

# 論文 廃石膏ボード微粉末を刺激材とした高炉スラグフライアッシュ混合セメントコンクリートの基礎的性質

今本 啓一\*1・成田 瞬\*2・加藤 栄\*3・磯 文夫\*4

**要旨:** 本研究は廃石膏ボードの再利用を図る一つの手法を提案するものである。本論では、廃石膏ボード微粉末を刺激材 (Activator) として用いた高炉スラグ・フライアッシュの混合セメントコンクリート (Composite Cement Concrete: CCC) の基礎的特性について検討を行った。ペーストについて、その流動性、圧縮強度特性および乾燥収縮特性に及ぼす廃石膏ボード微粉末の置換率の影響を検討し、廃石膏ボード微粉末、高炉スラグおよびフライアッシュの最適な割合を決定した。この割合に基づく混合セメントコンクリートについて、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮および収縮拘束応力特性について実験的に検討した。

**キーワード:** 廃石膏ボード微粉末、高炉スラグ、フライアッシュ、混合セメント

## 1. はじめに

我が国では、年間 98 万トン (平成 12 年) の廃石膏ボードが排出されており、2013 年には 176 万トンに達するとの試算もなされている<sup>1)</sup>。しかし、廃石膏ボードのリサイクル率は、現状では 1% 程度に過ぎず、地球環境問題、資源の枯渇化、処分場の逼迫などの観点から有効利用や産業副産物を活用することは重要である。廃石膏ボードの再利用について、過去には安江らによって 2 水石膏を脱水により半水石膏として再利用することも試みられてきており<sup>2)</sup>、現実、市販の石膏ボードにも再生半水石膏が用いられている。しかし再生半水石膏の構造が細く脆弱であることから<sup>3)</sup>、その再利用の歩留まりは数%に過ぎない。一方、二水石膏がスラグのアルミナ分に作用する性質を利用して、この二水石膏を高炉スラグの刺激材として用いた研究が古くから行われており<sup>4)</sup>、コンクリートへの適用性が、小林・魚本らによって検討された<sup>5)</sup>。さらにこの系 (高炉スラグ-2 水石膏) にフライアッシュを混合し、その特性を検討した研究例も報告されている<sup>6)</sup>。重倉らは、廃石膏ボードより取り出した微粉末を同様に刺激剤として用いたスラグ石膏ボードの研究を既に行っている<sup>7)</sup>。

2 水石膏と高炉スラグ、フライアッシュに関わる既往の研究を俯瞰した場合、本研究は、廃石膏ボード微粉末の再利用を図ることを前提に、これを混合セメントコンクリート (Composite Cement Concrete: CCC) として適用を試みた点にその意義を置くものである。研究では、第一にペーストの基礎的特性を検討するために、2 水石膏、高炉スラグおよびフライアッシュの各混合割合において、廃石膏微粉末の置換率を変化させた場合の流動特性、

圧縮強度特性および乾燥収縮特性を検討した。この基礎的な検討に基づき、廃石膏ボード微粉末、高炉スラグおよびフライアッシュの最適な割合を決定しこれを混合セメントとした。この混合セメントを用いてコンクリートを作製し、その基礎的特性について各種検討を行った。本論はこれらの結果について延べるものである。なお、本研究の実験の一部はすでに筆者らの既往の研究において実施したものである<sup>8)</sup>。本論は、この結果にコンクリートの試験結果を加え新たな検討を行ったものである。

## 2. 実験に使用した材料の概要

### 2.1 使用材料

#### (1) 光学顕微鏡にみる廃石膏ボード微粉末

標準石膏を写真-1、廃石膏ボード微粉末をふるいによっておおよそ 2 水石膏および紙繊維に分離したものを写真-2 および写真-3 に示す。ここで標準石膏とは、廃煙脱硫石膏を指しており、廃石膏ボード微粉末は、新築現場において発生した石膏ボード端材を、摩砕機により段階的 (5 段階) に微粉末化し、0.5mm ふるいを通してのものである。写真を見ても明らかのように、標準石膏の粒が細かく均一であるのに対し、廃石膏ボード微粉末の粒子は比較的粗く、ボード表面のコート紙および石膏硬化体の内部に混入される補強繊維等を起源とする繊維状の物質 (質量混入率: 0.6% mass) が見られる。それぞれの粉体の粒度分布を図-1 に示す。図に示されるように、廃石膏の粒度は標準石膏と比較して粗いことが示されている。

