

論文 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コンクリートの基礎的力学的性質と温度応力特性

田中 章夫*1・伊藤 渉*2・今本 啓一*3

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) の基礎的力学特性について検討を行った。CCC の基礎的力学特性の試験結果と、マスコンクリートのひび割れ発生原因となる温度応力において、その試験結果に基づき、3次元有限要素法温度応力解析プログラムを使用して得られた解析結果から、CCC の優位性および将来性を提示するものである。

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, 透気係数, 温度応力解析

1. はじめに

我が国では、年間 138 万トン (2005 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¹⁾。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²⁾、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³⁾、その再利用の歩留まりは数%に過ぎない。一方、2 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 2 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⁴⁾、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⁵⁾。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⁶⁾。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⁷⁾。

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⁸⁾。研究では、粉体割合をフライアッシュ:高炉スラグ:廃石膏ボード微粉末の割合を 4:4:2 とした。その割合に対し水粉体比 30,40,50%の基礎的力学特性 (圧縮・引張強度, 静弾性係数, 自己・乾燥収縮), 耐久性 (透気係数) と温度応力解析をするにしがって必要な物性値である断熱温度上

昇と圧縮クリープの実験を行った。得られた物性値からマスコンクリートのひび割れ制御指針⁹⁾の予測式を修正し、CCC の係数を求めた。その修正した予測式を使い CCC30,40,50 と N50 の温度応力解析を行い比較したものである。

2. コンクリートの基礎的性質

2.1. 使用材料と物性

使用材料と物性を表-1, 成分表を表-2 に示す。

表-1 使用材料と物性

使用材料	物性
水	東京都上水道水
フライアッシュ (F)	密度 2.25g/cm ³ , 比表面積 3750cm ² /g
高炉スラグ (S)	密度 2.86g/cm ³ , 比表面積 4830cm ² /g
廃石膏 (G)	密度 2.34g/cm ³ , 比表面積 2.754m ² /g, pH6.79
軽焼ドロマイト (D)	比表面積 8.84m ² /g, pH12.63
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	陸砂 表乾密度 2.57g/cm ³ , 吸水率 2.51%, 粗粒率 2.65
粗骨材	砕石 表乾密度 2.66g/cm ³
混和剤	高性能AE減水剤 (SP8N), AE減水剤 (No, 70), AE剤 (303A)

表-2 成分表 (%)

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂
F	0.78	20.44	59.6	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	27	—	1.85	0.62	53.3	1.85	0.07	0.56	0.37	0.11	—
G	—	—	0.65	—	52.1	—	46.6	—	—	—	0.54	0.16	—
D	20.6	—	0.28	—	0.06	0.4	78.6	—	—	—	—	—	—

2.2. コンクリートの調査

環境配慮型構造材料である CCC の粉体割合はフライアッシュ(F),高炉スラグ(S),廃石膏ボード微粉末(G)について F:S:G=4:4:2 とし、さらに CCC の調査はアルカリ刺激剤として軽焼ドロマイト(D)を外割質量比で 1%使用した。この割合を用いた水粉体比(30%,40%,50%)の CCC の調査を表-3 に、水セメント比(45%,60%)のコンクリート (N)の調査を表-4 にフレッシュ性状を表-5 示す。

*1 東京理科大学大学院 建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東京理科大学大学院 建築学専攻 修士課程

*3 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-3 CCC の調合

記号	W/P	単位量(kg/m ³)						使用量(kg/m ³)		
		水	粉体			細骨材	粗骨材	刺激剤	AE剤	高性能AE減水剤
			F	S	G					
CCC30	30%	180	240	240	120	424	972	6	4.2	6
CCC40	40%	180	180	180	90	582	972	4.5	2.7	3.5
CCC50	50%	180	144	144	72	673	972	3.6	2	2.8

表-4 普通ポルトランドセメントを用いた調合

記号	W/C	単位量(kg/m ³)				使用量(kg/m ³)	
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
N60	60%	180	300	806	972	1.8	0.75
N45	45%	180	400	724	972	2.8	1

