

4) 高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究

4) Study on the Basic Properties of Concrete using High Amount of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag

和地 正浩 Masahiro Wachi*¹

金井 亮 Ryou Kanai*¹

辻 大二郎 Daijiro Tsuji*¹

井上 和政 Kazumasa Inoue*²

三井 健郎 Kenrou Mitsui*³

米澤 敏男 Toshio Yonezawa*⁴

梗概

高炉スラグ微粉末を60%程度と多く含有するセメントに対して、無水石膏の添加率と水セメント比がコンクリートの基礎物性に及ぼす影響を実験的に検討した。強度発現特性においては、無水石膏添加率の増加に伴い初期強度が向上し、長期強度の増進が抑制された。乾燥収縮はSO₃量の増加に伴い減少する傾向であり、中性化速度はW/Cの低減とともに減少し、W/Cの範囲によっては一般構造物に適用可能であると推定された。さらに、凍結融解抵抗性は石膏の添加率3.0%以下で確保されること、圧縮クリープは普通セメントと比較して小さいことがわかった。

キーワード：高炉スラグ微粉末高含有セメント、圧縮強度、中性化速度、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、圧縮クリープ

Summary

This paper examines that influence of anhydrite rate and water cement ratio exert on the basic properties of concrete using cement containing high amount ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS). Early compressive strength increases as anhydrite rate increases. but, long-term compressive strength improvement is controlled as anhydrite rate increases. Dry shrinkage decreases with anhydrite rate. Neutralization decreases with water cement ratio. It was presumed to be applicable to a general structure according to the range of W/C. Freezing and thawing resistance is maintained that cement contains less anhydrite than 3.0%. Compressive creep of concrete using cement containing high amount of GGBFS is smaller than that using normal cement.

Keywords: ground-granulated blast-furnace slag, Compressive strength, carbonation speed, drying shrinkage, Freezing and thawing resistance, Compressive creep

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微粉末に置き換えることは、クリンカーの使用量を低減することから、CO₂の発生量を大きく削減するための有効な手段の一つであり、高炉セメントはグリーン調達品目に選定されるなど、地球環境保護の観点から利用拡大が期待されている。一般的に、高炉スラグ微粉末を混入したセメントは、初期強度の発現が普通セメントに比べ遅れる傾向にあるが、セメントの比表面積を大きくすること、SO₃量を増加させることにより強度発現特性を大きく改善できることが知られている¹⁾。また、SO₃量の増大は、乾燥収縮や自己収縮、水和熱を低減させる効果を持ち、高炉セメントを用いたコンクリートの性能を向上させるのに有効である^{2), 3)}。

*1 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*3 技術研究所 マネージャー 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Ph.D.

*4 技術研究所 リサーチフェロー Ph.D. Research Fellow, Research & Development Institute, Ph.D.

筆者らは、クリンカーの使用量をより減少させ、高いCO₂削減効果を得ることを目的として、高炉スラグ微粉末を60%以上と多く含有するエネルギー・CO₂・ミニマムセメントを開発している（以下ECMセメントと表記）。しかし、上述したような高炉セメントの特性に関する知見は、高炉セメントB種に相当する、高炉スラグ微粉末の含有率が40～45%程度のセメントを主な対象としている。そこで本論文ではECMセメントのベースとなる高炉スラグを60%以上含有したセメントを対象に、無水石膏の添加率と水セメント比がそれを用いたコンクリートの圧縮強度や乾燥収縮、中性化速度、凍結融解抵抗性、圧縮クリープ特性に及ぼす影響を実験的に検討し、各物性を把握するとともに、建築部材への適用の可能性について検討したものである。

2 実験の概要

2.1 コンクリートの材料と調合

ECMセメントの物理的性質と化学成分を

Table 1に示す。ECMセメントは、高炉スラグ微粉末と普通セメントを2：1の割合で含有し、無水石膏の添加率を10, 6.5, 3.0, 0%とした4種類のセ

メントとした。コンクリートの使用材料をTable 2に示す。比較用とした、普通セメント(N)、高炉セメントB種(BB)は市販のセメントを3社等量混合にて使用した。混和剤はECMセメント用に開発した2種類の分散剤を使用した。調合をTable 3に示す。ECMB1, N, BBはW/C50, 40, 30%, ECMB2, ECMB3はW/C50, 40, 30, 20%, ECMB4はW/C50%の調合にてコンクリートの基礎物性を実験により検討した。

