)	28.0	4.3	32	良	—
HSS42W1	19.5(20)	30.0	4.6	9	良	—
HSS42W2	21.0(20)	35.0	4.8	8	良	0.17
HSR55S	20.0(18)	35.0	5.3	26	良	0.07
HSR45S	20.5(18)	33.5	5.6	26	良	0.05
HSR38S	20.5(18)	36.0	5.1	28	良	0.05
HSB45S	18.5(18)	31.0	5.7	30	良	0.05
MR47S	19.5(18)	32.0	6.1	32	良	0.05

*スランプの()内は練上り直後の目標値

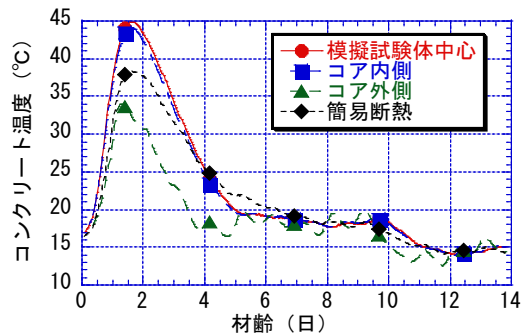


図-3 試験体各部の温度履歴の一例 (HSS45N)

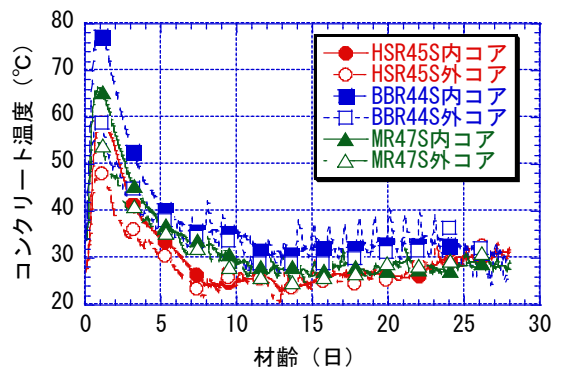


図-4 結合材種類別コンクリートの温度履歴

表-8 硬化過程のコンクリート温度

記号	練上り温度 (°C)	コア			簡易断熱			平均養生温度 (°C)		
		最高温度 (°C)	温度上昇量 (°C)	最高温度到達時間 (h)	最高温度 (°C)	温度上昇量 (°C)	最高温度到達時間 (h)			
HSS45N	14	44.1	30.1	38.0	0.8	38.4	24.4	37.0	0.7	20.6
HSR42S	32	67.1	35.1	19.5	1.8	60.3	28.3	19.0	1.5	34.8
HSB42S	32	67.6	35.6	24.4	1.5	61.8	29.8	22.9	1.3	34.9
HSR42S-6000	32	68.1	36.1	17.4	2.1	61.6	29.6	17.4	1.7	34.8
HSR42S-S	32	67.6	35.6	19.1	1.9	60.2	28.2	18.1	1.6	34.8
BBR44S	32	78.0	46.0	27.5	1.7	70.7	38.7	27.4	1.4	36.3
HSS42W1	9	31.9	22.9	58.7	0.4	30	21	61.2	0.3	10.4
HSS42W2	8	32.1	24.1	51.5	0.5	33.4	25.4	55.5	0.5	9.9
HSR55S	26	51.2	25.2	30.0	0.8	45.4	19.4	31.0	0.6	29.0
HSR45S	26	58.9	32.9	26.5	1.2	51.5	25.5	30.0	0.8	29.4
HSR38S	28	66.0	38.0	23.5	1.6	57.3	29.3	25.0	1.2	30.2
HSB45S	30	63.9	33.9	21.8	1.6	55.6	25.6	23.8	1.1	31.6
MR47S	32	66.3	34.3	21.6	1.6	58.2	26.2	26.6	1.0	32.1

コンクリートの温度上昇速度を図-6に示す。最高温度到達時間と同様に標準期のHSS45N, 冬期のHSS42W1やHSS42W2の練上り温度が15℃以下のもの、水結合材比が55%のHSR55Sについてこれらは温度上昇速度が0.8℃/h以下であり小さい。また、後述するmSn値が3N/mm²を超えるブレン6000のHSR42-6000や砂岩碎石のHSR42-Sは、温度上昇速度がその他のものと比べて比較的大きい値となった。