\*1 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 日本プラスター (株) 技術開発部

\*3 栃木県産業技術センター 県南技術支援センター 化学・資源チーム 主任

\*4 足利工業大学総合研究センター 客員研究員 博士 (工学)

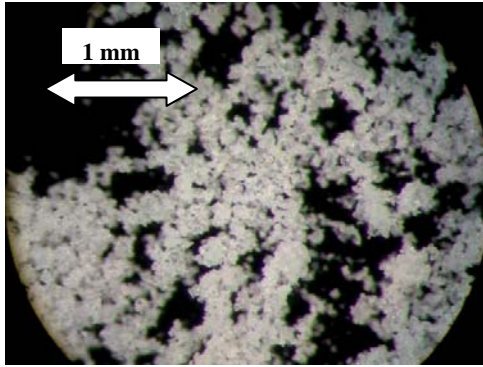


写真-1 標準石膏

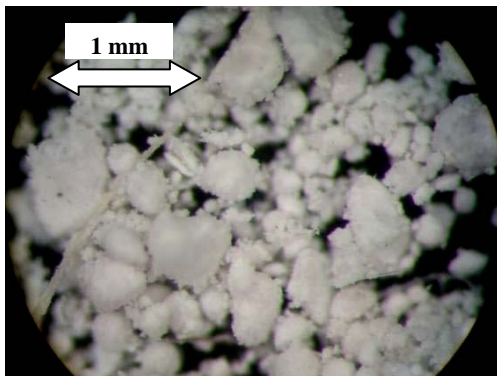


写真-2 廃石膏ボード微粉末

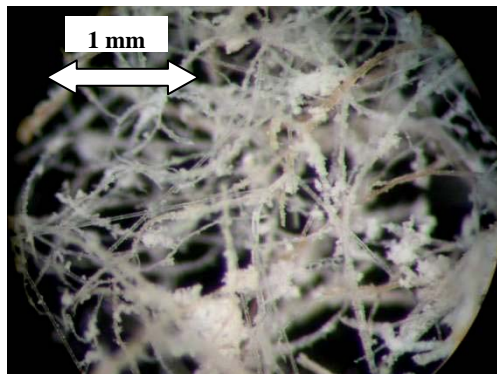


写真-3 廃石膏ボード微粉末中の繊維

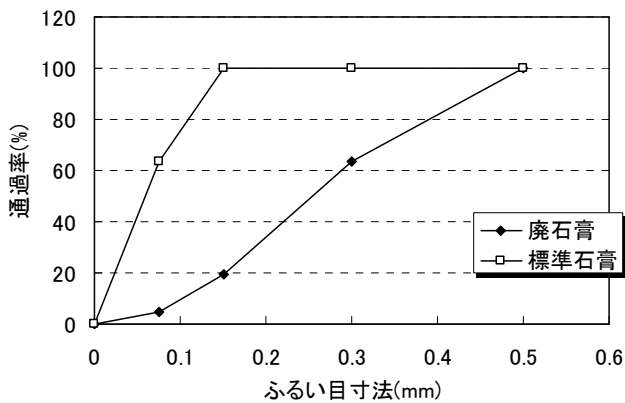


図-1 粒度分布

## (2) 実験に用いた使用材料の特性

本研究で使用した材料と物性を表-1、蛍光 X 線分析の FP 法による定量分析結果を表-2 に示す (なお、蛍光 X 線分析では H<sub>2</sub>O など検出できない成分があり、表-2 は検出した元素を酸化物とし、それらのトータルを 100% として計算した結果である)。後述のペースト実験では表-1 の上 4 つを使用している。