Table 1 セメントの物理特性と化学成分
Physical Property and chemical composition of ECM cement

記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	母体材料の混合比 (wt.%)			化学成分 (wt.%)					
			高炉スラグ微粉末	普通セメント	無水石膏	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
ECMB1	2.98	5160	60.0	30.0	10.0	26.71	10.48	1.14	48.66	4.18	6.30
ECMB2	2.98	5200	62.0	31.5	6.5	27.65	10.83	1.19	49.06	4.33	4.37
ECMB3	2.99	5240	64.5	32.5	3.0	28.64	11.24	1.23	49.34	4.49	2.42
ECMB4	2.99	5280	66.5	33.5	0.0	29.48	11.57	1.26	49.64	4.62	0.75

Table 2 使用材料
Materials

分類	name	property
cement	normal Portland cement (N)	density : 3.16g/cm ³
	blast furnace cement (type B) (BB)	density : 3.04g/cm ³
fine agg.	river sand	density : 2.61g/cm ³ , F.M. : 2.62%, solid content : 68.9%, absorption : 1.53%
coarse agg.	crused sand stone	density : 2.68g/cm ³ , F.M. : 6.75%, solid content : 59.5%, absorption : 0.63%
water	tap water	-
admixture	dispersive agent 1, 2	Polycarboxylate based

Table 3 調合
Mixture proportion

2.2 試験項目と試験方法

(1) フレッシュ試験

コンクリートのスランプ試験はJIS A 1101, コンクリートのスランプフロー試験はJIS A 1150, コンクリートの空気量はJIS A 1128に準拠した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠した。養生は標準養生とし、試験材齢は1, 3, 7, 28, 91日とした。

(3) 乾燥収縮

乾燥収縮はJIS A 1129-2に準拠し、材齢7日まで標準養生を行った後、基長を測定し、20 ± 2℃, 60 ± 5% RHの環境にて試

No	item	cement	W/C (%)	target slump (flow) (cm)	target air content (%)	s/a (%)	bulk density of coarse agg. (m³/m³)	unit weight (kg/m³)				
								water	cement	fine agg.	coarse agg.	
1	ECMB1-50	ECMB1	50	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	49.2	0.58	165	330	872	925	
2	ECMB1-40		40			47.0	0.58		413	800	925	
3	ECMB1-30		30			[50] ± 10	45.0		0.56	550	711	893
4	ECMB2-50	ECMB2	50	18 ± 2.5		49.2	0.58		330	872	925	
5	ECMB2-40		40			47.0	0.58		413	800	925	
6	ECMB2-30		30	[50] ± 10		45.0	0.56		550	711	893	
7	ECMB2-20		20	[60] ± 15	2.0 ± 1.0	37.4	0.54		825	501	861	
8	ECMB3-50	ECMB3	50	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	49.2	0.58		330	873	925	
9	ECMB3-40		40			47.1	0.58		413	801	925	
10	ECMB3-30		30			[50] ± 10	45.0		0.56	550	712	893
11	ECMB3-20		20	[60] ± 15	2.0 ± 1.0	37.5	0.54		825	503	861	
12	ECMB4-50	ECMB4	50	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	49.2	0.58		330	873	925	
13	N-50	N	50			49.7	0.58		330	889	925	
14	N-40		40			47.7	0.58		413	820	925	
15	N-30		30			[50] ± 10	45.9		0.56	550	738	893
16	BB-50	BB	50			18 ± 2.5	49.4		0.58	330	878	925
17	BB-40		40				47.3		0.58	413	807	925
18	BB-30		30				[50] ± 10		45.3	0.56	550	720

験を行った。

(4) 中性化深さ

中性化試験はJIS A 1153の促進中性化試験に準拠した。10×10×40cmの試験体を作製後、材齢4週まで標準水中養生、材齢4週から材齢8週まで20±2℃、60±5%RHの環境にて養生し、材齢8週にCO₂濃度5±0.2%、20±2℃、60±5%RHの環境に試験体を移動し促進中性化試験を開始した。中性化深さの測定はJIS A 1152の中性化深さ測定方法に準拠した。