表-5 フレッシュコンクリート性状

記号	空気量(%)	スランプ(cm)	温度(°C)
CCC30	2.4	22.5	21
CCC40	2.7	23	23
CCC50	2.5	20.4	24
N45	4.6	19.7	22.5
N60	3.1	19.3	24

2.3. 実験結果

(1) 断熱温度上昇

簡易断熱温度上昇試験機は、マスコンクリートの温度応力解析における発熱特性値を求める試験である。コンクリートの水和反応による発熱に合わせて周囲の温度を同一に保ち、熱量を測定する。その結果を図-1に示す。比較対象となる普通ポルトランドセメント(水セメント比 50%(N50))は、コンクリートの発熱予測式を使用した計算結果である。CCC は普通ポルトランドセメントと比べて発熱が少なく、水粉体比によらず、最大温度にあまり変化が見られない。水粉体比が大きいほど、発熱速度が遅い傾向にある。

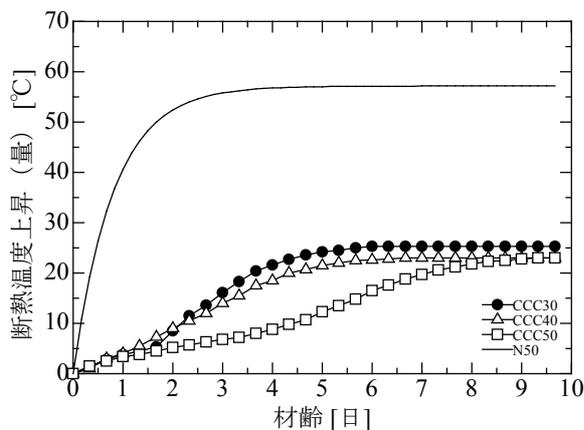


図-1 断熱温度上昇

(2) 圧縮強度

強度用試験体は 100φ×200 mm とし、圧縮クリープ試験を行う際に必要な応力を得るために CCC を封緘養生、

一方、N は気中養生として恒温恒湿室(20°C, R.H.60±5%)の環境下で養生を行ったものを使用した。

CCC30, 40, 50 と N45, 60 の実験値とマスコンクリートのひび割れ制御指針に基づいて N50 の予測ならびに実験値から係数(式 1)を修正しフィッティングさせた曲線を図-2に示す。

CCC の圧縮強度の発現傾向は N に比べ緩やかに上昇する。また、材齢 28 日において、水粉体比が小さいほど圧縮強度が高いことから水粉体比によって圧縮強度を制御することは可能である。

$$f_c(t_e) = \left\{ a \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - b)/T_0} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot c \quad (式 1)$$

- N50 : a=0.31 b=0.5 c=25
- CCC30 : a=1.09 b=2.35 c=52.8
- CCC40 : a=1.01 c=1.78 c=45.1
- CCC50 : a=2.11 c=0.21 c=37.6

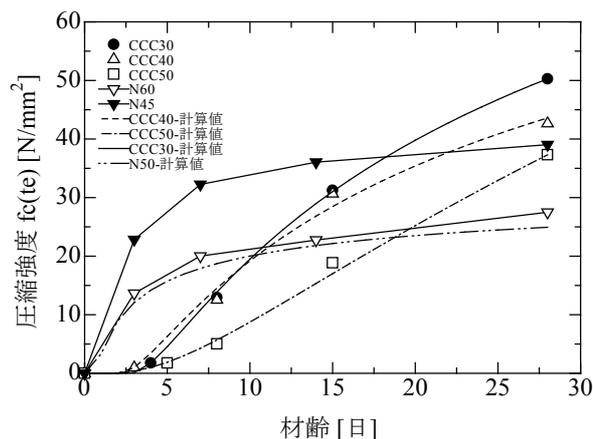


図-2 圧縮強度

(3) 引張強度

引張強度試験は JIS A 1113 に準じて行った。

試験結果を図-3に示す。割裂強度はコンクリートとしての圧縮強度の 1/10~1/15 の範囲で収まっており、一般的なコンクリートと同様である。圧縮強度と同様に、割裂強度結果から係数(式 2)を予測した。

