

論文 エコセメントを用いるコンクリートの強度発現と混和材による長期強度の改善

佐藤 幸恵*1・榎田 佳寛*2

要旨 : エコセメントを使用したコンクリートは、長期材齢において強度発現が停滞することが知られている。本研究では、エコセメントを使用したコンクリートの強度発現性を評価するとともに、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和材として使用し、長期強度の改善について検討を行った。その結果、高炉スラグ微粉末では材齢 28 日以降の強度発現が改善される結果を得たが、フライアッシュを使用した場合は、内割で使用すると長期強度の改善効果はみられなかった。

キーワード : エコセメント, 強度発現, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ

1. はじめに

近年、環境問題への関心が高まり、都市ゴミ焼却灰を主原料とするセメントが 2002 年に JIS R 5214「エコセメント」として制定され、2003 年には JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」のセメント材料に記載されるなど、利用促進に向けた整備が進められている。しかし、エコセメントについては、実験・研究実績が乏しく、建築物に適用するには国土交通大臣の材料性能認定が必要とされている。

エコセメントを使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べて、材齢 28 日以降の強度増進が小さくなる傾向があるといわれている¹⁾²⁾。これは、エコセメントは、長期強度に寄与する C₂S 量が少なく、間隙相 (C₃A, C₄AF) が多いため、長期強度の増進が小さくなると考えられている。

既往の研究では、エコセメントの長期強度改善と流動性対策を目的として、石灰石微粉末および高炉スラグ微粉末を使用した例がある³⁾⁴⁾が、さらにデータの蓄積が必要であると考えられる。

本研究では、エコセメントの建築構造物への

適用を前提に、その強度発現性を評価するとともに、長期材齢における強度発現性状の改善を目的とした混和材使用について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

本研究は、長期強度の発現性については、混和材を使用せず、長期的な強度発現性を評価したシリーズ I、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ II 種を混和材として用い、その長期強度発現性への寄与度について検討を行ったシリーズ II と、それらの結果を基に、温度依存性、すなわち低温時における強度発現および簡易断熱養生による強度発現について検討を行ったシリーズ III の 3 つのシリーズからなる。

それらの実験の要因と水準を表-1 に示す。気中養生は材齢 7 日で脱型し、20°C、60%RH の養生室内で養生に供した。

シリーズ II における各混和材の添加率は、高炉スラグ微粉末は 40%、フライアッシュは 20% とし、それぞれ内割、外割の両水準を設定した。

シリーズ III では、使用混和材は高炉スラグ微

*1 東京理科大学 理工学部土木工学科助手 博士 (工学) (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

表－1 実験の要因と水準

要因	水準		
	シリーズI	シリーズII	シリーズIII
セメント種類	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント
	普通エコセメント	普通エコセメント	普通エコセメント
混和材種類	-	フライアッシュ(II種)	-
		高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末
水結合材比	45%, 55%, 65%	43%, 50%, 60%	40%, 50%, 60%
BS添加率	-	40%(内割,外割)	27,42%(内割)
FA添加率	-	20%(内割,外割)	-
養生条件	20℃水中(W), 20℃封かん(S), 20℃気中養生	20℃水中(W), 20℃封かん(S)	20℃水中(W), 20℃・5℃封かん(S), 簡易断熱養生
材齢	3, 7, 28, 91, 182, 365日	7, 28, 91, 182日	7, 28, 91, (182)日

表－2 使用材料の品質

使用材料	記号	品質
普通ポルトランドセメント	OPC	密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3310cm ² /g
普通エコセメント	EC	密度:3.17g/cm ³ ,比表面積:4220cm ² /g
フライアッシュ(II種)	FA	密度:2.29g/cm ³ ,比表面積:3760cm ² /g
高炉スラグ微粉末(4社混合)	BS	密度:2.89g/cm ³ ,比表面積:4590cm ² /g
大井川産川砂	S	密度:2.59g/cm ³ , FM:2.88
青梅産硬質砂岩砕石	G	密度:2.66g/cm ³ , FM:6.83
AE減水剤	WR	リグニンスルホン酸系
AE剤	AE	アルキルエーテル系

