

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に関する実験検討

閑田 徹志*1・依田 和久*2・米澤 敏男*3・黒田 萌*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(ECM コンクリート)は環境負荷低減のため有効であり, 実用化を目指し構造体強度について実験的に検討した。実験では, 構造体強度の推定のため簡易断熱養生供試体および模擬柱部材から採取したコア供試体の強度を標準期と夏期に調べた。実験の結果, 同コンクリートの構造体強度について, 材齢進行に伴う強度発現は, 標準養生による強度と同様に有効材齢の関数として既存の推定式にて精度よく再現できること, また材齢 28 日の標準養生供試体強度と材齢 91 日の構造体強度との差で表される $_{28}S_{91}$ 値は, JASS5 2009 に規定される標準値と同等以下であることが明らかとなった。

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, 構造体強度補正值

1. はじめに

コンクリート材料の環境負荷の多くは, セメント中のクリンカーを起源とするため, 負荷低減にはクリンカー分を副産物混和材料で代替することが有効である^{1,2)}。この混和材料としては, 高炉スラグ微粉末が代表的であり, 例えば, ダム工事用の RCD コンクリートを対象に, 全体の 10%程度までクリンカー量を低減する技術が提案されている³⁾。しかし, 高炉スラグ微粉末でクリンカーを大量置換した結合材を用いた場合, 初期強度が小さい, フレッシュ時の経時に伴うスランプロスが大きい, 自己収縮が大きいなどの課題を有する。

筆者らは, これらの課題に対応可能な高炉スラグ高含有セメント(以下, ECM セメント)を用いたコンクリートについて研究を進めている。ECM セメントは, 高炉スラグ微粉末の大量使用にてクリンカー使用量を結合材全体の 30%程度に抑制し, さらに SO_3 量をも高めることで初期強度と収縮特性の改善を目指した材料である⁴⁾。同セメントは, コンクリートにしたとき構成材料の製造に要するエネルギーおよび CO_2 をポルトランドセメントに対してそれぞれ 40%, 65%程度以上低減でき, さらに高炉セメント C 種の JIS 規格を満足するため, 環境負荷低減と実用性の観点から今後の適用拡大が期待されている。

ECM セメントを用いたコンクリート(以下 ECM コンクリート)を実用化する上で, 構造体コンクリート強度の確保が重要となる。しかし, 高炉セメント C 種の範疇に属するセメントを用いたコンクリートを柱・梁などの構造躯体に用いた場合に, 水和熱による初期高温が強度へ及ぼす影響についてのデータはほとんどない。そこで, 本研究では, 主として実機製造した ECM コンクリート

を対象に, 簡易断熱養生した供試体, および模擬部材を打設して採取したコア供試体の強度を調べ, 構造体コンクリート強度の発現性状について検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験要因と組合せ

本研究では, 実機練りによる ECM コンクリートを中心に, 構造体コンクリート強度に及ぼす各種要因の影響を把握した。実験は, 表-1 に示すように, 標準期シリーズと夏期シリーズの 2 つからなり, それぞれ 4 月, 7・8 月に実施した。実験要因は, 水セメント比(W/C), セメント種類, 供試体種類, 打設日, 練混ぜスケールとした。W/C は, 呼び強度 21~36 程度を想定し, 標準期シリーズにおいて 55, 45%, 38%の 3 水準を採用した。セメント種類においては, ECM セメントのほか, 夏期シリーズで高炉セメント B 種を用い比較を行った。供試体の種類は, 簡易断熱養生, コア, 標準養生の 3 水準である。夏期シリーズにおいては, 3 度の実験を行い, 打設日による影響を把握するとともに, そのうち 1 日については試験室での練混ぜを行った。

実験要因の水準を表-2 に示すように組合せ, 標準期シリーズで 3 セット, 夏期シリーズで 4 セットの全 7 セットを対象とした。標準期シリーズでは, 水セメント比が構造体コンクリート強度に及ぼす影響に着眼し, 夏期シリーズでは, 打設日ごとの構造体コンクリート強度のばらつきを明らかにすること, および高炉セメント B 種コンクリート(以下 BB) との比較を意図した。