$$f_t(t_e) = n \times f_c(t_e)^m \quad (式 2)$$

- N50 : n=0.18 m=0.75
- CCC : n=0.21 m=0.75

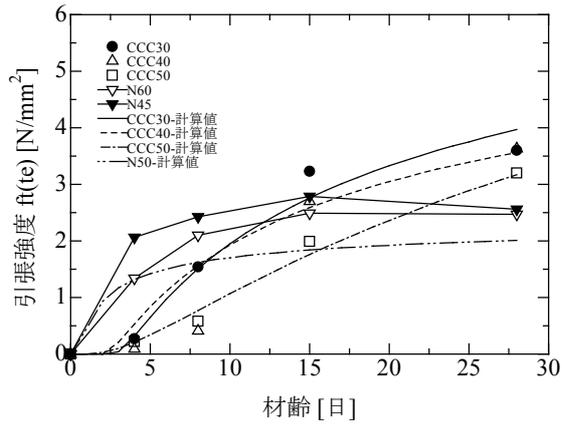


図-3 引張強度

(4) 静弾性係数

圧縮強度より静弾性係数を日本建築学会 NewRC 規準式 (式 3) によって計算し、これを実測値と比較した結果を図-4 に示す。若材齢(5kN/mm²以下)を除き、ほぼ両者に相関性があることから、RC 規準式を用いて N と同様に CCC の静弾性係数を評価できると考えられる。

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{r}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (式 3)$$

k₁(骨材に関する係数) : N,CCC=1.0

k₂(混和剤に関する係数) : N=1.0, CCC=0.95

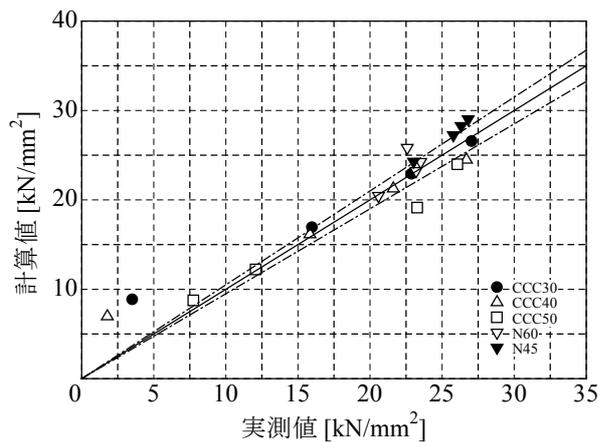


図-4 静弾性係数の実測値と計算値

式 1 で求めた f_c(τ) を使用し、CCC の静弾性係数に実験値にフィッティングする係数を求めた、その結果を (式 4) と図-5 に示す。

$$E(t_e) = d \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{r}{2.4}\right) \times \left(\frac{f_c(t_e)}{60}\right)^e \quad (式 4)$$

N50	: d=3.35	e=1/3	k ₁ =1.0	k ₂ =0.95
CCC30	: d=3.08	e=0.44	k ₁ =1.0	k ₂ =0.95
CCC40	: d=3.31	e=0.52	k ₁ =1.0	k ₂ =0.95
CCC50	: d=3.25	e=0.33	k ₁ =1.0	k ₂ =0.95