粉末のみとし、混和材置換率は 27, 42%の 2 水準とした。養生は、5℃および 20℃の一定温度条件と、簡易断熱養生を行った。なお、簡易断熱養生の打込みは、平成 17 年 9 月下旬から 10 月中旬の標準期

に行った。図－1 に、簡易断熱養生の供試体概要を示す。図に示すように、ブリキ製軽量型枠にコンクリートを打ち込み、ラップ養生を行った供試体を断熱容器内に設置した。断熱容器は、直射日光の当たらない屋外に設置し、図中に示す 3 か所に熱電対を設置し、温度履歴の測定を行った。

表－2 に使用材料の品質を示す。高炉スラグ微粉末は 4 社等量混合品を使用した。

2.2 試験項目

試験項目は、フレッシュ時の試験としてスランプ試験および空気量試験、硬化後の試験として各材齢における圧縮強度試験を、それぞれ該当する JIS の試験方法に準じて行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 計画調査およびフレッシュ試験

表－3 に計画調査とフレッシュ性状の試験結

果を示す。エコセメントは、普通ポルトランドセメントと比較して、AE 剤を同一割合添加した場合に空気量が小さくなる傾向があった。

3.2 強度発現性状

(1) シリーズ I

図－2 に水中養生の水セメント比別の圧縮強度を示す。図－3 に封かん養生および気中養生の水セメント比別の圧縮強度を示す。材齢 3 日、7 日での圧縮強度は EC が OPC を上回った。これは、OPC より EC の方がセメントの比表面積が大きいこと、初期の水和反応が OPC より早く進行したことが原因の一つと考えられるが、両者の差は水中、封かん養生ともに 1~3N/mm²であったため、エコセメントを早強タイプのセメントとして扱う目的で考えた場合のメリットは小さいと考えられる。材齢 28 日では EC と OPC の圧縮強度はほぼ同等であるが、OPC が材齢 91 日以降に強度発現が停滞するのに対し、EC は材

表-3 計画調査およびフレッシュ試験結果

調査名	調査名	結合材種類	混和材置換率 (%)	W/C (W/B) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					化学混和剤		フレッシュ試験	
						W	C	Ad	S	G	WR	AE	スランブ (cm)	空気量 (%)
											B×wt%	(A)		
シリーズ I	OPC65	OPC	0	65	44.3	174	268	0	811	1019	0.25	1.5	19.0	4.6
	OPC55	OPC	0	55	42.9	175	318	0	767	1019	0.25	1.5	20.2	4.6
	OPC45	OPC	0	45	40.9	176	391	0	705	1019	0.25	1.5	18.7	4.8
	EC65	EC	0	65	43.9	178	274	0	796	1019	0.25	1.5	19.3	3.3
	EC55	EC	0	55	42.4	179	325	0	752	1019	0.25	1.5	19.3	3.3
	EC45	EC	0	45	40.3	180	400	0	688	1019	0.25	1.5	16.9	3.8
シリーズ II	OPC6	OPC	0	60	45.8	170	283	0	825	1003	0.25	1.5	19.8	5.2
	EC6-2	EC	0	60	45.6	172	287	0	817	1003	0.25	1.7	18.0	4.1
	EC5-2	EC	0	50	43.8	174	348	0	762	1003	0.25	1.7	18.8	4.3
	EC4-2	EC	0	43	42.0	176	409	0	707	1003	0.25	1.7	17.5	4.0
	BS6	EC+BS	40	60	45.3	172	172	115	808	1003	0.25	2.5	19.7	4.5
	BS4	EC+BS	40	43	41.6	176	293	117	696	1003	0.25	2.5	14.6	4.0
	FA6	EC+FA	20	60	45.0	172	229	57	799	1003	0.25	2.5	19.5	3.5
	FA5	EC+FA	20	50	43.2	174	290	58	744	1003	0.25	3.0	19.5	4.0
シリーズ III	EC6-3	EC	0	60	44.8	178	297	0	794	1003	0.25	2.2	19.5	4.7
	EC5-3	EC	0	50	43.0	180	360	0	737	1003	0.25	2.6	19.0	5.5
	EC4-3	EC	0	40	39.6	185	463	0	640	1003	0.50	3.2	16.5	3.3
	BS6-A	EC+BS	27	60	44.6	178	217	80	787	1003	0.25	3.0	21.0	5.3
	BS5-A	EC+BS	27	50	42.7	180	263	97	729	1003	0.25	3.0	20.0	5.0
	BS4-A	EC+BS	27	40	39.2	185	338	125	630	1003	0.50	4.0	16.5	3.5
	BS6-B	EC+BS	42	60	44.5	178	172	125	784	1003	0.25	3.0	20.0	4.5
	BS5-B	EC+BS	42	50	42.6	180	209	151	725	1003	0.25	3.3	20.0	5.4
	BS4-B	EC+BS	42	40	39.0	185	268	194	625	1003	0.50	4.5	19.0	3.6
	OPC5	OPC	0	50	43.0	180	360	0	736	1003	0.25	2.0	19.5	4.0