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産 Gr. 上席研究員兼チーフ Ph.D (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産 Gr. 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 (株) 竹中工務店技術研究所 リサーチフェロー Ph.D (正会員)

*4 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ 研究員 修士(工学)

表- 1 実験要因と水準

実験シリーズ	実験要因			
	W/C	セメント種類	供試体種類	打設日
標準期シリーズ	3水準 (55%, 45%, 38%)	-	3水準 (簡易断熱, コア, 標準養生)	-
夏期シリーズ	-	2水準 (ECM, 高炉セメントB種)	-	3水準

表- 2 実験要因の水準組合せ

実験シリーズ	記号	W/C(%)	セメント種類	供試体種類	打設日
標準期シリーズ	ECM-55	55	ECM	簡易断熱標準養生	4月4日
	ECM-45	45		コア簡易断熱標準養生	
	ECM-38	38		簡易断熱標準養生	
夏期シリーズ	ECM-S1	42		簡易断熱標準養生	7月21日
	ECM-S2*	42		コア簡易断熱標準養生	8月7日
	ECM-S3	42		コア簡易断熱標準養生	8月22日
	BB	43.5	高炉B種		

*ECM-S2のみは試験室にて練混ぜ実施

2.2 材料, 調合, 練混ぜ

使用する材料と調合を表- 3および表- 4に示す。ECMセメントおよび高炉セメントB種は、JIS R 5211の対応する規格を満足した(表- 5)。ECMセメントは、クリンカーの比率が30%程度で、SO₃源として無水石膏を使用し、その使用量が上限に近い4%程度となっている。表- 5中のECMの圧縮強さから、材齢3日、7日、28日の全ての材齢でより高い性能が必要な高炉セメントB種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は小さいことがわかる。細骨材、粗骨材は、コンクリートを出荷する工場の標準品である。また、化学混和剤は、ECMコンクリート用に開発された試作品で、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を緩和可能である。

表- 4の調合は、コンクリート工場の試験室における試練りにより決定した。標準期シリーズは、スランブ18cm、空気量4.5%を目標に、運搬によるスランプロスを考慮し19±2.5cm、空気量4.5±1.5%の範囲となるよう調合を定めた。また、夏期シリーズでは標準期シリーズの結果を参考に、スランブ18cm、空気量4.5%、呼び強度36の仕様に対応する調合を選定し、管理限界を18±2.5cm、空気量4.5±1.5%とした。BBは、このECMコンクリートと同一の呼び強度、スランブに対する工場の標準配合である。練混ぜは、実機、試験室とも強制二軸ミキサーにより行い、練混ぜ時間は材料投入後40秒とした。

2.3 試験の項目と方法

試験の項目と方法を表- 6に、また実験セットごとに実施する試験の組合せを表- 7に示す。同表中、フレッシュ試験は全てのケースで練上がり直後に行った。

本研究の焦点である構造体コンクリート強度は、簡易断熱養生供試体、およびコア供試体の2種類の推定方法に

表- 3 コンクリート材料

項目	記号	種類	物性値	備考
セメント	C	ECM(高炉セメントC種適合, 高炉スラグ微粉末4000プレーン)	密度 2.98g/cm ³	-
		高炉セメントB種	密度 3.04g/cm ³	-
細骨材 ^{*1}	S1	山砂(千葉県産)	表乾密度 2.58g/cm ³	-
	S2	石灰石砕砂(栃木県産)	表乾密度 2.65g/cm ³	-
粗骨材 ^{*2}	G1	石灰石砕石2005(埼玉県産)	表乾密度 2.70g/cm ³	-
	G2	石灰石砕石2005(栃木県産)	表乾密度 2.70g/cm ³	-
混和剤	Ad	ECMセメント用 高機能AE減水剤 標準型(試作品1)	密度 1.08g/cm ³	標準期シリーズ
		ECMセメント用 高機能AE減水剤 遅延型(試作品2)	密度 1.09g/cm ³	夏期シリーズ
		BB用 AE減水剤 遅延型種	密度 1.09g/cm ³	