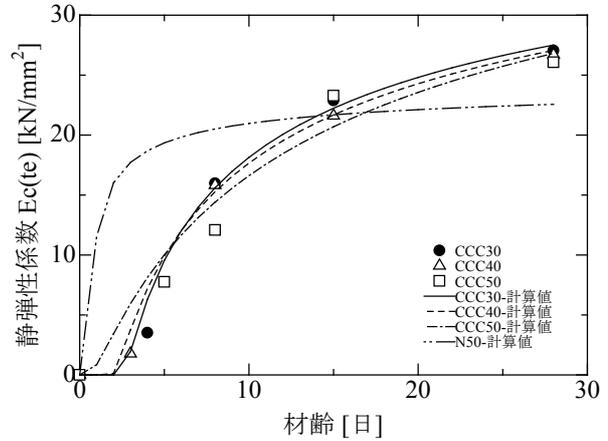


図-5 静弾性係数の計算値

(5) 自己収縮・乾燥収縮

自己・乾燥収縮は、100φ×200mm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た。自己収縮は初期脱型後、アルミテープによりシールして 20±2℃の環境下にて計測を行った。また、乾燥収縮は打設後一週間水中養生(20℃)を行った後、恒温恒湿室にて測定を行った。その結果を図-6、-7 に示す。

自己収縮は、初期に膨張挙動を示し、その後の収縮量は N より増大する傾向にある。CCC の乾燥収縮は初期から急激な収縮を見せているが材齢 70 日の時点では N と概ね同等である。CCC を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抑制の観点において、特に顕著な増大傾向を示す自己収縮の抑制は重要であり、この対策は今後の課題である。