表-1 使用材料と物性

使用材料	物性
フライアッシュ(F)	密度 2.24g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3430cm <sup>2</sup> /g
高炉スラグ(S)	密度 2.86g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4830cm <sup>2</sup> /g
標準石膏(G)	密度 2.34g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 0.104m <sup>2</sup> /g*, pH8.76**
廃石膏(RG)	密度 2.19g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 2.754m <sup>2</sup> /g*, pH6.79**
軽焼ドロマイト(D)	比表面積 8.84m <sup>2</sup> /g*, pH12.63**
セメント	普通ポルトランドセメント: 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.3%, 粗粒率 3.2%
粗骨材	表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> , 実積率 59.0%, 吸水率 0.87%
混和剤	高性能 AE 減水剤: ポリカルボン酸エーテル系
防錆剤	アミノアルコール系: 密度 1.06g/cm <sup>3</sup> , pH10

\*N<sub>2</sub> 吸着による B.E.T 試験値 \*\*濃度 10% 溶液による試験値

表-2 蛍光 X 線による分析結果 (%)

	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	ZrO <sub>2</sub>
F	0.78	20.44	59.58	0.88	0.63	2.18	4.05	2.04	0.07	0.06	8.88	0.19	0.15
S	3.75	10.43	26.98	—	1.85	0.62	53.34	1.85	0.07	0.56	0.37	0.11	—
G	—	—	0.16	—	47.99	—	51.68	—	—	—	0.10	0.05	—
RG	—	—	0.65	—	52.08	—	46.55	—	—	—	0.54	0.16	—
D	20.59	—	0.28	—	0.06	0.40	78.64	—	—	—	—	—	—

## 2.2 ペースト実験の組み合わせ

実験の組み合わせを表-3 および図-2 に示す。組み合わせはフライアッシュ(F)・高炉スラグ(S)・石膏(G)混合硬化体の特性が概観できるように混合比を選択し、それぞれの混合比において、廃石膏の標準石膏に対する置換率を 20, 50, 100% として廃石膏の影響を評価した。なお、2 水石膏, 高炉スラグおよびフライアッシュの初期の反応を促進するためのアルカリ刺激材 (Alkaline Activator) としてセメントを外割り質量比で 1% 混入した。

表-3 実験の組み合わせ (表中単位: %)

No	F	S	G	廃石膏置換率			
				0	20	50	100
1	80	10	10	0	20	50	100
2	60	20	20				
3	50	10	40				
4	50	40	10				
5	40	20	40				
6	40	40	20				
7	30	10	60				
8	30	60	10				
9	20	20	60				
10	20	40	40				
11	20	60	20				
12	10	10	80				
13	10	30	60				
14	10	60	30				
15	10	80	10				

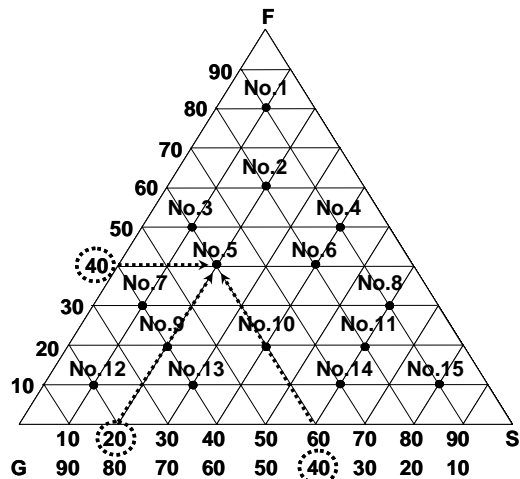


図-2 実験の組み合わせ (点線は No. 5)  
(F:フライアッシュ, S:高炉スラグ, G:2 水石膏)

### 2.3 ペーストの基礎的特性

#### (1) 流動性 (フロー)

フロー試験は JIS R 5201 に準じて行った。フロー値測定結果を図-3 に示す。標準石膏のみの混合比ではすべてにおいてフロー20cm を満足できており、良好な流動性が得られている。しかし、廃石膏置換率が増えるに伴い、その流動性が狭められていく傾向が認められる。これは再生石膏の形状が標準石膏と比較して不揃いなこと、および廃石膏ボードに混入する繊維による影響と考えられる。フライアッシュが多い領域において流動性が確保できているのは、球状のフライアッシュのベアリングによる効果と考えられる。この結果は、廃石膏ボード微粉末を用いた混合セメントにおいてフライアッシュを用いることの利点を示すものであると考える。