(5) 凍結融解

コンクリートの凍結融解試験はJIS A 1148に準拠して実施した。

(6) 圧縮クリープ

圧縮クリープ試験はJIS原案⁴⁾に準拠した。圧縮クリープ試験の概要はFig.1に示す通りであり、φ150×300mmの円柱供試体を3体重ねた状態で20tの荷重を与えた。試験環境は20±2℃60±5%RHとし、各測定材齢にて長さ変化を測定した。材齢28日の圧縮強度から、軸力比はECM-B1-50で0.26、N-50で0.25の試験状態であった。

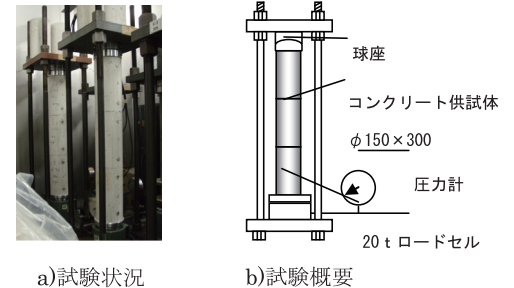


Fig.1 クリープ試験の状況
View of creep test

3 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の一覧をTable 4に示す。混和剤添加率を調整することにより、目標とするフレッシュ性状のコンクリートを得た。W/C50%の調合による、所定のフレッシュ性状を得るためのセメント種類と混和剤添加率の関係をFig.2に示す。普通セメントを用いたコンクリートと比較してECMB1～B4を使用したコンクリートが所定のスランプを得るための混和剤量は少ない傾向であり、高炉セメントB種と同等であった。

Table 4 フレッシュコンクリートの試験結果
Test results of fresh concrete

No.	調合	混和剤添加率 (C×wt.%)		コンクリート 温度 (℃)	空気量 (%)	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm)
		減水剤1	減水剤2				
1	ECMB1-50	0.55	-	21.0	4.4	19.0	32.8
2	ECMB1-40	0.57	-	21.0	4.7	19.0	30.0
3	ECMB1-30	0.78	-	22.0	5.7	-	52.8
4	ECMB2-50	0.55	-	21.0	5.0	20.5	34.5
5	ECMB2-40	1.14	-	21.0	4.4	18.0	26.5
6	ECMB2-30	0.84	-	22.0	5.0	-	41.8
7	ECMB2-20	-	0.60	22.5	1.9	-	49.5
8	ECMB3-50	0.55	-	21.5	4.5	20.0	32.5
9	ECMB3-40	0.69	-	22.0	4.0	18.0	29.8
10	ECMB3-30	0.96	-	23.0	3.7	-	43.3
11	ECMB3-20	-	0.70	22.5	1.2	-	70.3
12	ECMB4-50	0.55	-	21.5	4.0	20.5	32.0
13	N-50	0.67	-	21.5	4.2	20.0	31.3
14	N-40	0.87	-	22.0	3.5	19.5	30.8
15	N-30	2.80	-	22.0	4.4	-	40.5
16	BB-50	0.55	-	21.0	4.2	20.5	38.5
17	BB-40	0.51	-	20.5	5.5	19.5	31.8
18	BB-30	1.25	-	21.5	5.2	-	41.5

3.2 圧縮強度

W/C50%の調合によるセメント種類と圧縮強度をFig.3に示す。ECMB1～B4セメントは無水石膏の添加率が異なっているが、その影響は材齢3日強度および材齢7日強度に顕著に表れ、無水石膏の添加率が大きいほど材齢3日および材齢7日強度が向上する傾向であった。無水石膏の添加率が3.0%のECMB4セメントでBBセメントと同等の材齢3日、7日強度を示し、無水石膏の添加率が10%のECMB1セメントでNに近い材齢3日、7日の強度発現を示した。材齢28日強度は無水石膏の添加率の影響が小さくほぼ同等の値を示し、材齢91日強度は無水石膏を添加しないECMB4セメントの強度が最も大きい結果となった。材齢91日強度はN、BBと比較して若干小さい値を示した。セメント水比(C/W)と圧縮強度の関係をFig.3に示す。C/W2.0～3.3