*1 細骨材は、質量比でS1:S2=5:5の混合使用、混合密度2.62g/cm³

*2 粗骨材は、質量比でG1:G2=5:5の混合使用、混合密度2.70g/cm³

表- 4 調合

実験シリーズ	記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						Ad (C×%)	コンクリート仕様
				W	C	S1	S2	G1	G2		
標準期シリーズ	ECM-55	55	48.2	172	313	429	429	474	474	0.9	スランブ 18cm, 空気量4.5%
	ECM-45	45	46.0	175	389	391	391	474	474	0.9	
	ECM-38	38	43.2	179	471	350	350	474	474	0.9	
夏期シリーズ	ECM-S1	42	44.0	178	424	366	366	481	481	0.9	スランブ 18cm, 空気量4.5%, 呼び強度36
	ECM-S2										
	ECM-S3										
	BB										

表- 5 セメントの品質

品質	ECM			BB	
	試験成績	規格値 (JIS R 5211 C種)	試験成績	規格値 (JIS R 5211 B種)	
密度 (g/cm ³)	2.98	-	3.04	-	
比表面積 (cm ² /g)	4170	≥3300	3800	≥3000	
凝結 (h-min)	始発3-55 終結6-10	始発60min以上 終結10h以下	始発3-03 終結4-21	始発60min以上 終結10h以下	
安定性(バット法)	良	良	良	良	
圧縮強さ (N/mm ²)	18.2(材齢3日) 31.5(材齢7日) 52.0(材齢28日)	≥7.5(材齢3日) ≥15.0(材齢7日) ≥40.0(材齢28日)	21.6(材齢3日) 37.1(材齢7日) 64.6(材齢28日)	≥10.0(材齢3日) ≥17.5(材齢7日) ≥42.5(材齢28日)	
酸化マグネシウム (%)	5.0	≤6.0	3.4	≤6.0	
三酸化硫黄 (%)	3.6	≤4.5	2.2	≤4.0	
強熱減量 (%)	0.3	≤5.0	1.3	≤5.0	
塩化物イオン (%)	0.006	-	0.011	-	

表- 6 試験項目

測定内容	試験体(計測点)	試験条件・方法など
フレッシュ試験	-	スランブ, 空気量, 温度, 単位容積質量
ブリーディング試験	φ250×285mm	JIS A 1123
標準養生 供試体圧縮強度	φ100×200mm	JIS A 1108, 材齢28, 56, 91日
簡易断熱 供試体圧縮強度	φ100×200mm	JIS A 1108, JASS5T-606 材齢28, 56, 91日
コア供試体 圧縮強度	φ100×200mm	JIS A 1107, JASS5T-605 材齢28, 56, 91日
コンクリート温度	模擬柱部材(部材中心部, コア内側中心, コア外側中心) 簡易断熱供試体(断熱型枠内の供試体内部)	打設後7日

表- 7 試験実施の組合せ

実験シリーズ	記号	フレッシュ試験	ブリーディング試験	簡易断熱強度・標準養生強度	コア強度	コンクリート温度
標準期シリーズ	ECM-55	○	○	○	-	簡易断熱のみ
	ECM-45				○	模擬柱+簡易断熱
	ECM-38				-	簡易断熱のみ
夏期シリーズ	ECM-S1	○	-	○	-	簡易断熱のみ
	ECM-S2				-	簡易断熱のみ
	ECM-S3				○	模擬柱+簡易断熱
	BB				○	模擬柱+簡易断熱

