

論文 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質

和地 正浩^{*1}・米澤 敏男^{*2}・三井 健郎^{*3}・井上 和政^{*4}

要旨: セメント・コンクリートのエネルギーと CO₂ の削減を目的に試作した高炉スラグ高含有セメント (ECM セメント) を用いたコンクリートについて、圧縮強度、乾燥収縮、自己収縮、中性化等の基礎的性質を調べ、構造体への適用性を検討した。その結果、普通ポルトランドセメントや高炉 B 種セメントを用いたコンクリートと比較して、材齢 1 日の圧縮強度は小さいものの、材齢 28 日の圧縮強度はほぼ同等であること、中性化速度は大きいものの乾燥収縮やクリープは相当に小さいこと等がわかった。また、中性化の影響の少ない 40 ~ 60N/mm² レベルの鋼管コンクリート等に対する適用可能性を有すると考えられた。

キーワード: 高炉スラグ, 高炉スラグ高含有セメント, ECM セメント, 圧縮強度, 乾燥収縮, 中性化

1. はじめに

地球温暖化の問題に対応するため、国ごとに CO₂ 削減目標を定めるなど、国際的な動きが加速しつつある。セメント製造時のエネルギーと材料由来の CO₂ は国内 CO₂ 排出量の約 4% と言われており、これら CO₂ の削減が必要とされている。

一方、ポルトランドセメントを高炉スラグに置き換えることは、クリンカーの使用量を低減できることから、CO₂ の発生量を大きく削減するための有効な手段であるが、一般的に、高炉スラグを混入したセメントは、初期強度の発現が遅く、自己収縮や乾燥収縮が大きいなどの課題を有している。これに対し、無水石膏の割合を調整することで、それらが改善されることも報告されている¹⁾。また、高炉スラグを含むセメントは養生温度に敏感であるとの指摘もあり²⁾、実用化にあたってはこれらの点について、十分な検討が必要である。

本論文は、高炉スラグ含有率 60~75% の試作した高炉スラグ高含有セメント (以下、ECM セメント、ECM は「エネルギー・CO₂ ミニマム」の略) を用いたコンクリートの基礎的性質を調べ、実用化の可能性について検討したものである。

本論文は 3 つの実験より構成されており、実験 1 において ECM セメントを用いたコンクリートの基礎的性質を検討している。実験 2 と実験 3 では、実験 1 の結果か

ら ECM セメントの適用可能性が考えられる領域について初歩的な検討を行っている。

2. 基礎的性質の検討 (実験 1)

2.1 実験概要

高炉スラグ含有量 60~75% の 3 種の ECM セメントと高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 50% のフレッシュコンクリートと硬化コンクリートの性質を調べ、ECM セメントを使用したコンクリートの基礎的性質を検討した。

2.2 使用材料とコンクリートの配 (調) 合

セメントの物理的性質と化学成分、その他の使用材料の物理的性質等を表-1、表-2 に示す。コンクリートの配 (調) 合を表-3 に示す。図-1 は普通セメントの CO₂ 原単位を 750kg/t とし、高炉スラグで普通セメントを置き換えるとその分 CO₂ 原単位が小さくなるとして求めた各セメントの CO₂ 原単位を示す。高炉セメント B 種の高炉スラグ含有量は 45% としている。CO₂ を削減する上で高炉スラグの含有量の高いセメントを使用するのが有効なことが明らかである。

2.2 試験項目と試験方法

試験項目と試験方法を表-4 に示す。圧縮クリープ試験は ASTM C 512 に準拠し、20℃、60% の環境にて φ150 × 300mm の試験体を 3 体重ねて、材齢 28 日から軸力比