3.3 コンクリートの圧縮強度

(1) 結合材種類別強度発現傾向

結合材種類別のコンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図-7に示す。水結合材比は43.5~46.5%の範囲で若干異なるが、いずれも材齢とともに標準養生およびコアともに圧縮強度が増進している。材齢91日の標準養生とコア強度の差はBB>HS>Mの順となった。

(2) 季節別HSの強度発現傾向

HSを用いたコンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図-8に示す。水結合材比は42~45%の範囲で若干異なるが、いずれも材齢とともに標準養生およびコアともに圧縮強度が増進している。特に冬季においてコア強度の発現は優れる結果となった。材齢91日の標準養生とコア強度の差は標準≧夏期>冬期の順となった。

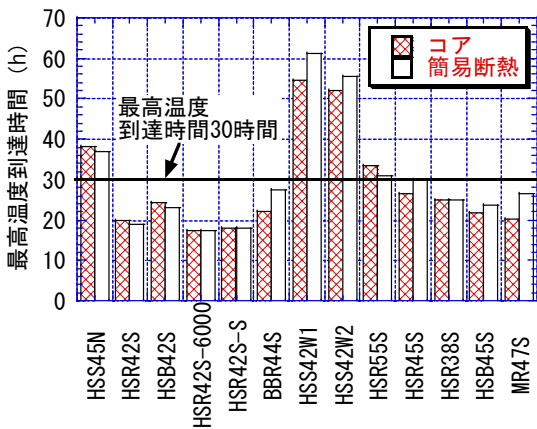


図-5 コンクリートの最高温度到達時間

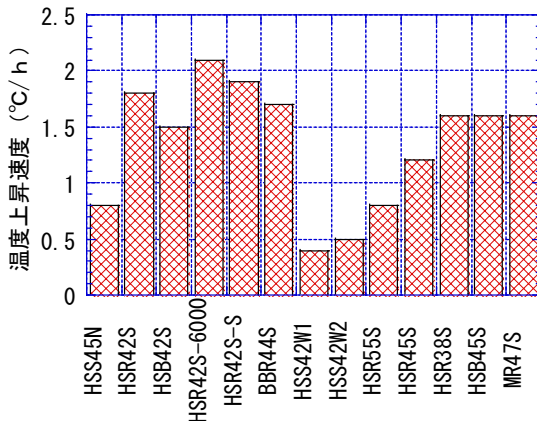


図-6 コンクリートの温度上昇速度

(3) AE 減水剤の形別強度発現傾向

HSを用いたコンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図-9に示す。いずれも材齢とともに標準養生およびコアともに圧縮強度が増進している。標準養生では遅延形のHSB45Sの強度がやや小さく、コアではHSR45Sの強度がやや大きい結果となったが、その差は材齢91日で4.5~5.1N/mm²の差であり、日間変動などを踏まえると軽微なものと考えられた。これらのことから遅延形や遅延形の圧縮強度に及ぼす影響は少ないと判断した。