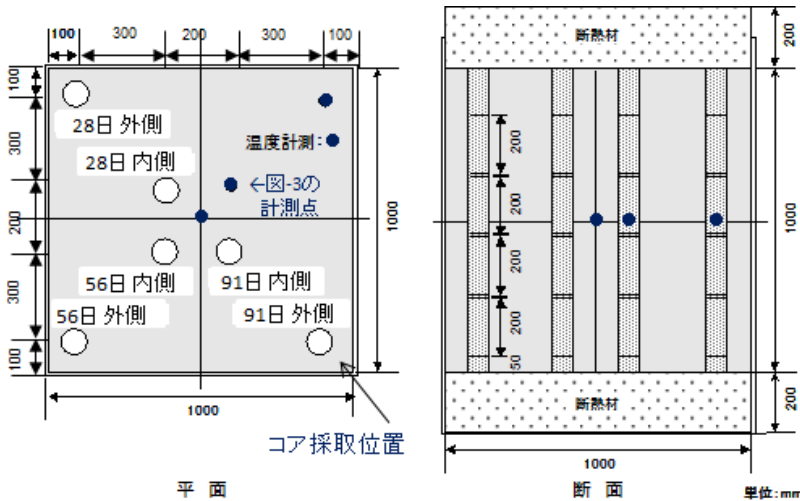


図- 1 柱模擬部材のコア採取位置



写真- 1 実験で用いた模擬柱部材の例

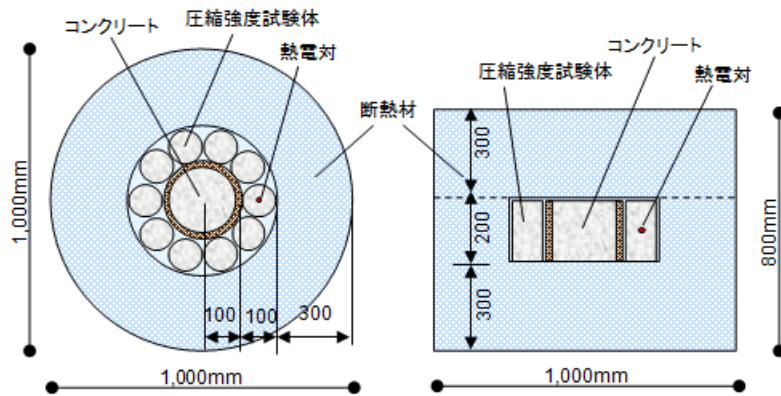


図- 2 簡易断熱養生の型枠



写真- 2 簡易断熱供試体の断熱型枠への設置状況

よる⁵⁾。これらに加え、構造体強度補正值（以降 $m_s S_n$ 値）の算定ため、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。ただし、模擬柱部材は、表- 7 に示すように、ECM-45, ECM-S3, および BB のみで制作した。

コア供試体および簡易断熱供試体は、それぞれ JASS5T-605, JASS5T-606 に基づき採取した。コア供試体は、上下を断熱材で覆い、柱中央部と類似の条件を有する 1m 角の模擬柱部材から採取した⁵⁾。本研究で用いた模擬柱部材の例とコア採取位置についてそれぞれ写真- 1 と図- 1 に示す。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。簡易断熱供試体は、図- 2 の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。供試体の断熱型枠への設置状況を写真- 2 に示す。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ試験およびコンクリート温度計測の結果

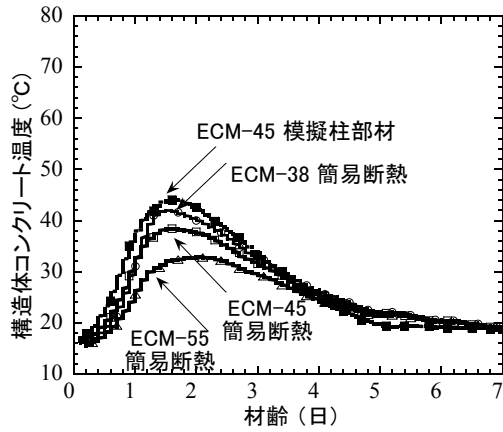
フレッシュ試験の結果を表- 8 に示す。夏期シリーズで、試験室練りの ECM-S2 のみがスランプ、空気量とも大き目の値となったが、全体としてスランプ、空気量と