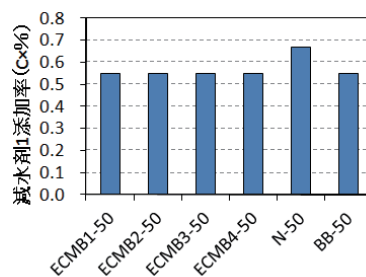


Fig.2 各種セメントコンクリートにおける減水剤添加量
Dosages of admixture for different type of cement (w/c = 50%)

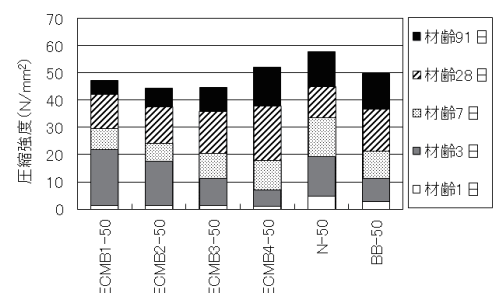


Fig.3 圧縮強度試験結果
Compressive strength of concrete of w/c 50%

(W/C50~30%)の範囲においてECMB2, B3セメントを用いたコンクリートの圧縮強度はNを用いたコンクリートよりも若干小さいものの、C/Wの向上とともに圧縮強度が向上する傾向はNと同様であった。C/W5.0 (W/C20%)の圧縮強度は材齢91日にて100N/mm²を上回り、高強度コンクリートへの適用可能性が示唆された。

3.3 乾燥収縮

乾燥材齢と長さ変化率の関係をFig.5に示す。ECMB1~B4セメントを用いたコンクリートの長さ変化率は異なる傾向を示すことが確認できる。無水石膏添加率と乾燥材齢26週長さ変化率の関係をFig.6に示す。無水石膏の添加率の増加とともに長さ変化率が減少する傾向であり、無水石膏の添加率3%程度でNを用いたコンクリートと同等の長さ変化であった。

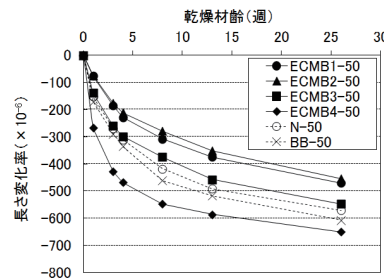


Fig.5 乾燥収縮
Drying shrinkage of concrete

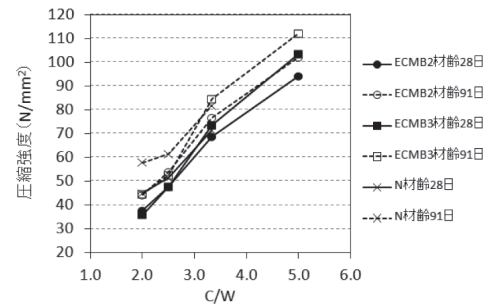


Fig.4 セメント水比と圧縮強度の関係
Relationship between c/w and compressive strength

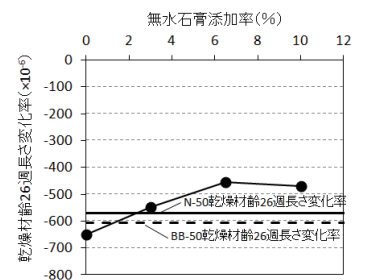


Fig.6 乾燥収縮ひずみ (26週) と無水石膏添加率の関係
Relation between drying shrinkage at 26 weeks and dosages of anhydrous gypsum

3.4 中性化

各水セメント比の促進材齢と中性化深さの関係をFig.7に示す。図中の回帰直線は、中性化深さ(C)が促進期間(t)の平方根に比例する $\sqrt{t}$ 則を基に $C=A\sqrt{t}$ として導いた回帰直線である。W/C50%と比較すると、中性化深さはNが最も小さく次いでBB, ECMB4となり、ECMB1~B3の中性化深さが同等で最も大きかった。ECMB1~B3の中性化深さが同等であることから、無水石膏の添加率3~10%の範囲では無水石膏の添加率が中性化速度に及ぼす影響は小さいと考えられるが、無水石膏を添加しないECM-B4の中性化速度は比較的小さい傾向であった。水セメント比の低減とともに中性化速度が小さくなり、W/C30%にてN, BBの中性化が進行しなくなり、W/C20%にてECMB2, B3の中性化が進行しなくなった。