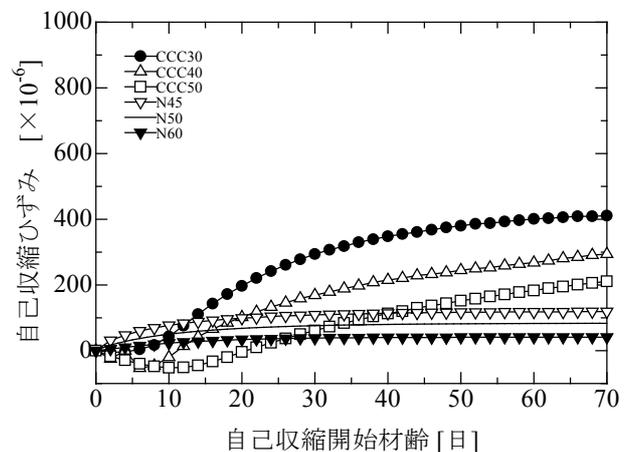


図-6 自己収縮

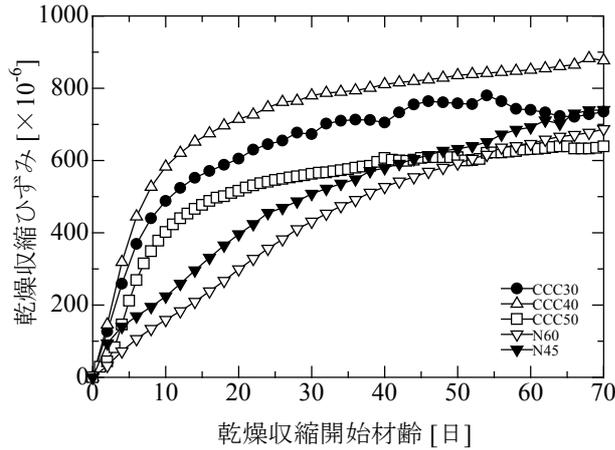


図-7 乾燥収縮

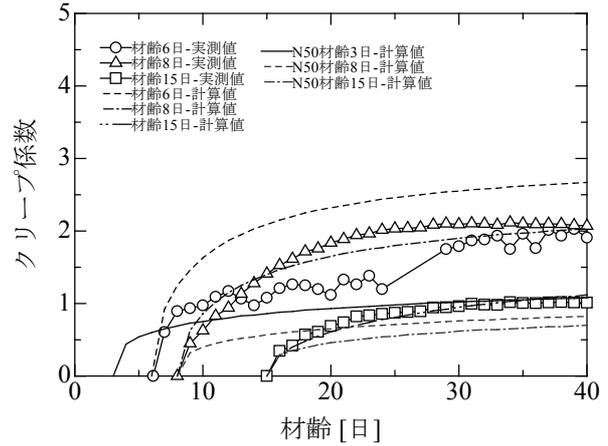


図-8 CCC30 のクリープ係数

(6) クリープ係数

クリープ試験(写真-1)は、JSTM C 7102:1999 に準じて行った。100φ×200 mmの試験体中央部に埋込型ひずみゲージを設置し、アルミテープによって封緘状態にした試験体を3つで1つのクリープ試験体とした。荷重応力は、荷重材齢の圧縮強度の20%とし同時に自己収縮ひずみの測定も行った。実験結果を各水粉体比ごとに図-8、-9、-10に、指針から求められたN50のクリープ係数の発現を各図中に示す。なお、実験結果から圧縮強度同様に指針に基づき実測値にフィッティングさせたCCCの係数とN50の係数を(式5)に示す。同一材齢では、CCCの方が普通ポルトランドセメントコンクリートより大きい傾向にある。

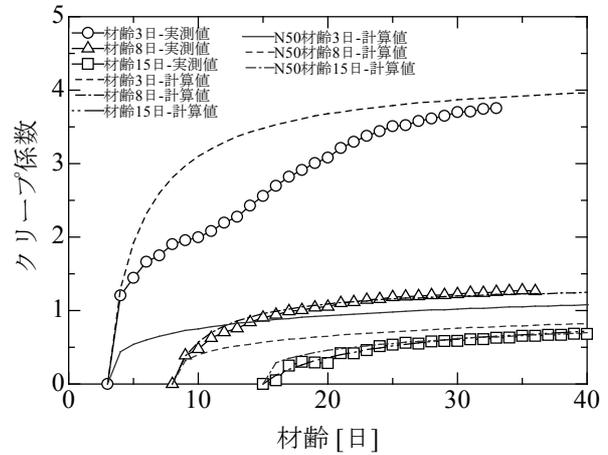


図-9 CCC40 のクリープ係数



写真-1 クリープ試験機

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^f$$

$$\phi_0 = g \cdot (E_c(t)/E_{c28})^h$$

$$\beta_H = c \cdot (E_c(t)/E_{c28})^4 + 7.6$$

$$c = 117 - 1.11f_{c28}$$

(式 5)

N50	: f=0.3	g=1.05	h=-1.04
CCC30	: f=0.5	g=1.50	h=-0.85
CCC40	: f=0.45	g=1.05	h=-0.71
CCC50	: f=0.4	g=0.95	h=-1.30

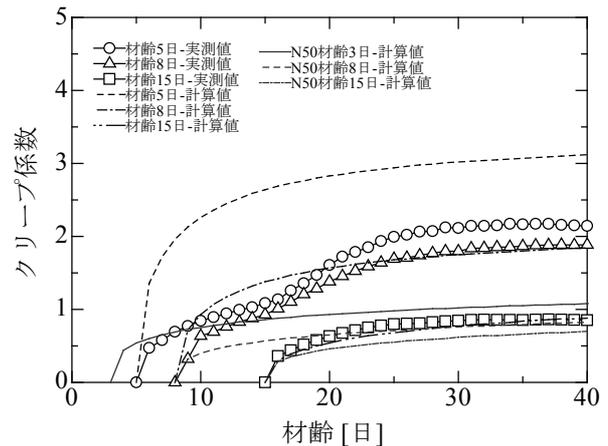


図-10 CCC50 のクリープ係数

(7) 透気試験

透気試験体は 150φ×55 mmの円柱試験体を各調査にて2つ作り、材齢28日まで気中・水中養生を行った。その後、前処理として50°C乾燥機で2週間乾燥させたもので実施した。