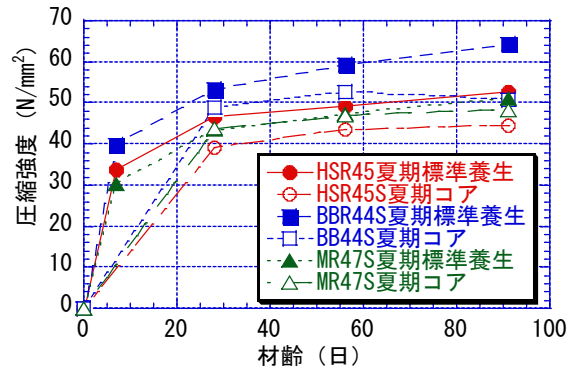


図-7 結合材種類別材齢と圧縮強度の関係

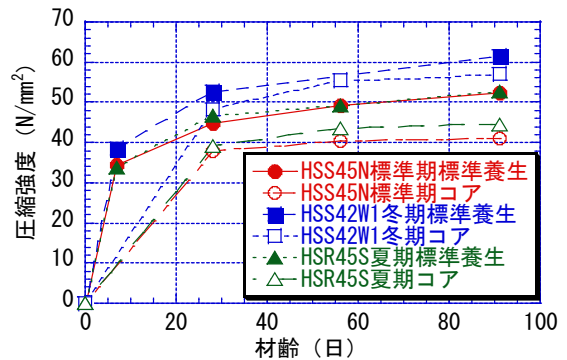


図-8 季節別HSの材齢と圧縮強度の関係

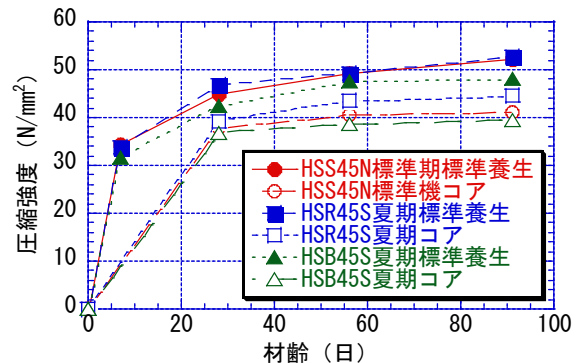


図-9 AE 減水剤の形別HSの材齢と圧縮強度の関係

4. 考察

4.1 各養生の圧縮強度の比較

同一材齢コア強度と標準養生強度の関係を図-10 に示す。コア強度に対する標準養生強度は、HS セメントを用いたコンクリートは大きく 1.1 倍以上となった。特に、ブレーン 6000 のものや砂岩砕石を用いたものは 1.3 倍程度となり、比較用の BB は 1.1 倍、M は 1.0 倍程度となった。全体で 1.0~1.3 倍となった。

同一材齢コア強度と簡易断熱養生強度の関係を図-11 に示す。コア強度に対する簡易断熱養生強度は、HS セメントを用いたコンクリートは巨視的に見ると同等であるが、コア強度が 40N/mm² 以上の場合コア ≧ 簡易断熱養生の関係になった。これに対し、BB はコア > 簡易断熱養生、M はコア < 簡易断熱養生の傾向が見られ、大小関係について既往の結果の高い再現性が確認された⁵⁾。

4.2 水結合材比と各養生強度の関係

強度補正值 mSn 値は材齢 28 日標準養生強度と材齢 91 日コア強度の差で表すものが一般的である。水結合材比と材齢 28 日標準養生強度の関係を図-12 に示す。水結合材比が大きくなると強度が低下する傾向がある。W/B42%において強度は 46.4~52.7N/mm² であり、強度差は 6.3N/mm² であった。また、W/B45%において強度は 42.5~46.8N/mm² であり、強度差は 4.3N/mm² であった。水結合材比と材齢 91 日コア強度の関係を図-13 に示す。水結合材比が大きくなると強度が低下する傾向がある。また、W/B42%において強度は 43.7~57.2N/mm² であり、強度差は 13.5N/mm² であった。また、W/B45%において強度は 39.5~44.6N/mm² であり、強度差は 5.1N/mm² であった。これらの強度差は標準養生強度のものより大きい。これは、標準養生強度の養生温度が安定しているのに対し、コアでは季節による温度履歴などにより養生温度が大きく変動するためと言える。

4.3 mSn 値の検討

コンクリートの種類別材齢 91 日コア強度と材齢 28 日標準養生強度の関係を図-14 に示す。HS において冬期のものや水結合材比が 55% のものはコア強度 ≧ 標準養生強度となった。そのほかの HS は標準養生強度 > コア強度の関係となった。特に、ブレーン 6000 や砂岩砕石は標準養生強度とコア強度の差が大きい。ここで、冬期、ブレーン 6000、砂岩砕石のデータを除いた HS は図中に示す回帰式を示した。この式において仮にコア強度の上限を 50N/mm² とすると mSn 値は 2.4N/mm² となった。