表-1 ECM セメントの物理的性質と化学成分

	高炉スラグ微粉末		セメントの密度 (g/cm ³)	セメントの比表面積 (cm ² /g)	セメントの化学成分 (mass%)											
	含有量 (mass%)	比表面積による種類			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ig-loss
ECM1	60	4000	2.98	3920	26.17	10.02	1.26	48.67	4.19	6.44	0.28	0.33	0.47	0.09	0.24	0.42
ECM2	60	6000	2.98	5500	26.68	10.34	1.23	48.88	4.02	6.44	0.26	0.30	0.47	0.09	0.20	0.78
ECM3	75	4000	2.96	4070	28.05	11.34	0.84	45.40	4.85	6.13	0.27	0.33	0.52	0.06	0.29	0.24

*1 (株) 竹中工務店技術研究所 建設技術研究部材料部門研究員 工修 (正会員)

*2 (株) 竹中工務店技術研究所 リサーチフェロー Ph.D (正会員)

*3 (株) 竹中工務店技術研究所 建設技術研究部材料部門マネージャー 博士 (工学) (正会員)

*4 (株) 竹中工務店技術研究所 建設技術研究部材料部門グループリーダー 博士 (工学) (正会員)

表-2 使用材料 (実験 1)

材料	記号	種別, 物理的性質等
セメント	ECM1	試作セメント1 密度: 2.98 g/cm ³ 高炉スラグ: 4000プレーン, 含有量60%
	ECM2	試作セメント2 密度: 2.98 g/cm ³ 高炉スラグ: 6000プレーン, 含有量60%
	ECM3	試作セメント3 密度: 2.96 g/cm ³ 高炉スラグ: 4000プレーン, 含有量75%
	N	普通ポルトランドセメント 3社等量混合品 密度: 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメントB種 3社等量混合品 密度: 3.04g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S1	山砂 表乾密度: 2.62g/cm ³ 吸水率1.56% FM: 2.72
粗骨材	G1	硬質砂岩砕石 表乾密度: 2.66g/cm ³ 吸水率0.65% FM: 6.78
化学混和剤	SP	ポリカルボン酸系減水剤

表-3 コンクリートの配 (調) 合 (実験 1)

No	記号	セメントの種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
							W	C	S	G
1	ECM1-50	ECM1	18	4.5	50	47.7	160	320	859	957
2	ECM2-50	ECM2				47.7	160	320	859	957
3	ECM3-50	ECM3				47.5	160	320	855	957
4	N-50	N				48.1	160	320	875	957
5	BB-50	BB				47.8	160	320	864	957

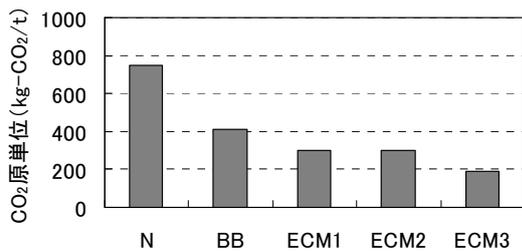


図-1 セメントの CO₂ 原単位

0.25 で荷重を開始し, 同一寸法, 同一環境の無荷重試験体の収縮ひずみを荷重試験体のひずみから差し引きクリープひずみとした。

2.3 実験結果

(1) フレッシュコンクリートの性質

スランブ 18cm を得るのに要する減水剤の添加量を図-2 に示す。ECM セメント (ECM3-50) は普通セメント (N-50) や高炉セメント B 種 (BB-50) よりも減水剤の添加量が少なく流動性の高いコンクリートとなること がわかる。高炉スラグを混入したコンクリートの単位水量は, これを用いないコンクリートより低減できる⁴⁾ と言われているが, 図-2 はこれと同様の傾向を示している。図-3 にブリーディング量の測定結果を示す。ECM セメントのブリーディング量が最も少なく, 分離抵抗性に優れたコンクリートが得られることがわかる。

(2) 圧縮強度と静弾性係数

圧縮強度の試験結果を図-4 に示す。高炉スラグ含有量 60% の ECM1, ECM2 を使用したコンクリートは, 普通セメント (N-50) や高炉セメント B 種 (BB-50) に比べて材齢 1 日の強度は低いものの, 材齢 3 日強度は普通