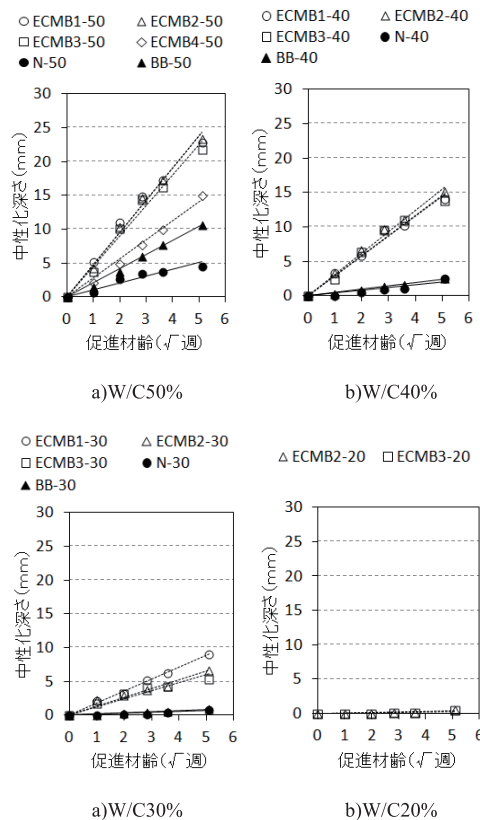


Fig.7 中性化深さと促進材齢の関係
Relationship between age and depth of carbonation

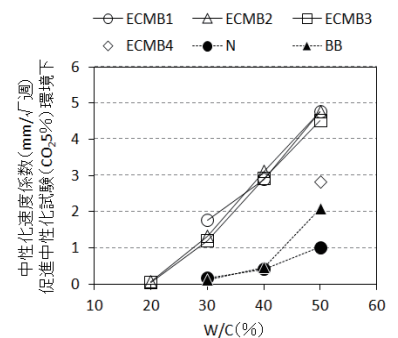


Fig.8 中性化速度係数と水セメント比の関係
Relationship between coefficient of carbonation and w/c

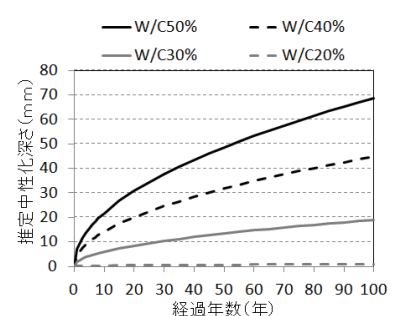


Fig.9 ECMセメントコンクリートの中性化深さの推定値
Calculated depth of carbonation of concrete using ECMB2

W/Cと中性化速度係数の関係をFig.8に示す。ここに示す中性化速度係数は、Fig.7の $C=A\sqrt{t}$ の回帰式から求めた中性化速度係数(A)と

W/Cの関係を示したものである。いずれのセメントもW/Cの低減とともに中性化速度係数も低下する。中性化速度係数がほぼゼロとなるW/CはB1, B2セメントにおいてW/C20%程度であり, N, BBでW/C30~40%であると想定される。

Fig.9にECMB2セメントを用いたコンクリートを一般的な建築物に適用した場合の中性化深さを, 文献5) に示される式(1)を用いて試算した推定値を示す。 A' はFig.8に示す促進中性化試験によって得られた中性化速度係数とし, CO_2 濃度は, 一般的に室内の CO_2 濃度として用いられる0.2%を用いた。その他の要因は促進中性化試験と同様と仮定した。例えば, ECMB2セメントを用いたコンクリートをかぶり厚さ40mmの構造物に適用することを想定し, 鉄筋位置に中性化深さが到達する期間を推定すると, W/C50%で約30年となる。同様に, W/C40%で約70年, W/C30%では100年以上と推定できる。JASS5⁶⁾に定められる標準供用級(計画供用期間としておよそ65年)にはW/C40%程度で対応可能であると予測され, N, BBに比べて中性化速度が大きいものの, W/Cによって中性化速度を制御し, 一般構造物に適用可能なW/Cの範囲があることを推定した。

$$C = A' \sqrt{CO_2/5.0} \cdot \sqrt{t} \quad \dots (1)$$

C : 中性化深さ (mm)