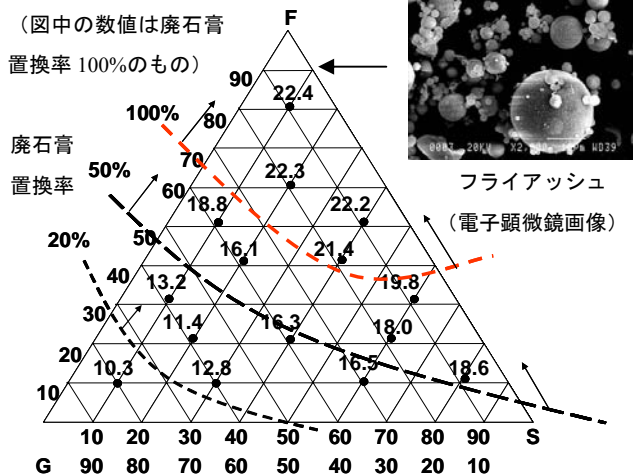


図-3 流動性の分布(图中単位: cm)

#### (2) 圧縮強度

圧縮強度試験は JIS R 5201 に準じて行った。圧縮強度試験結果を図-4 に示す。4×4×16cm 試験体の材齢 28

日時における標準水中養生圧縮強度を基に評価を行った。図に示されるように、高炉スラグの混入率が多い領域において強度が高い傾向が認められる。廃石膏置換率が増えるに伴い、十分な強度を有すると思われる 35N/mm<sup>2</sup> を確保できる領域が若干狭められる傾向にある。

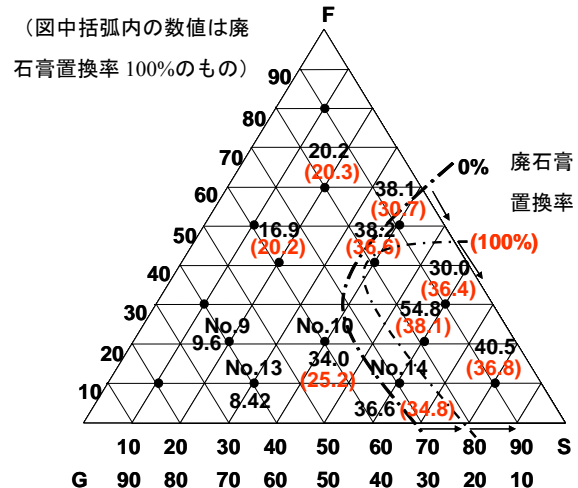


図-4 圧縮強度の分布(图中単位: N/mm<sup>2</sup>)

なお、図において 2 水石膏の混入率 50% を境に圧縮強度が著しく小さくなる傾向が認められる。この点について、特に No.9,10,13 および 14 の硬化体の再生石膏置換率 0% の試料を対象として、XRD による硬化体の生成物を同定した。回折パターンを図-5 に示す。図より、特に 2 水石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) のピークが、No.10, No.14 と比較して No.9, No.13 において大きい。図-4 の圧縮強度分布に示したように、No.9,13 は比較的強度の低い領域に属しており、石膏の混入量としては 50 もしくは 60% を超える領域である。このことは刺激剤としてスラグ・フライアッシュの硬化を促進する石膏がこの領域に属する付近から余剰となり、強度向上効果が頭打ちとなることを示唆している。

また、硬化体の細孔構造をポロシメータ(水銀圧入試験機)により測定した。20℃、60%R.H.環境下の試料をアセトン処理したものを測定対象とした。各試料の累積細孔量と材齢 28 日圧縮強度の関係を図-6 に示す。図に示されるように、強度の低い試料では全般に細孔容積が大きく、強度の高い試料ではその容積は明らかに小さい。すなわち本硬化体の圧縮強度は、セメント系材料同様、その累積細孔量に依存する傾向があり、No.9 および No.13 については、前述の石膏の余剰分による粗な空隙の存在を示している。