透気係数を求める方法として写真-2 に示してあるように、試験体をセルに格納し、両面を気密にした状態で加圧し、圧縮性流体の円柱流を仮定したハーゲン-ポアズイユ則より透気係数 $K(m^2)$ を求める RILEM 透気試験機 (RILEM CEMBUREAU 法) を用いて行った。その結果を図-11 に示す。記号の”W”は水中養生, ”W”のないものは気中養生を表している。透気係数は、数値が低いほど緻密であることを示す。

材齢 28 日養生の時点では CCC は明らかに N より粗であり、鉄筋の腐食因子である酸素や水などを通しやすいと判断できる。さらに養生条件の違いによって、透気係数に明らかな違いが N と同様に見られることから、CCC にとっても水分供給は重要であると思われる。

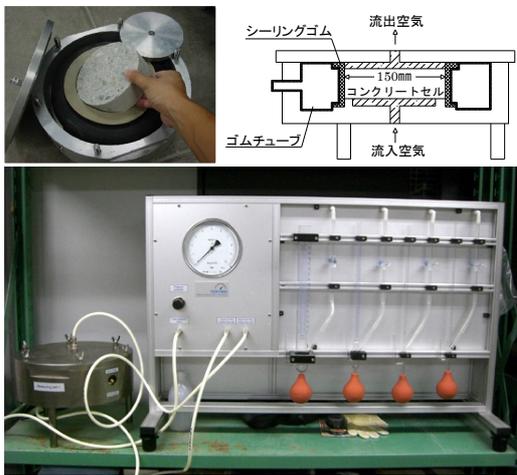


写真-2 RILEM 透気試験機 (RILEM CEMBUREAU 法)

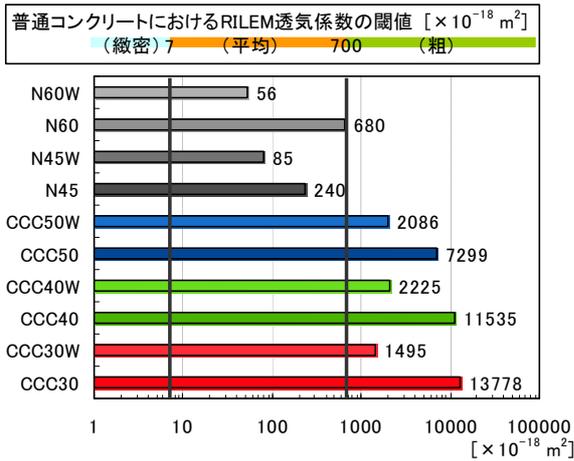


図-11 透気係数

2.4. 温度応力解析

CCC の実用利用を目指すにあたり、実大構造部材(大断面部材)を施工した場合の特性を知ることは重要である。そこで、マッシブな構造物 (マスコンクリート) のひび割れ発生原因となる温度応力に焦点を当て、3次元有限要素法温度応力解析プログラムを使用して解析を

行った。

項目 2.2 の物性値に基づき、温度応力解析を実施した。解析対象は図に示めす壁状構造物とした (アイソパラメトリック要素数 10242, 節点数 12121) 図-12 に示す。

解析結果を図-13, -14, -15, -16 に示す。N50 の温度応力は、材齢 14 日付近で引張強度を超え、この前後で構造物にひび割れが発生することが予想された。一方、CCC を用いたマスコンクリートの温度応力は低い。これは図-13 に示されるように、温度上昇量が少ないためである。しかし、一方で自己収縮による応力の増大が著しく、本材料の大断面部材の適用を考えるあたり、この自己収縮を低減することが今後の課題であるとする。