4.4 平均養生温度と mSn 値の関係

材齢 4 週までの平均養生温度と mSn 値の関係を図-15 に示す。mSn 値が 3N/mm² を超えた HSS45N、HSR42S-6000、HSR42S-S、HSR38S を除いたものについて直線回帰した。直線回帰は右肩上がりとなり、プロッ

トと回帰線から平均養生温度 20℃ 以下で mSn 値は 0 となった。また、平均養生温度が 20℃ を超えたものは、高炉スラグのブレーン 4000 の結合材、石灰岩砕石、AE 減水剤に遅延形か超遅延形を用い、水結合材比を 42% 程度以上とすれば、mSn 値は 3N/mm² 以下とすることができる。この図から除いた前述 3 つの条件である砂岩砕石、標準期の AE 減水剤標準形、水結合材比 42% 未満の場合には mSn 値は 6N/mm² 程度以下となった。

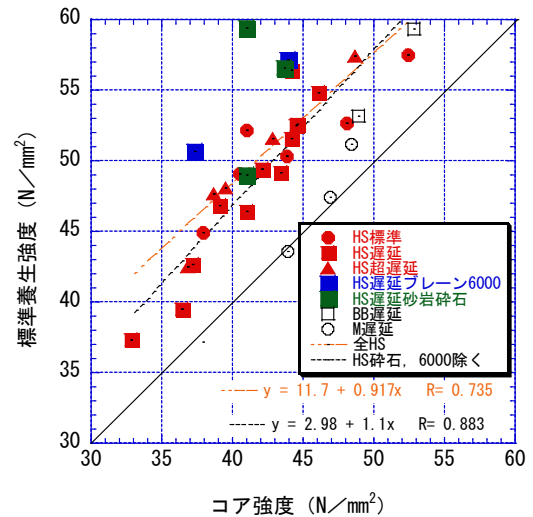


図-10 同一材齢のコア強度と標準養生強度の関係

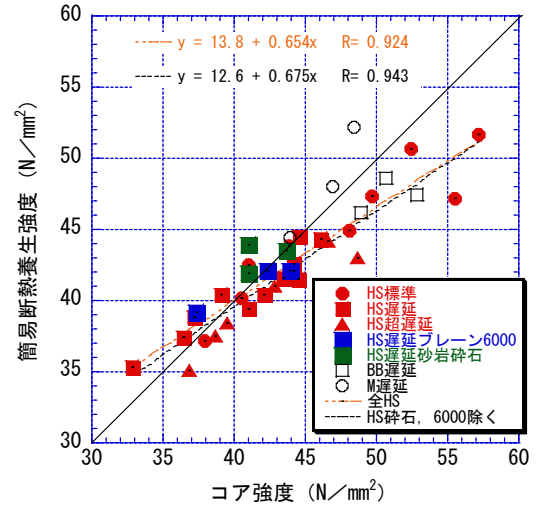


図-11 同一材齢のコア強度と簡易断熱養生強度の関係

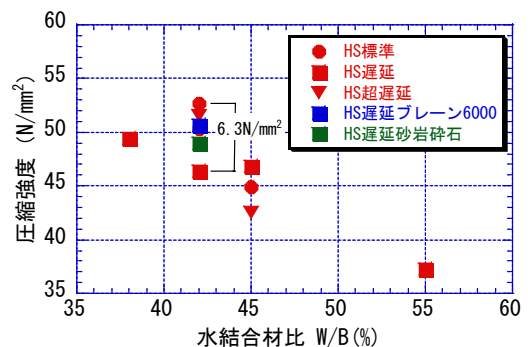


図-12 水結合材比と材齢 28 日標準養生強度の関係

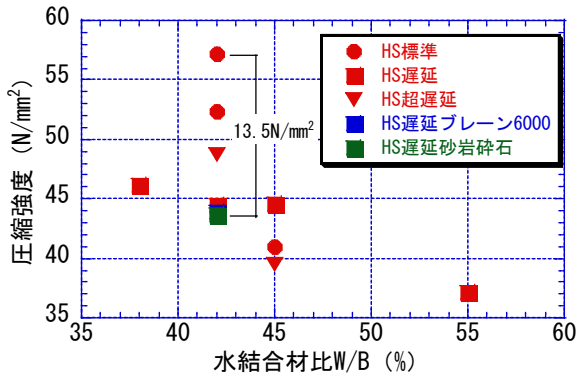


図-13 水結合材比と材齢91日コア強度の関係

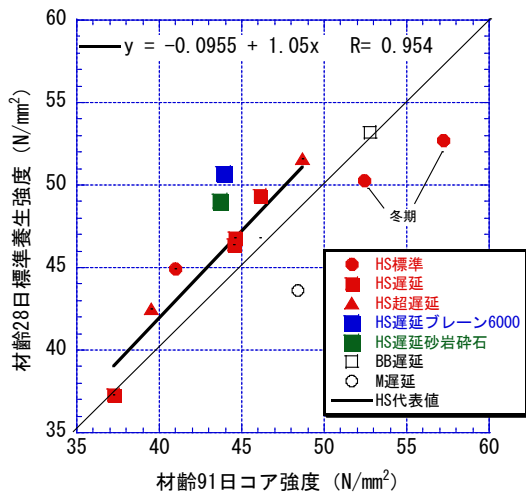


図-14 材齢91日コアと材齢28日標準養生強度の関係

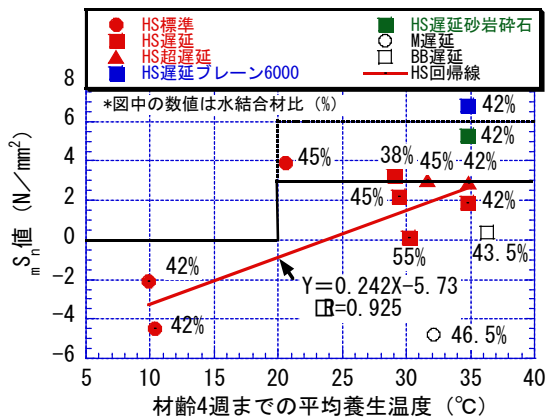


図-15 材齢4週までの平均養生温度と₂₈S₉₁値の関係

5. まとめ

本実験結果の範囲において高炉スラグ高含有セメント（記号 HS）を用いたコンクリートについて次のことが言える。

- (1) HS の温度履歴のうち最高温度は高炉セメント B 種より低く、中庸熱セメントに比べ同等以下であった。このためマスコン用途に適している。
- (2) 材齢と強度の関係は、標準養生、コアともに材齢

とともに圧縮強度が増進する傾向がみられた。

- (3) 材齢28日の標準養生強度は同一水結合材比の場合コンクリートの種類で大きな差は見られなかった。これに対し材齢91日コア強度は標準養生強度に比べ差が大きく、これは季節による温度履歴の影響を受けるものと考えられた。

- (4) HS セメントを用いた強度補正值（mSn 値）は、冬期は 0 となり、標準期や夏期は石灰岩碎石と遅延形・超遅延形の混和剤で 3N/mm² 以下となった。

本実験を通じ、マスコンクリートとして調合設計上必要となる mSn 値を把握した。今後、実用化に向けた準備を進めていく予定である。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO₂ ミニマム（ECM）セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環とし、東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ、(株)竹中工務店、鹿島建設(株)、(株)デイ・シイ、日鉄住金高炉セメント(株)、太平洋セメント(株)、日鉄住金セメント(株)および竹本油脂(株)の共同研究として実施した。実験に関わられた各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 細谷俊夫：セメント産業における CO₂ 排出量削減の取組み、コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.51-57, 2010
- 2) 米澤敏男ほか：エネルギー・CO₂ 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, pp.69-73, 2010
- 3) 辻大二郎ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.145-150, 2013
- 4) 依田和久ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ち杭用コンクリートの基礎的性質、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.223-228, 2013
- 5) 閑田徹志ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度に関する実験検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.229-234, 2013
- 6) 日本建築学会：建築工事標準使用書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2009
- 7) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説, 1996