齢 28 日経過後から強度発現が停滞している。既往の研究結果と同様に、長期強度発現の増加が普通ポルトランドセメントより小さいことが認められた。

乾燥の影響による長期強度発現性への影響は、普通ポルトランドセメントと比較して、強度発現の停滞については、大きな違いは見られなかった(図-3)。また、気中養生の場合、エコセメントの方がいずれも強度が高い傾向にあった。

これは、初期強度発現が普通ポルトランドセメントよりも早いことにより、組織が緻密化し、乾燥による影響を受けにくいためと考えられるが、一方で、エコセメントを使用したコンクリートは若干ポーラスであるとの報告⁵⁾もあるため、細孔径分布などの測定を行い、詳しく

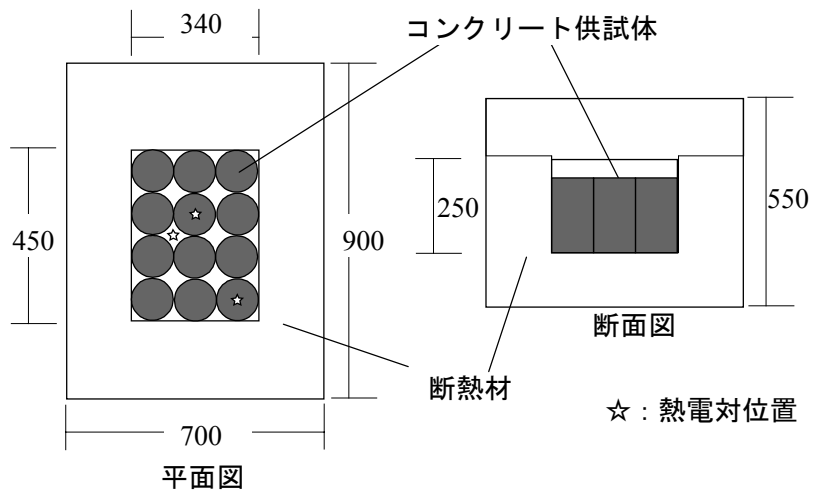


図-1 シリーズ III 簡易断熱養生供試体概要

検討していく必要があると考えられる。

シリーズ I の結果から、エコセメントの基本的な強度発現性状を評価すると、材齢初期から 28 日程度までは普通ポルトランドセメントと同等に扱っても差し支えないが、長期的な強度発現を期待するような場合にはなんらかの改善措置