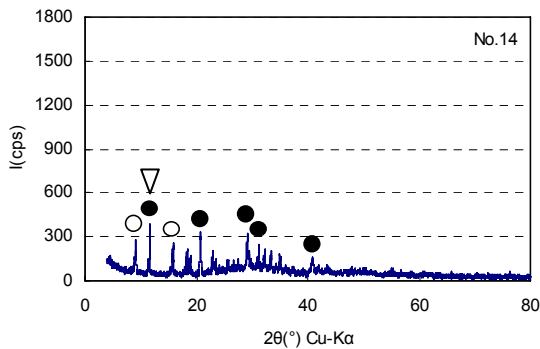
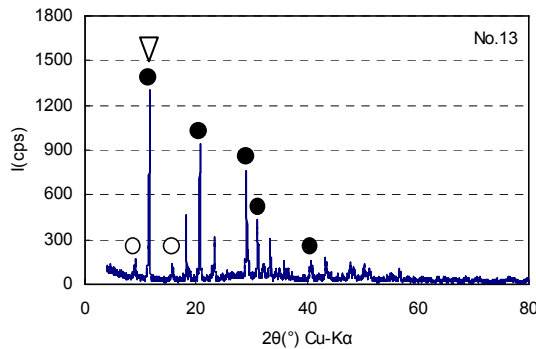
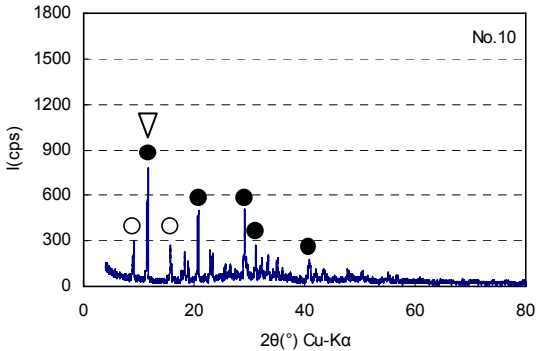
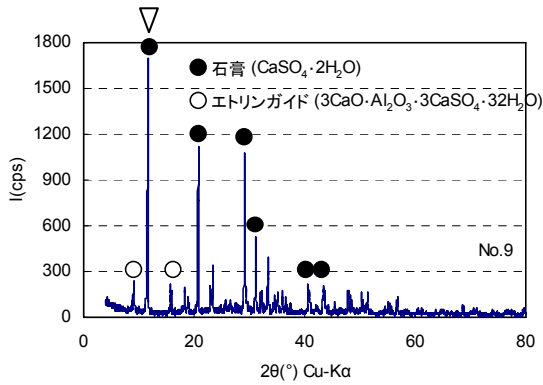


図-5 X線回折結果

### (3) 乾燥収縮

乾燥収縮はJIS A 1129に準じてコンタクトゲージにより測定した。乾燥収縮試験結果を図-7に示す。4×4×16cm試験体の材齢91日時点における測定値を基に評価を行った。全般的にスラグ混入率が少なく、フライアッシュの多い領域において収縮量が小さくなる傾向にある。廃石膏置換率の影響は小さく、フライアッシュを用いることは本系において長期的な強度を担保し、かつ乾燥収縮を低減する上で有効であると考えられる。