表-4 試験項目と試験方法 (実験 1)

試験項目	試験方法
ブリーディング	JIS A 1123
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
乾燥収縮	JIS A 1129-2 (長さ変化試験)
自己収縮	(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法 ³⁾
中性化	JIS A 1153
圧縮クリープ	ASTM C 512

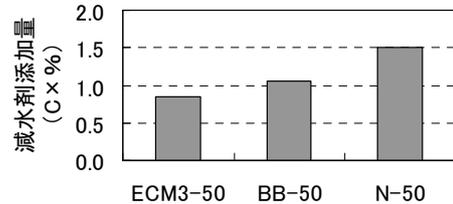


図-2 同スランブに要する減水剤の添加量

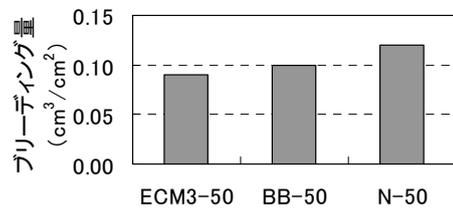


図-3 ブリーディング量

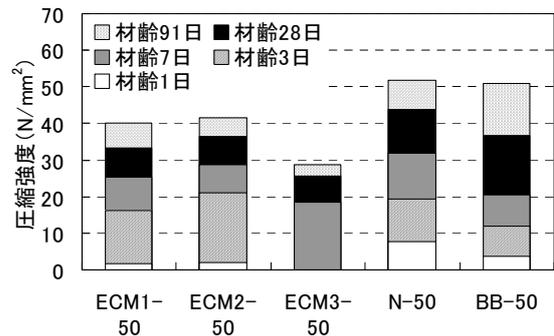


図-4 圧縮強度 (実験 1)

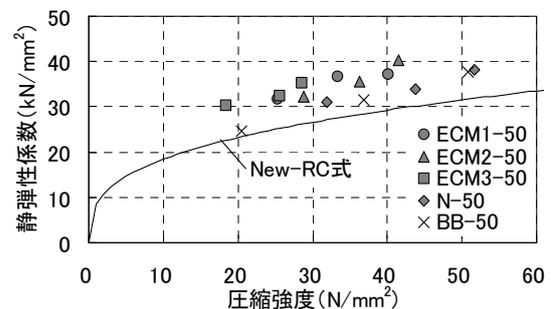


図-5 静弾性係数と圧縮強度の関係

セメントと同等であり, 材齢 28 日強度は BB-50 とほぼ同等, N-50 より若干低い傾向である。ただし, 材齢 28 日から 91 日までの強度の増進は N-50 や BB-50 より劣る傾向を示した。高炉スラグ含有量 75% の ECM3 を用いたコンクリートは初期強度の発現, 強度の絶対値いずれも

相当に小さい。静弾性係数と圧縮強度の関係の測定結果を図-5に示す。いずれのセメントを用いた場合も静弾性係数は、New-RC⁵⁾式を上回るが、ECMセメントを用いたコンクリートは他のセメントを用いたものより若干静弾性係数が大きくなる傾向が見られる。

(3) 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみの測定結果を図-6示す。ECM1, ECM2セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮はいずれもN-50やBB-50の70%程度であり、ECM3セメントではN-50やBB-50の50%程度であった。ECMセメントは普通セメントや高炉セメントB種に比べ乾燥収縮が大幅に低減できることがわかる。

(4) 自己収縮

自己収縮の測定結果を図-7に示す。普通セメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリートが材齢1週までに約50 μ の収縮ひずみを示すのに対し、ECMセメントを使用したコンクリートは100~150 μ の膨張ひずみを示している。この膨張ひずみはセッコウに由来するSO₃の添加量が多いためと推定されるが、乾燥収縮が小さいことも相まって、ECMセメントを使用したコンクリートが高いひび割れ抵抗性を有することを示している。