表- 8 フレッシュ性状

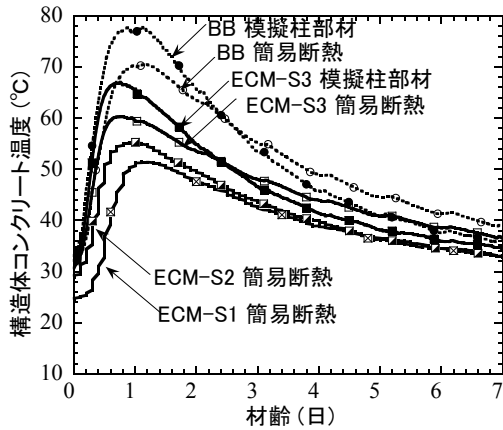
実験シリーズ	試験体	フレッシュ試験結果				フリーディング量 (cm^3/cm^2)	管理目標
		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	単位容積 質量 (kg/L)		
標準期シリーズ	ECM-55	21.5	4.8	14	2.27	0.17	スランプ19 $\pm 2.5\text{cm}$ 、 空気量4.5 $\pm 1.5\%$
	ECM-45	21.0	4.9	14	2.28	0.12	
	ECM-38	21.0	5.0	14	2.29	0.13	
夏期シリーズ	ECM-S1	17.0	4.0	25	-	-	スランプ18 $\pm 2.5\text{cm}$ 、 空気量4.5 $\pm 1.5\%$
	ECM-S2	20.0	6.0	29	2.27	-	
	ECM-S3	16.5	4.0	32	2.33	-	
	BB	16.5	4.3	32	2.31	-	

も目標とする管理範囲内の結果となった。また、セメント中のクリンカー量が少ない ECM コンクリートでは、フリーディング量が大きくなることが懸念されたが、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 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を下回った。

構造体コンクリートの温度履歴を図- 3 に示す（模擬柱部材のデータはコア内側に相当する点、図- 1 参照）。同図(a)の標準期の簡易断熱のデータを見ると、W/C55% と 38%を比較して、後者の方が最高温度が 10°C 程度高い。(b)の夏期では ECM-S3 の模擬柱部材では最高温度 70°C 近くに達したが、同一呼び強度の BB よりも 10°C ほど低い結果となった。これより、ECM コンクリートは BB に



(a) 標準期シリーズ



(b) 夏期シリーズ

図-3 構造体コンクリート温度履歴の例

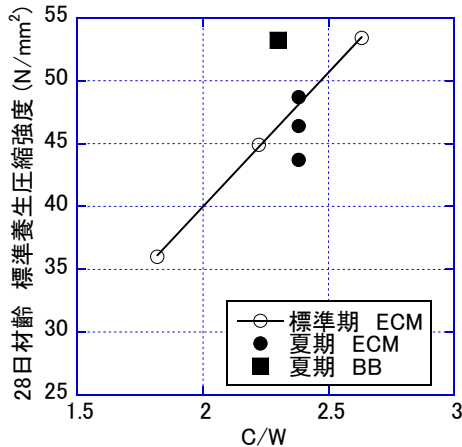


図-4 標準養生強度に及ぼす C/W の影響

対して温度上昇量が小さく、温度ひび割れ制御の観点からは有利と推察される。また、ECM-S1～S3の簡易断熱の温度履歴の違いを見ると、最高温度で10℃程度の違いがあり、打設日の外気温の違いを反映している。

3.2 コンクリート圧縮強度

表-9および表-10にコンクリート圧縮強度の試験結果を示す。全体として、ECMコンクリートの標準養生強度に対して簡易断熱、コア強度は小さく、既存セメントと類似の傾向であった。図-4は、標準養生強度に及ぼ

表-9 標準期シリーズにおける圧縮試験および温度計測の結果

供試体	供試体種類	練上温度 (°C)	最高温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)			
				材齢 7日	材齢 28日	材齢 56日	材齢 91日
ECM-55	簡易断熱	14	32.8	-	31.4	35.1	36.7
	標準養生		-	26.1	36.0	40.5	42.1
ECM-45	簡易断熱	14	38.4	-	37.2	40.2	42.5
	コア(内側)		44.1	-	39.3	43.4	43.7
	コア(外側)		34.0	-	36.5	37.6	38.3
	コア(平均)		39.1	-	37.9	40.5	41.0
	標準養生		-	34.4	44.9	49.1	52.2
ECM-38	簡易断熱	14	42.0	-	42.9	45.8	47.2
	標準養生		-	41.8	53.4	58.5	59.8