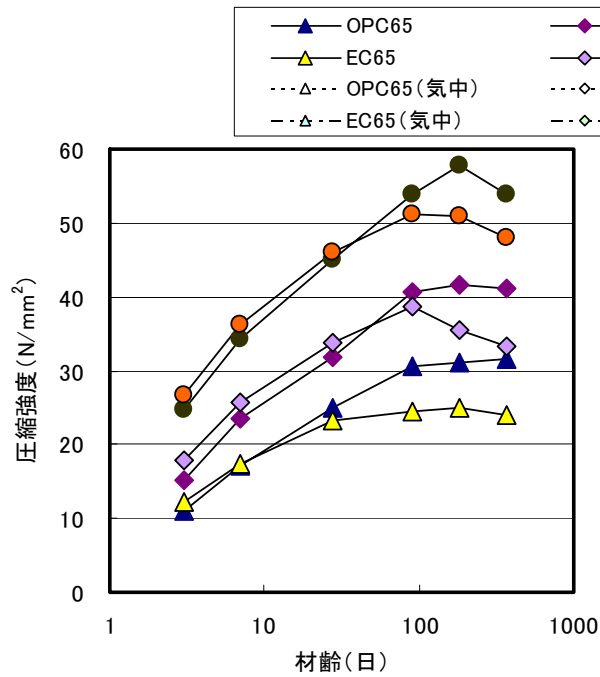


図-2 シリーズI 強度試験結果
(水中養生)

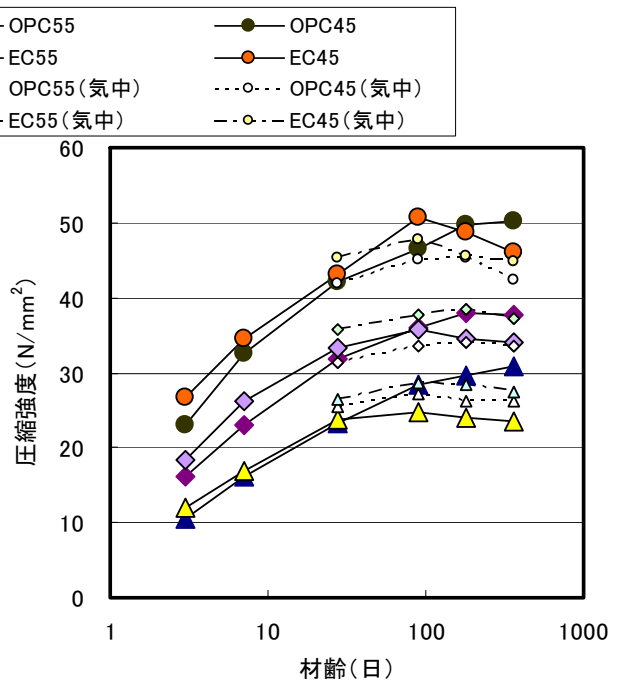


図-3 シリーズI 強度試験結果
(封かん・気中養生)

が必要であるといえる。28日以降での強度増進が期待できないことから、建築分野における強度管理材齢は28日としておくことが望ましいと考えられる。

(2)シリーズII

図-4, 図-5に、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用した場合の強度発現性状を示す。図-4より、EC6に内割で添加したBS6, FA6を混和材無添加のEC6と比較すると、エコセメントのみのEC6の方が最も初期強度が高くなるが、BS6は材齢28日でEC6と同程度の強度となり、材齢91日, 182日になるとEC6より大きな値を示した。一方FA6は材齢7日, 28日ではEC6より小さい強度だが、材齢182日でEC6と同程度の強度となった。次に、外割添加したBS4, FA5と無添加のEC6を比較すると、BS4は初期材齢からEC6より大きな値を示している。FA5は材齢7日ではEC6と同程度の強度だが28日以降になるとEC6より大きな値を示した。高炉スラグ微粉末, フライアッシュともに外割添加の場合は、無添加よりも初期材齢から強度は大きくなる傾向があった。