(5) 圧縮クリープ

圧縮クリープの測定結果を図-8に示す。ECMセメントを用いたコンクリートのクリープひずみは普通セメントを用いたコンクリートの約半分ときわめて小さい。この理由は必ずしも明らかではないが、ECMセメントを用いたコンクリートの優れた変形性能の一つと考えられる。

(6) 中性化

中性化深さの測定結果を図-9に、材齢13週における中性化深さ測定試験体の呈色状況を写真-1に示す。高炉スラグ含有量60%のECM1とECM2を使用したコンクリートの中性化深さはN-50, BB-50の1.5~2.5倍程度であり、高炉スラグ含有量75%のECM3では3~5倍である。高炉スラグ含有量が多いため中性化が速いのは当然であるが、ECM1, 2のレベルの中性化速度は水セメント比の低い領域での使用等により通常のRC部材に適用できる可能性が考えられる。また、鋼管コンクリート部材や場所打ちコンクリート杭等の中性化が問題とならない部材ではECMセメントを使用したコンクリートの適用が十分に考えられる。写真-1に示したECMセメントを使用したコンクリートの明瞭な呈色境界はポルトランドライトの存在を示唆するものであり、中性化が抑制される限り、このコンクリート中の鉄筋や鋼材は防食される可能性が高い。ただし、この点についてはECMセメントを用いたコンクリートの中性化抑制方法の検討

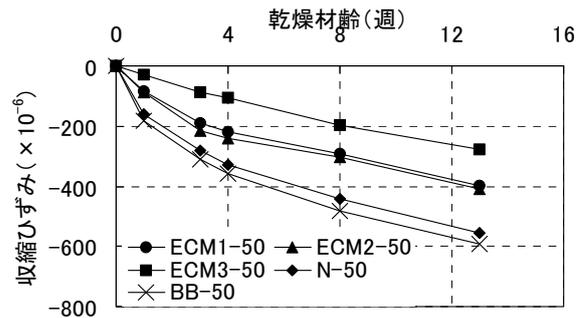


図-6 乾燥収縮ひずみ

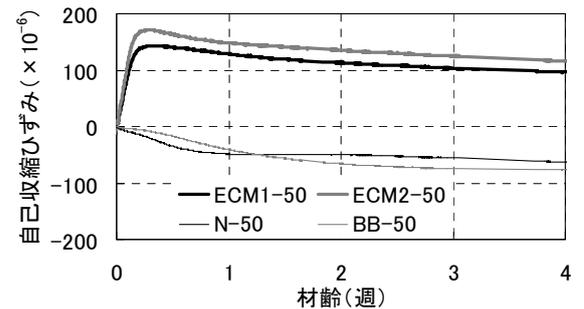


図-7 自己収縮ひずみ

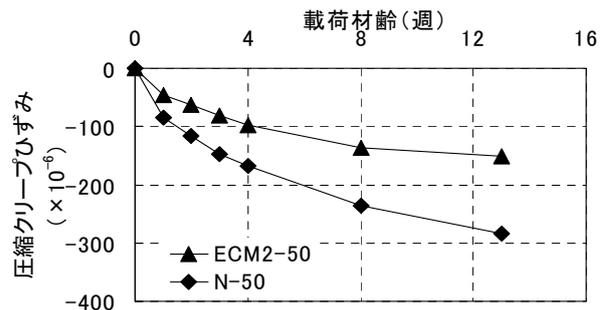


図-8 圧縮クリープひずみ

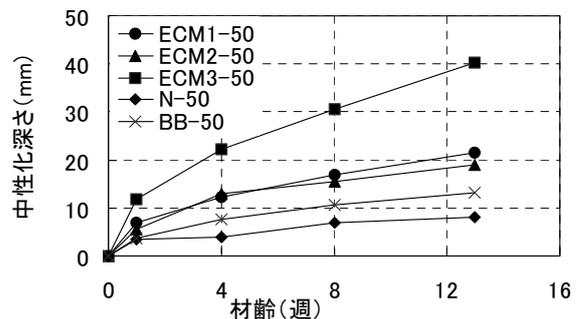


図-9 中性化深さ

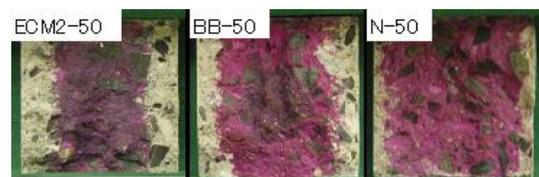


写真-1 中性化深さを測定した試験体の呈色状況 (材齢13週)