表-10 夏期シリーズにおける圧縮試験および温度計測の結果

供試体	供試体種類	練上温度 (°C)	最高温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)			
				材齢 7日	材齢 28日	材齢 56日	材齢 91日
ECM-S1	簡易断熱	25	51.4	-	43.5	46.2	47.8
	標準養生		-	35.3	48.7	53.5	55.9
ECM-S2	簡易断熱	29	55.3	-	37.8	40.8	42.5
	標準養生		-	32.5	43.7	48.5	51.0
ECM-S3	簡易断熱	32	60.3	-	39.4	41.5	42.1
	コア(内側)		67.1	-	41.2	42.6	43.1
	コア(外側)		53.0	-	40.7	46.5	45.3
	コア(平均)		60.1	-	41.0	44.5	44.2
	標準養生		-	37.8	46.4	52.5	56.4
BB	簡易断熱	32	70.0	-	46.2	47.4	48.6
	コア(内側)		78.0	-	48.0	50.4	48.1
	コア(外側)		60.6	-	49.7	55.2	55.1
	コア(平均)		69.3	-	48.9	52.8	50.7
	標準養生		-	39.8	53.2	59.3	64.2

ECM-S1～S3 簡易断熱強度 (N/mm²): 平均 44.1 標準偏差 3.18

ECM-S1～S3 標準養生強度 (N/mm²): 平均 46.3 標準偏差 2.50

す C/W の影響を示している。図中、標準期シリーズのデータから、ECMコンクリートの強度と C/W は線形関係にあり、既存セメントの場合と同様であることがわかる。また、夏期シリーズの標準養生強度は標準期に比べ低くなる傾向が伺われる。さらに、同一 C/W の場合には、ECMコンクリートはBBと比べ強度が10～20%程度小さくなると推定される。

図-4で、ECM-S1～S3の簡易断熱強度の違いは5N/mm²程度であり、図-3で示した10℃の最高温度の違いも反映していると考えられる。しかし、ECM-S1～S3の簡易断熱強度の標準偏差は3.18N/mm²であり、標準養生強度の標準偏差2.50N/mm²と大きな相違はなく、安定した簡易断熱強度の値が得られている(表-10の下参照)。また、これらの標準偏差の値は、レディクミストコンクリートにおける一般的な変動係数の上限10%と比較して大きな違いは見られず、安定したコンクリート製造ができたことを示している。

4. 考察

4.1 強度発現曲線

表-9および表-10の強度発現性状が既存式で表現可

表- 11 CEB-FIP90 による近似式の係数と相関係数

実験シリーズ	供試体	供試体種類	α_f	S_f	相関係数R
標準期シリーズ	ECM-55	簡易断熱	0.88	0.33	1.00
		標準養生	1.01	0.32	1.00
	ECM-45	簡易断熱	1.03	0.29	1.00
		標準養生	1.27	0.28	1.00
	ECM-38	簡易断熱	1.19	0.21	1.00
		標準養生	1.50	0.24	1.00
夏期シリーズ	ECM-S1	簡易断熱	1.11	0.32	1.00
		標準養生	1.35	0.31	1.00
	ECM-S2	簡易断熱	0.93	0.45	1.00
		標準養生	1.23	0.30	1.00
	ECM-S3	簡易断熱	1.00	0.32	0.99
		標準養生	1.35	0.27	0.98
	BB	簡易断熱	1.17	0.27	0.99
		標準養生	1.51	0.32	0.99

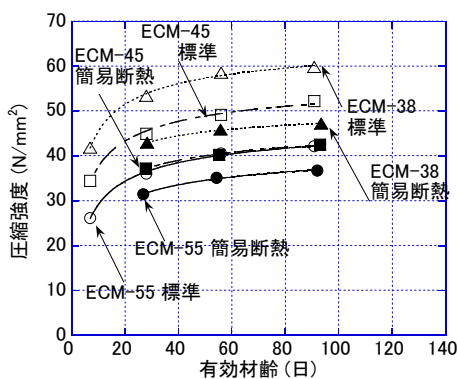
能か検証する。強度発現の表現は、CEB-FIP90⁶⁾による式(1)、(2)を用いた。式(1)は、温度依存性を考慮した有効材齢 t_n を表し、式(2)は t_n の関数による圧縮強度発現式である。式(2)中の終結材齢として一律に 0.4 日を用い、最小二乗法により近似して α_f 、 S_f を求めた結果を表- 11 に示す。また、図- 5 には近似式と実験データを併せて示す。これらから、CEB-FIP90 による近似式で既存セメントの場合と同様に強度発現曲線を精度よく再現可能であった。なお、有効材齢を算出するにあたり、コンクリート温度の計測終了後については気象庁の日平均気温を用いた。

$$t_n = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \cdot \exp \left\{ 13.65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i) - T_0}{T_0}} \right\} \quad (1)$$