フライアッシュで外割添加のみで効果があり、

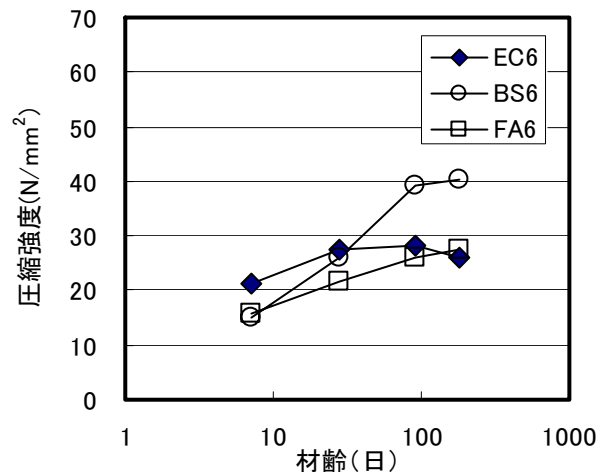


図-4 シリーズII 強度試験結果
(内割添加・水中養生)

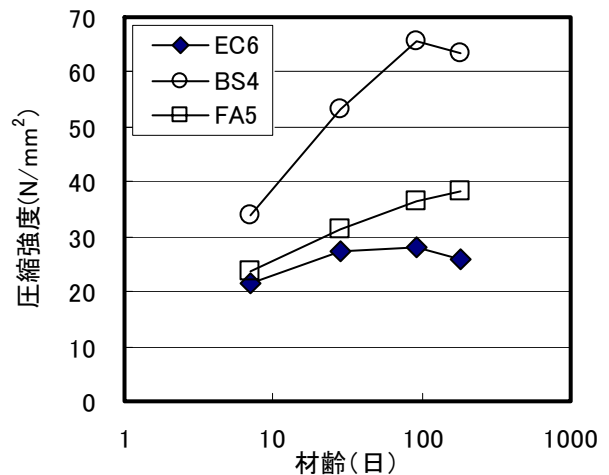


図-5 シリーズII 強度試験結果
(外割添加・水中養生)

高炉スラグ微粉末の効果と異なった理由としては、フライアッシュのポゾラン反応は水酸化カルシウムの生成量に依存し、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性はアルカリ刺激により反応し水酸化カルシウムの生成量に依存しないという、両者の反応機構の違いが影響し、エコセメントの水和反応の際に生成されるケイ酸カルシウム化合物および水酸化カルシウムの量が普通ポルトランドセメントよりも少ないことが顕著な差となったと考えられる。

これらの結果から、長期強度の改善という目的で用いるには、フライアッシュでは外割で使用する場合にのみ効果があり、高炉スラグ微粉末は内割・外割ともに強度改善に効果がある。よって、高炉スラグ微粉末を添加する方が効率良く効果を期待できると考えられる。

(3)シリーズ III

シリーズ III では、シリーズ II の結果から、高炉スラグ微粉末を内割り添加した場合の各種養生条件下での強度発現について検討を行った。

図-6 に、簡易断熱養生における温度履歴を示す。高炉スラグ微粉末を 27%添加した場合には、無添加とほぼ同程度の最高温度を示したが、42%添加した場合には、約 5℃程度最高温度が低くなる傾向があった。