を含め今後の課題である。

2.5 構造体への適用可能性の検討

ECMセメントを使用したコンクリートは材齢1日強度が低い点と中性化が速い点を除けば流動性とブリーディングで評価したフレッシュコンクリートの性質、乾燥収縮、自己収縮、クリープ等の硬化コンクリートの性質のいずれにおいても普通セメントや高炉セメントB種を用いたコンクリートよりもむしろ優れた性質を有することが明らかとなった。図-1に示したようにECMセメントは他のセメントに比べ環境負荷が低く、初期強度と中性化の問題を解決できる構造体を選定することができれば、環境対応セメント・コンクリートとして実用化できる可能性がある。

例えば鋼管コンクリートや場所打ち杭では、鋼材の防食さえ確保できれば中性化は問題とならないのであり、ブリーディングや自己収縮による体積変化が少ないECMセメントを用いたコンクリートは、むしろ従来のセメントより高い適性を有する可能性がある。また、高炉スラグ含有量60%のECMセメントを用いたコンクリートの中性化のレベルであれば、水セメント比の小さい高強度コンクリートでは中性化の問題を回避して適用できる可能性が高い。上記の検討結果から、ECMセメントを使用したコンクリートの適用対象として高強度コンクリートあるいは高強度鋼管コンクリートを想定し、初歩的な検討を以下で行った。

3. 高強度コンクリートへの適用性の検討1(実験2)

3.1 実験の概要

設計基準強度40~60N/mm²程度の場所打ち高強度コンクリートを適用対象として想定し、圧縮強度の特性と場所打ち高強度コンクリートで問題となる冬期の低温時強度発現性について実験を行い、ECMセメントを用いたコンクリートの高強度コンクリートへの適用性について初歩的な検討を行った。実験の因子と水準を表-5に示す。水セメント比を30~60%、養生温度を5~20℃の範囲で変化させた。

3.2 使用材料とコンクリートの配(調)合

ECMセメントとしては実験1で比較的初期強度の発現等の性質に優れていた、高炉スラグ含有量60%、6000ブレーンの高炉スラグ微粉末を使用したECM2セメントを使用した。使用材料を表-6に、コンクリートの配(調)合を表-7に示す。

3.3 試験項目と試験方法

標準養生と封かん養生(5℃~20℃)を行ったφ100×200mm円柱試験体の圧縮強度をJIS A 1108に従って測定した。実験に使用したコンクリートは容量3.25m³の実機コンクリートプラントにて製造し、材齢2日まで室温(平

均17.2℃)で養生した後所定の養生を行った。

3.4 実験結果と考察

圧縮強度の測定結果を図-10に示す。材齢28日の圧縮強度とセメント水比の関係を図-11に示す。標準養生及び、20℃封かん養生の場合には、水セメント比30%、材齢28日で圧縮強度は70N/mm²、同じ条件の5℃でも60N/mm²に達している。構造体強度に対する詳細な検討が今後必要であるが、今回のデータから設計基準強度40~60N/mm²程度の高強度コンクリートに対して、ECMセメントを用いたコンクリートを適用できる可能性が十分に考えられる。図-12に養生温度の異なる封かん養生試験体の圧縮強度と積算温度の関係を示す。いずれも積算温度の対数に対して直線的に増大しており、通常のセメントで得られる関係とほぼ同様である。言い換えれば5℃で養生しても材齢が経過すれば20℃と同様の圧縮