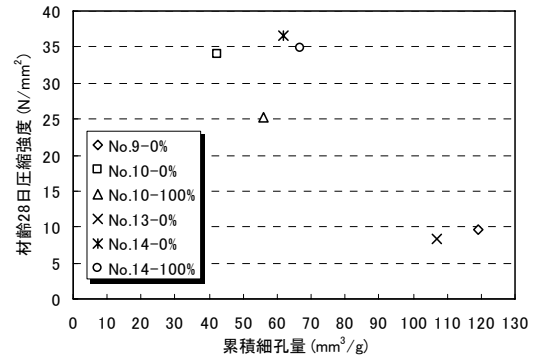


図-6 累積細孔量と圧縮強度の関係

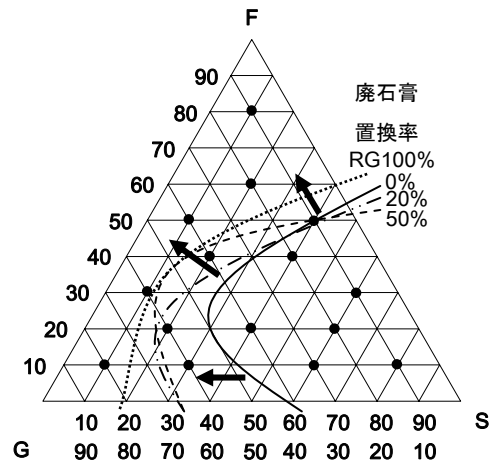


図-7 乾燥収縮の分布 (2500×10<sup>-6</sup>以下)

以上の結果から、流動性、強度特性の双方を概ね満足するCCCの結合材の組み合わせとして、フライアッシュ：スラグ：廃石膏=30：60：10を選択した(図-8丸印)。

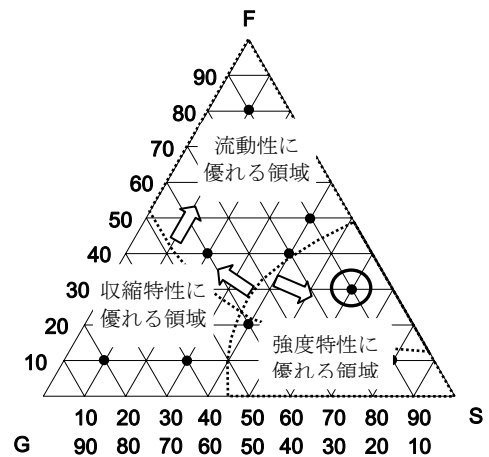


図-8 各種性能の特性分布

## 3. コンクリートの基礎的特性

### 3.1 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-4、-5に示す。本実験では、普通ポルトランドセメント(N)とフライアッシュ・高炉スラグ・石膏の混合セメントを用いた調合(CCC)の5種類のコンクリートを作製した。なお、CCC調合はアルカ

リ刺激剤として軽焼ドロマイトを外割質量比で 1%使用し、さらにアミノアルコール系防錆剤を 12kg/m<sup>3</sup> 添加した。

表-4 セメントを用いた調査

記号	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
N50	50	180	360	778	970	0.72
N70	70	180	257	850	970	--

表-5 CCC の調査

記号	W/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		水	F	S	RG	細骨材	粗骨材	混和剤
CCC30	30	180	180	360	60	461	970	3.60
CCC40	40	180	135	270	45	625	970	1.80
CCC50	50	180	108	216	36	715	970	0.90

### 3.2 試験結果

#### (1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリート試験結果を表-6 に示す。

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

記号	スランブ(cm)	スランブフロー(cm)	空気量(%)	C.T.(°C)
N50	18.5	31.0×30.8	5.4	16.4
N70	18.0	34.5×33.0	4.7	14.7
CCC30	24.5	43.5×43.2	3.0	18.3
CCC40	22.5	35.5×36.5	4.9	15.8
CCC50	19.5	31.0×33.0	5.9	16.1

#### (2) 圧縮強度・静弾性係数

材齢 14, 28 日における圧縮強度と静弾性係数(E)測定結果を図-9, -10 に示す。

CCC においても圧縮強度を水粉体比で制御することが可能である。CCC30 は材齢 14 日において N50 と同等の圧縮強度を有しており、材齢 28 日では約 1.5 倍の強度となっている。材齢 28 日における CCC 気中養生供試体は水中養生供試体と比較して、圧縮強度が 3 分の 1 程度に留まっていることから CCC にとって養生方法は重要であると考えられる。