CO_2 : 炭酸ガス濃度 (%)

A' : 促進中性化試験における中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{t}$ 週)

t : 材齢 (週)

3.5 凍結融解

凍結融解試験による凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係をFig.10に示す。無水石膏の添加率が10%であるECMB1と6.5%であるECMB2セメントを用いたコンクリートは凍結融解90サイクル程度で相対動弾性係数60%を下回ったのに対し, 無水石膏の添加率が3.0%であるECMB3と0%であるECMB4を用いたコンクリートは凍結融解サイクル300回まで相対動弾性係数80%以上を維持し, N, BBを用いたコンクリートと同等の凍結融解抵抗性を示した。

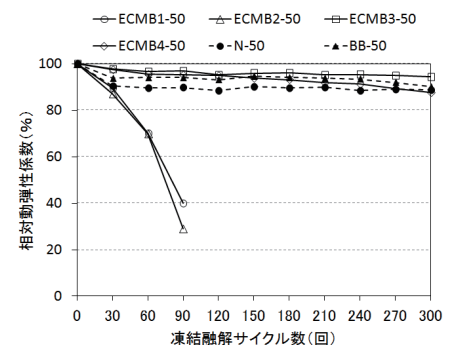


Fig.10 凍結融解サイクルと相対動弾性係数低下率の関係
Relationship between freezing and thawing cycle and relative dynamic modulus of concrete

3.6 圧縮クリープ

圧縮クリープ試験による材齢とクリープひずみの関係をFig.11に示す。ECMB1を用いたコンクリートの圧縮クリープひずみはNセメントを用いたコンクリートの半分程度であり, クリープの進展が非常に小さいことを確認した。

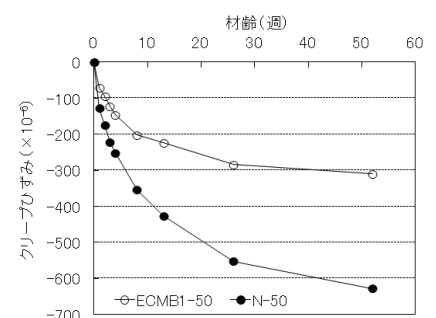


Fig.11 クリープ試験結果
Results of creep

4 まとめ

1. ECMセメント用に開発した混和剤の添加量を調整することで, 目標とするフレッシュ性状のコンクリートを得ることができた。また, ECMセメントは普通セメントと比較して, 所定のスランプを得るための混和剤添加量が少ないことを確認した。
2. ECMセメントを用いたコンクリートの圧縮強度特性は, セメント中の無水石膏添加率によって異なり, 無水石膏の増大に伴って, 初期強度が増進するものの, 長期強度の増進が抑制された。またW/Cを20%程度にすることで圧縮強度が100N/mm²に達することから, 高強度コンクリートへの適用可能性が示唆された。
3. ECMセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率は, セメント中の無水石膏添加率の増大に伴い減少する傾向であり, 無水石膏添加率3.0%程度で普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いたコンクリートの乾燥収縮率より小さくなった。
4. ECMセメントを用いたコンクリートの中性化速度は, 普通セメントや高炉セメントを用いたコンクリートより

も大きいものの、水セメント比の低減とともに減少する傾向を確認した。さらに、実験によって得られた中性化速度係数を基に中性化深さを予測した結果、ECMセメントを用いたコンクリートでも一般的な構造物に適用できる水セメント比の範囲があることを確認した。

5. ECMセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、セメント中の無水石膏添加率によって異なり、無水石膏添加率3.0%以下とすることで、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と同等の対凍害性を確保できることを確認した。
6. ECMセメントを用いたコンクリートの圧縮クリープは、普通セメントに比べて約50%程度と小さくなることを確認した。

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 SO_3 の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.121-126，2008
- 2) 原田克己，松下博通，後藤貴弘：水和熱を考慮した高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみ特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.14，No.1，pp.23-33，2003.7
- 3) 宮澤伸吾，大澤友宏，廣島明男，鯉渕清：低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.487-492，2005.6
- 4) 建材試験センター：コンクリートの圧縮クリープ試験方法（案），建材試験センター試験方法JIS原案（コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp55-56
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5鉄筋コンクリート工事，2009