表-5 因子と水準(実験2)

因子	水準
W/C (%)	30.0%, 45.0%, 60.0%
養生方法	標準水中養生 封かん養生(5℃, 10℃, 20℃)

表-6 使用材料(実験2)

材料	記号	種別, 物理的性質等
セメント	ECM2	試作セメント2 密度: 2.98 g/cm ³ 高炉スラグ: 6000ブレーン, 含有量60%
水	W	上水道水
細骨材 S2:S3=8:2	S2	山砂 表乾密度: 2.60g/cm ³ 吸水率1.83% FM: 2.36
	S3	砕砂 表乾密度: 2.64g/cm ³ 吸水率1.34% FM: 3.61
粗骨材	G2	石灰砕石 表乾密度: 2.69g/cm ³ 吸水率0.59% FM: 6.58 実積率60.0%
化学混和剤	SP	ポリカルボン酸系減水剤

表-7 コンクリートの配(調)合(実験2)

No	記号	スランブ, スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
						W	C	S	G
1	ECM2-60	18	4.5	60	48.1	160	267	883	985
2	ECM2-45			45	45.8	160	356	805	985
3	ECM2-30	50		30	43.4	165	550	685	920

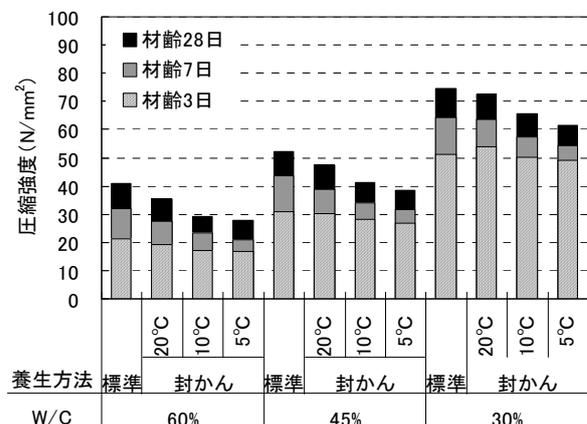


図-10 圧縮強度(実験2)

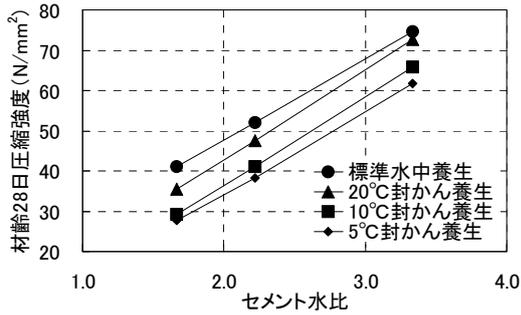


図-11 セメント水比と圧縮強度の関係 (材齢 28 日)

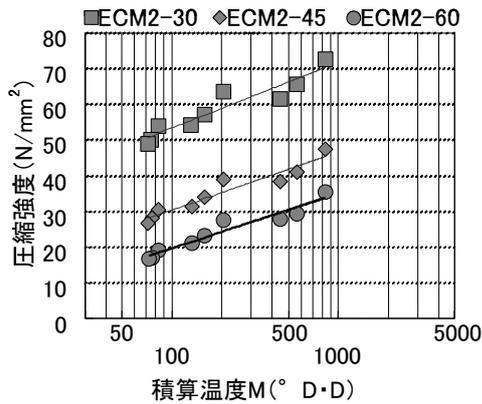


図-12 圧縮強度と積算温度の関係

強度が得られることになる。ただし、今回の実験では5°C養生の場合も材齢 2 日まで室温で養生されていたので、この点は考慮しておく必要がある。

以上の結果から、ECM セメントを使用したコンクリートは場所打ちの RC 部材や鋼管コンクリート部材に使用する設計基準強度 40~60N/mm² 程度の高強度コンクリートに対して適用できる可能性があるかと判断される。

4. 高強度コンクリートへの適用性の検討 2 (実験 3)