図-7 に、積算温度と圧縮強度の関係を添加の有無ごとに示す。BS5,BS6 における添加率 27% (A), 42% (B) を比較した場合、低温養生での

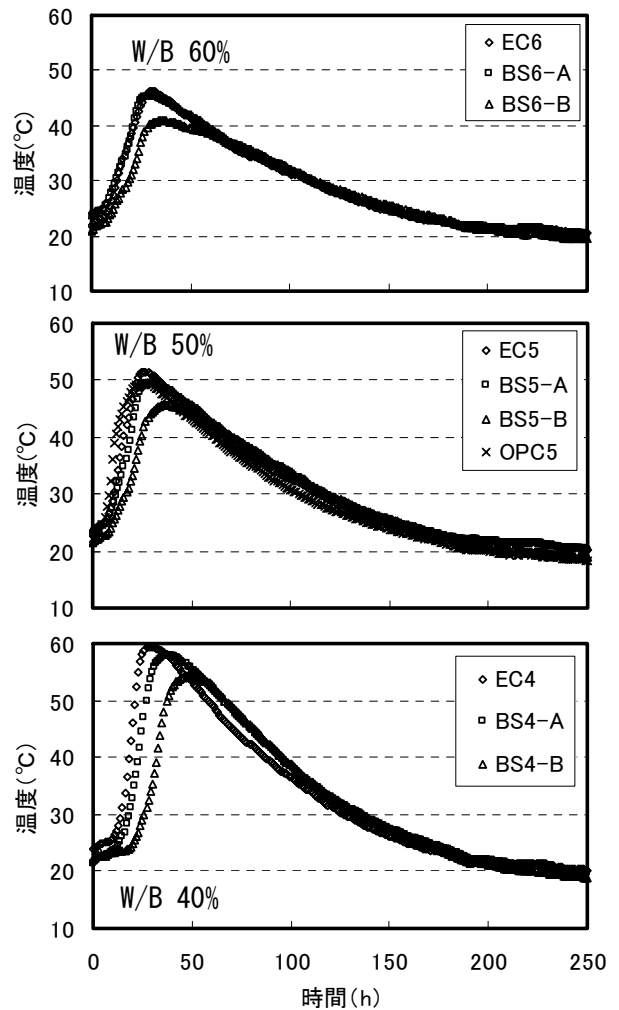


図-6 シリーズ III 簡易断熱養生 温度履歴

初期強度発現は、無添加と比較して A,B ともに小さくなるが、添加率による影響はほとんどなかった。また、エコセメントのみの場合は、簡易断熱養生での強度増進が小さく、低温養生での

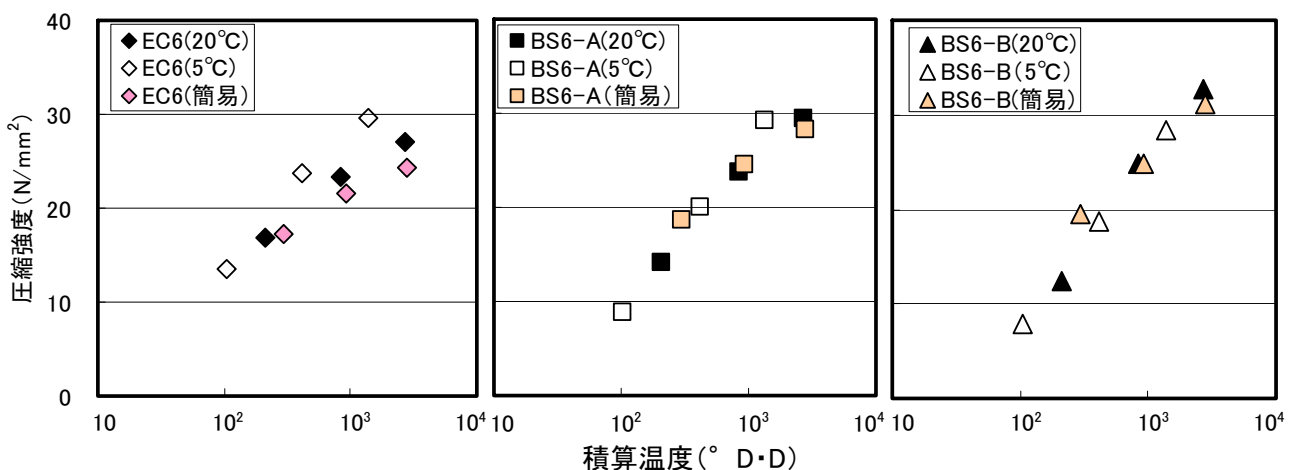


図-7 シリーズ III 積算温度と圧縮強度の関係 (封かん養生・W/B60%の場合)