材齢 28 日水中養生供試体の静弾性係数の実測値と計算値を図-10 に示す。計算値は日本建築学会 RC 規準式(1)により評価を行った。図に示すように実測値と比較して計算値は若干過小評価する傾向にあるが CCC と普通ポルトランドセメントコンクリートの対応は同程度である。

$$E = 33500 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^3 \quad (1)$$

k<sub>1</sub>(骨材に関する係数): N, CCC=1.0

k<sub>2</sub>(混和材に関する係数): N=1.0, CCC=0.95

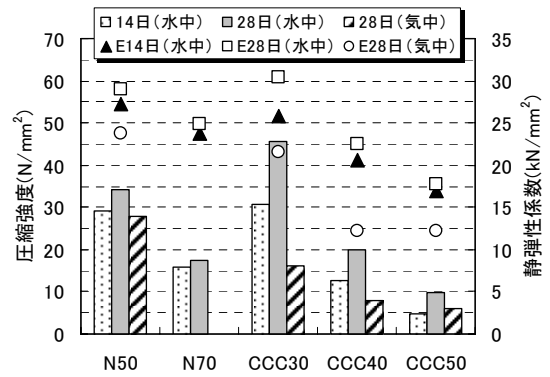


図-9 圧縮強度と静弾性係数

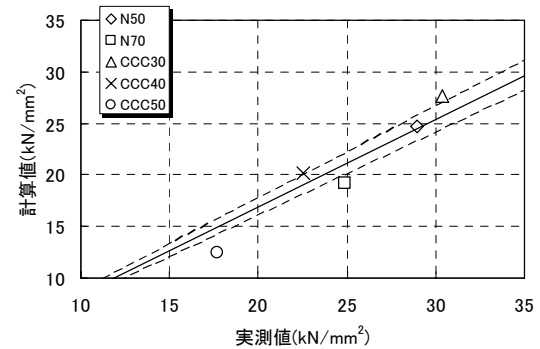


図-10 静弾性係数の実測値と計算値

#### (3) 乾燥収縮

乾燥収縮は、φ10×20cm の円柱供試体を用い、試験体中心部に埋込型ひずみゲージを設置し、打設後 1 週間水中養生を行った後に 20°C, R.H60%環境において測定を行った。乾燥収縮ひずみ測定結果を図-11 に示す。

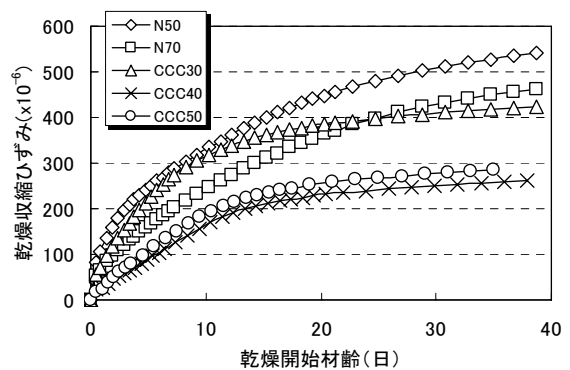


図-11 乾燥収縮ひずみの変化

図に示されるように、CCC は全般にセメントコンクリートよりも小さな収縮ひずみとなっている。アミノアルコール系防錆剤を使用した効果も考えられるが、この点については今後さらに検討を加えてゆきたい。

#### (4) 収縮拘束応力



収縮拘束用供試体 (10×10×100cm) を打設後 2 週間湿布養生し、20℃、R.H60%において拘束率を一定 (40%) とした一軸拘束試験を行った (写真-4)。収縮拘束応力を図-12 に示す。図に示すように CCC30 は N50 より乾燥収縮が小さいが、収縮拘束応力が大きくなっており、これは CCC30 の静弾性係数が N50 よりも大きいことが原因と考えられる。