4.1 実験の概要

ここでは、加熱養生を受ける設計基準強度 40~60N/mm² 程度のプレキャスト高強度コンクリートを適用対象として想定し、圧縮強度の特性と加熱養生が圧縮強度に及ぼす影響について実験を行い、初歩的な検討を行った。プレキャスト高強度コンクリートとしては写真-2 に示すホローコアスラブを具体例として強度データを取得するとともに製造実験も実施した。実験の因子と水準を表-8 に示す。

4.2 使用材料とコンクリートの配(調)合

使用材料を表-9 に、コンクリートの配(調)合を表-10 に示す。発現する強度が比較的低い ECM3 は検討対象から除いた。コンクリートのスランブはホローコアスラブの製造に使用するものでありゼロスランブのコン



写真-2 ホローコアスラブ

表-8 因子と水準 (実験 3)

因子	水準
セメント種類	ECM1, ECM2, N
W/C (%)	40.0%, 34.5%, 30.0%
養生方法	標準水中養生, 加熱封かん養生

表-9 使用材料 (実験 3)

材料	記号	種別, 物理的性質等
セメント	ECM1	試作セメント1 密度: 2.98 g/cm ³ 高炉スラグ: 4000プレーン, 含有量60%
	ECM2	試作セメント2 密度: 2.98 g/cm ³ 高炉スラグ: 6000プレーン, 含有量60%
	N	普通ポルトランドセメント 3社等量混合品 密度: 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S4	山砂 密度: 2.58g/cm ³ 吸水率1.56% FM: 2.67 実積率: 69.8%
		G3 硬質砂岩砕石 6号 (JIS A 5001) 密度: 2.66g/cm ³ 吸水率0.55% FM: 6.00 実積率: 60.2%
粗骨材 G3:G4=4:6	G4	硬質砂岩砕石 7号 (JIS A 5001) 密度: 2.68g/cm ³ 吸水率0.83% FM: 4.99 実積率: 56.7%

表-10 コンクリートの配(調)合 (実験 3)

セメントの種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
ECM1 ECM2	0	5.0	30	52.5	140	467	886	832
			34.5		150	435		
40			161		403			
30			140		467			
N	0	5.0	34.5	52.5	150	435	897	842
			40		161	403		

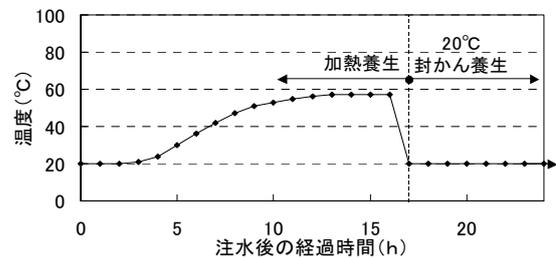


図-13 加熱養生温度履歴

クリートとした。

4.3 試験項目と試験方法

標準養生と加熱封かん養生を行った円柱試験体を用いて JIS A 1108 に従って圧縮強度試験を行った。供試体は2層に分けて詰め、各層をテーブルパイプレータを用いて約 15 秒加振して成型した。加熱養生の温度履歴

を図-13に示す。

4.4 実験結果と考察

圧縮強度の測定結果を図-14に、材齢1日と材齢28日における加熱養生と標準養生の強度比を図-15に示す。これらの結果から、ECMセメントを使用したコンクリートは、標準養生では普通セメントを使用したコンクリートよりも材齢1日の圧縮強度は相当に低いが、加熱養生を行うと材齢1日の強度は大きく増進し、ECM2セメントの場合には、普通セメントとほぼ同等の強度を発現することがわかる。また、材齢28日の強度比は普通セメントよりもむしろ大きくなる傾向も認められる。水セメント比30%の圧縮強度は普通セメントよりやや低いが、60N/mm²前後の値を示している。水セメント比34.5%のコンクリートでスラブの製造実験を行ったが、適切なワーカビリティが得られ、写真-2のスラブが製造できた。これらの結果はECMセメントを使用したコンクリートが設計基準強度40~60N/mm²程度のプレキャスト高強度コンクリートに適用できる可能性を示している。