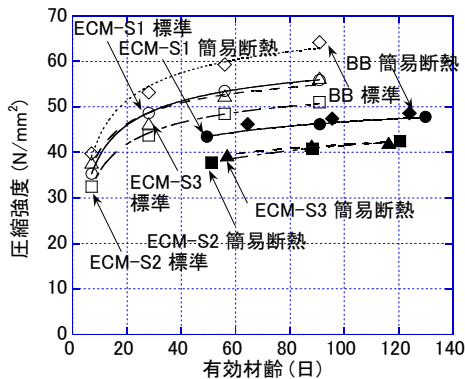
ここに、 t_n : 有効材齢(日)、 Δt_i : コンクリート温度が $T(\Delta t_i)$ °C である期間の日数(日)、 T_0 : 1(°C)

$$f_c(t_n) = \alpha_f \cdot f_c(28) \cdot \exp \left\{ S_f \cdot \left(1 - \left(\frac{28 - t_{fs}}{t_n - t_{fs}} \right)^{0.5} \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、 $f_c(t_n)$: 有効材齢 t_n 日の圧縮強度(N/mm²)、 $f_c(28)$: 28 日材齢時の圧縮強度(N/mm²)、 α_f 、 S_f : 最小 2 乗法により求めた係数、 t_{fs} : 終結材齢(日)



(a) 標準期シリーズ



(b) 夏期シリーズ

図- 5 CEB-FIP90 による強度発現の近似

4.2 構造体コンクリート強度および mS_n 値に及ぼす実験要因の影響

図- 6 は、本研究で構造体コンクリート強度の代表値として採用した簡易断熱供試体強度とコア供試体強度を比較したものである。この図より、本研究における ECM コンクリート、BB では、簡易断熱に比べコア供試体強度のほうが大きい傾向となり、一般的な場合と比べ逆転する結果となった。この原因は本研究の範囲では明らかでないが、高強度域を中心とした簡易断熱とコア供試体強度を比較した既往のデータによれば、普通ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントとは反対に、高炉セメント B 種によるコンクリートではコア供試体強度の方が大きくなる傾向が示されており⁷⁾、本研究の結果と整合している。この結果に再現性があるとするれば、 mS_n 値を把握するため、コア供試体強度に代えて簡易断熱供試体強度を用いることで、より少ない労力にてかつ安全側の評価ができる可能性がある。

図- 7 は、標準期シリーズの $_{28}S_{91}$ 値に与える W/C の影響を示している。 $_{28}S_{91}$ 値は、材齢 28 日の標準養生供試体強度とコア供試体強度との差、もしくは断熱養生供試体強度との差である。同図から、簡易断熱供試体強度による $_{28}S_{91}$ 値は、水セメント比が小さいほど大きくなる傾向が顕著である。また、JASS 5 2009 による高炉セメント B 種を用いたコンクリートの標準期における $_{28}S_{91}$ 値の標準的な値は 3 N/mm² で、ECM コンクリートでも水セメント比 45% 程度以上であれば同程度の値となるが、これより低い領域では大きな値となることがわかる。

図- 8 は、夏期シリーズにおける $_{28}S_{91}$ 値の結果である。夏期シリーズに対応する暑中期について、JASS 5 2009 で示されている高炉セメント B 種によるコンクリートの標準的な $_{28}S_{91}$ 値は 6 N/mm² であるが、今回の実験による ECM コンクリートの $_{28}S_{91}$ 値はこれを安定して下回る。