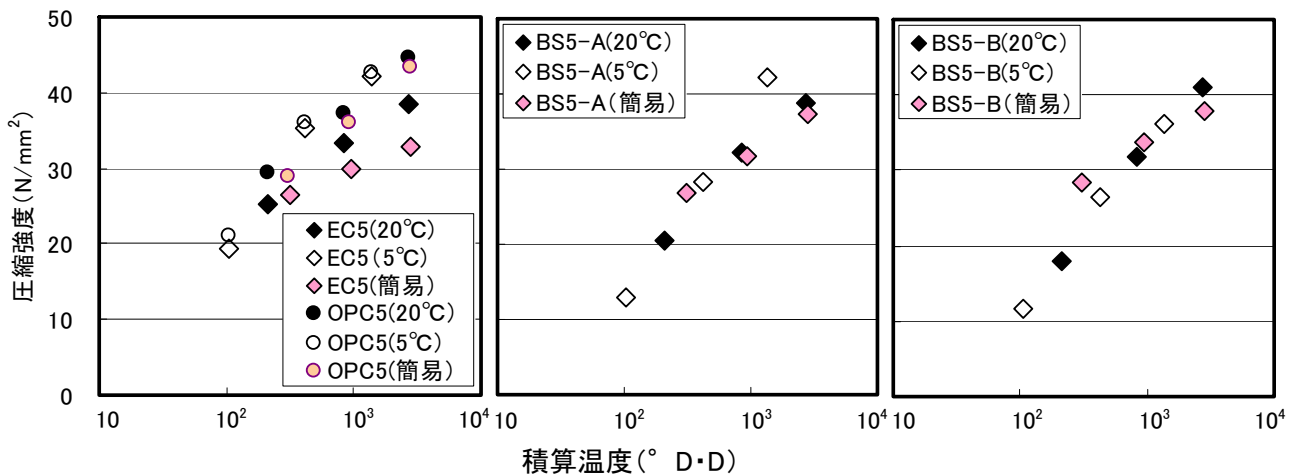


図-7 シリーズ III 積算温度と圧縮強度の関係 (封かん養生・W/B50%の場合)

強度発現との差も大きくなり、同一積算温度でも約 10N/mm^2 程度差が生じている。これらの現象を解明するためには、高温履歴を受けた場合の水和生成物の状態が長期強度発現性に及ぼす温度依存性の影響をさらに検討していく必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) エコセメントを使用したコンクリートの強度発現は、91 日以降の長期材齢において停滞する傾向がある。普通ポルトランドセメントと比較した場合、水中養生における強度発現性の差が大きくなる。
- (2) フライアッシュと高炉スラグ微粉末を添加した場合、高炉スラグ微粉末の方が強度発現への寄与効果が大きい。
- (3) 簡易断熱養生における温度履歴は、高炉スラグ微粉末を 42% 添加することで最高温度を約 5°C 低減することが出来る。
- (4) 各種温度条件下での強度発現性は、エコセメントのみを使用した場合、同一積算温度における強度発現の差が大きくなる傾向があり、強度発現に対する温度依存性の影響が大きいことが明らかとなった。

強度発現性の温度依存性については、今後

さらに検討していく必要がある。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、宇都宮大学 元卒論生 笛木進君 (現：戸田建設)、修論生 戸室祐介君の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 棚野ほか: 環境負荷低減型セメントを使用したコンクリートの基本性能に関する実験的研究 (その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.187-192, 2001.9
- 2) 長塩ほか: 普通エコセメントを用いたコンクリートの長期強度性状, 第58回セメント技術大会講演要旨, pp.102-103, 2004.5
- 3) 多田ほか: 普通エコセメントを用いたコンクリートの高性能化と長期強度改善に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.81-82, 2005.9
- 4) 平尾ほか: エコセメントの流動性および強度発現性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.97-104, 2003
- 5) 長塩ほか: 普通エコセメントを用いたコンクリートの海洋環境下への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1479-1484, 2004.6