5. まとめ

高炉スラグを60~75%含有するECMセメントを使用したコンクリートに関する研究の結果を以下にまとめる。

- 1) 普通セメントや高炉セメントB種を使用したコンクリートに比べ同一スラブを得るのに要する減水剤の添加量が少なく（流動性が高い）、ブリーディングも少ない。
- 2) 材齢1日の強度が低く、28日から91日の強度の増進が少ないが、材齢7日、28日の強度は普通セメントや高炉セメントB種とほぼ同等である。
- 3) 乾燥収縮、自己収縮および圧縮クリープは普通セメントや高炉セメントよりは大幅に少なく、ひび割れに対する抵抗性や長期の変形に対して優れた性能を有している。
- 4) 中性化と初期強度の問題を回避できる用途として、設計基準強度40~60N/mm²程度の場所打ち高強度コンクリートと加熱養生を行うプレキャスト高強度コンクリートについて検討を行い、適用可能性を有すると考えられた。

ECMセメントは環境負荷の少ないセメントとして構造的に適用できる可能性を確認したが、耐久性や構造体の強度等、実用化に必要な課題についてさらに研究を行い、セメントや化学混和剤の改良も期待したい。

謝辞

本研究は「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導的研究開発/エネルギー・

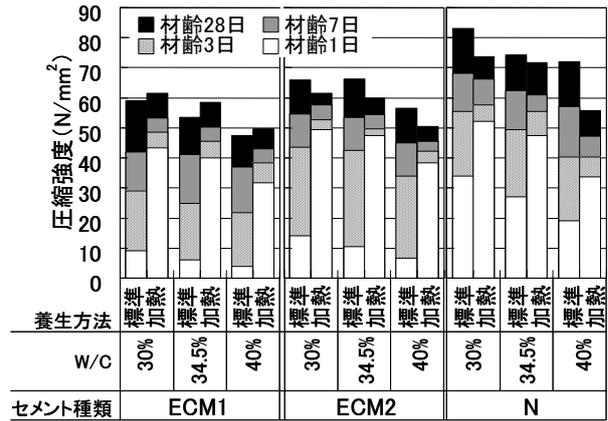


図-14 圧縮強度（実験3）

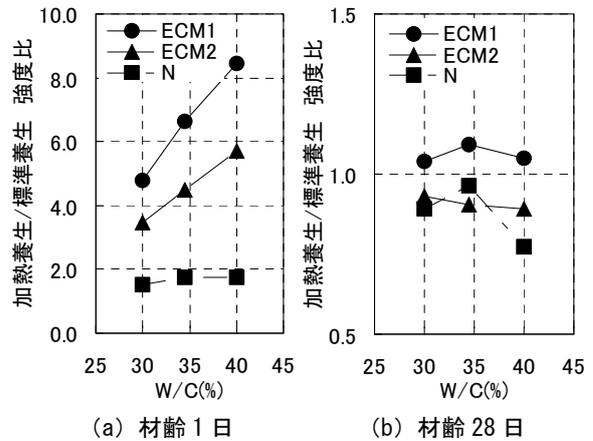


図-15 標準養生強度に対する加熱封かん養生強度比

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」(NEDO)の一環として実施した。本研究に用いたECMセメントは東京工業大学と、(株)デイ・シイの研究開発により、使用した化学混和剤は竹本油脂(株)にて試作された。関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 二戸 信和：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp121-126，2008
- 2) 中本 純次：高炉スラグ高含有コンクリートの強度発現性に及ぼす養生温度の影響，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp359-363，1994
- 3) コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，1994.5
- 4) 国府勝郎：高炉スラグ微粉末，コンクリート工学，Vol.26，No.4，pp.25~31，1988
- 5) 野口貴文他：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.1-10，1995.8