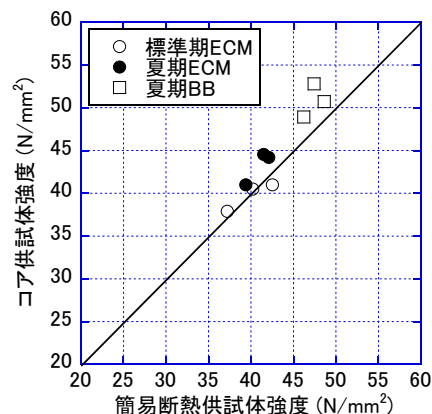


図- 6 簡易断熱供試体強度とコア供試体強度の比

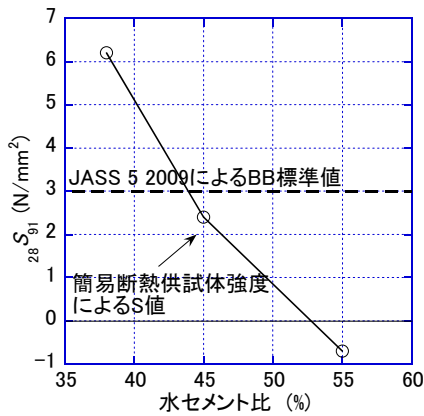


図-7 標準期の構造体コンクリート強度およびS値に及ぼすW/Cの影響

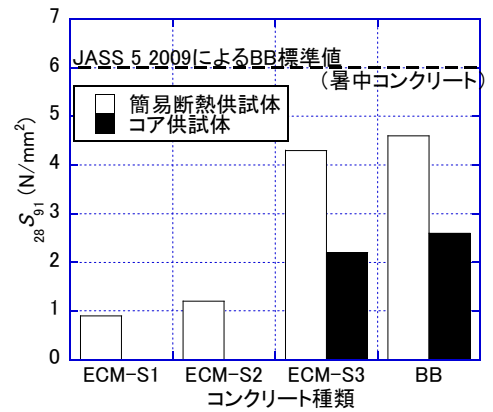


図-8 ECMおよびBBの夏期S値の比較

5. まとめ

本研究では、高炉スラグ高含有セメントによる ECM コンクリートの構造体コンクリート強度について実験的に検討し、その結果次の結論を得た。

- (1) ECM コンクリートの夏期シリーズの標準養生および簡易断熱養生の強度のばらつきは一般的な値の範囲にあり、安定した製造ができたと考えられる。
- (2) ECM コンクリートの構造体コンクリート強度の評価値のうち、簡易断熱供試体強度よりも模擬柱部材のコア供試体強度の方が大きい傾向を示した。
- (3) ECM コンクリートの簡易断熱供試体強度および標準養生供試体強度ともに、CEB-FIP90に基づく有効材齢の関数で表される強度発現式により精度よく再現が可能であった。
- (4) ECM コンクリートの標準期における構造体コンクリート強度は、既存セメントによるコンクリートと同様に標準養生強度よりも小さくなり、その低下程度を表す強度補正值 $_{28}S_{91}$ は水セメント比が小さくなるほど増加する傾向を示した。
- (5) 夏期に打設した ECM コンクリートの模擬部柱部材の内部温度は最高 70°C 近くに達したが、高炉セメント B 種よりも 10°C 程度低く、温度ひび割れ制御の観点から優位となる可能性がある。
- (6) ECM コンクリートの標準期における構造体コンクリート強度の強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、水セメント比 45% 程度以上の場合には、JASS5 における高炉セメント B 種の標準値と同等以下であった。
- (7) ECM コンクリートの夏期における構造体コンクリート強度の強度補正值 $_{28}S_{91}$ は高炉セメント B 種コンクリートと概ね同等の値を示し、JASS5 の夏期における後者に対する標準値よりも小さい結果であった。

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」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学 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) の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。また、実験に際し、アサノコンクリート (株) の関係各位には多大なるご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：環境時代におけるコンクリートイノベーションーコンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会報告書，2008
- 2) コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告，2010
- 3) 坂田昇ほか：高炉スラグ微粉末を大量に混合した RCD コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 32, No.1, pp.191-196, 2010
- 4) 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
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2009
- 6) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON：CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1991
- 7) 村上利憲ほか：高強度コンクリート性能評価ー構造体コンクリート強度を確保するための標準的な水セメント比，GBRC, No.114, pp.2-13, 2003.10