写真-4 収縮拘束試験<sup>9)</sup>

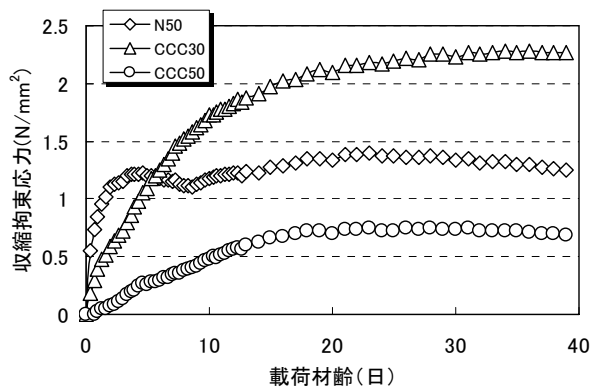


図-12 収縮拘束応力の変化

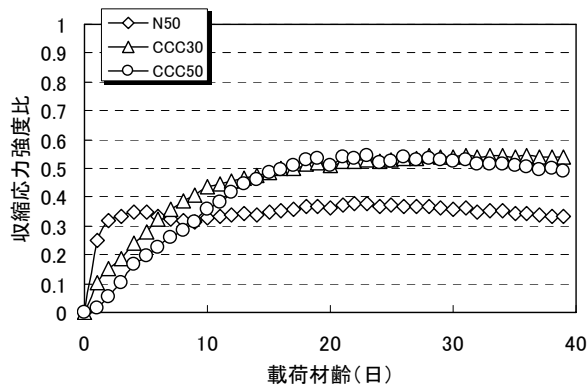


図-13 収縮応力強度比

収縮応力強度比の変化を図-13 に示す。比較用の割裂強度は材齢 14,28 日の試験によって得た値を CEB1990 Model Code によって近似した。N50 においては初期の収縮応力強度比の発現が高く、乾燥開始材齢 4 日付近の収縮拘束応力の漸減はこのクリープの影響と考えられる。CCC は初期から収縮応力強度比が漸増しているが、乾燥開始材齢 40 日の時点での収縮応力強度比は約 0.5 であり、通常想定される拘束率におけるひび割れの危険性は普通コンクリートと同程度と考えられる。

#### 4. まとめ

廃石膏ボード微粉末、高炉スラグおよびフライアッシュペーストの特性を検討し、これを混合セメントとして用いたコンクリートの基礎的特性を調査した。本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) CCC の圧縮強度はセメントコンクリート同様に水粉体比によって制御可能であり、セメントコンクリート(N50)と同等以上の圧縮強度が得られた。
- 2) CCC30 の乾燥収縮は、材齢 40 日時点で  $400 \times 10^{-6}$  となっており、セメントコンクリート(N50, N70)よりは若干、小さい結果となった。
- 3) CCC のヤング係数は RC 規準式により評価可能であった。
- 4) CCC30 はセメントコンクリートより収縮ひずみは小さいが、収縮拘束応力は大きい結果を示した。
- 5) 拘束率 40%下において、CCC のひび割れ危険性は普通コンクリートと同程度と考えられる。

#### 謝辞

本研究は経済産業省平成 18~19 年度地域新生コンソーシアム研究開発事業「環境負荷低減を指向した機能性未来型建材の開発」助成によるものである。

#### 参考文献

- 1) (社)石膏ボード工業会資料, 2002.
- 2) 安江任他: 石膏ボード廃材から石膏硬化体の試製, Inorganic Materials, Vol.4, Sep., 415-422, 1997.
- 3) 建材産業協会: 「建設廃棄物の再資源化に関する品質調査と用途開発に関する調査研究」成果報告書, 平成 17 年度
- 4) 近藤連一: 石膏スラグセメント (第 2 報), 窯業協会誌, Vol.62, No.703, pp.741-746, 1954.
- 5) 小林一輔, 魚本健人: 高炉水砕スラグ・排煙脱硫せっこう系セメントを用いたコンクリートの諸問題とその対策, セメント・コンクリート, No.409, pp.8-15, 1961.3
- 6) 石井光裕他: セメントを使わない高強度石炭灰固体の開発, 電力土木, No297, pp.11-18, 2002.1
- 7) 高橋和雄他: 高炉スラグ・石膏混合体を硬化体とし繊維補強した新材料の開発に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.480, pp11-20, 1996.2
- 8) 今本啓一他: 廃石膏ボード微粉末とフライアッシュ・高炉スラグを用いた無機複合硬化体の開発, 日本建築工学会論文報告集, FINEX, Vol.18, No.106, 第 13 巻, 第 1 号 p.1-6, 2006.5
- 9) 藤田数正他: 自動制御機能を備えたひび割れ試験装置の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.425-426, 2001