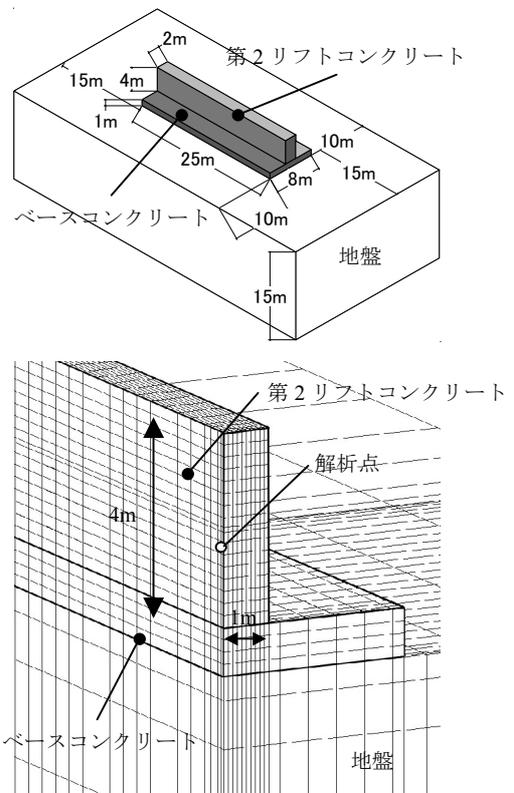


図-12 要素 (上: 壁状構造物, 下: 1/4 解析モデル)

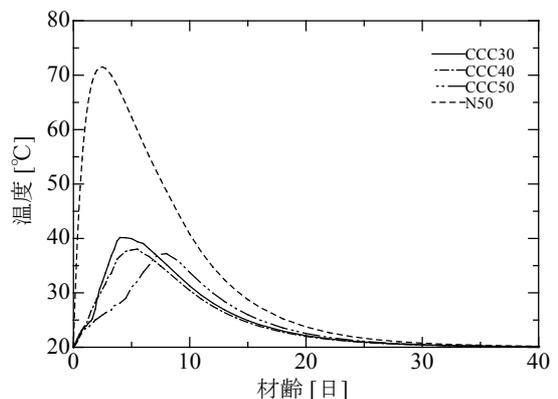


図-13 温度履歴

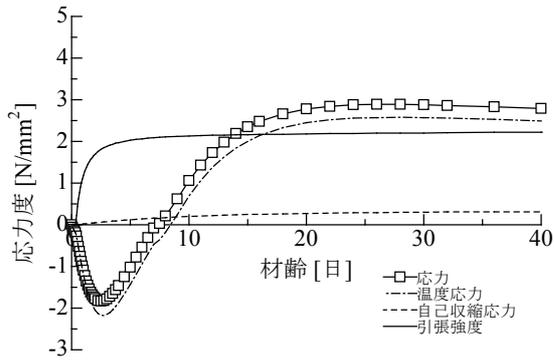


図-14 N50 応力履歴

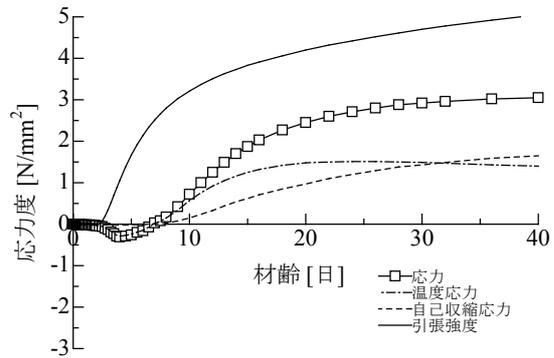


図-15 CCC30 応力履歴

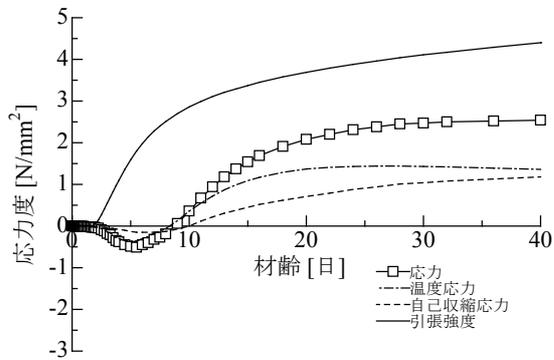


図-16 CCC40 応力履歴

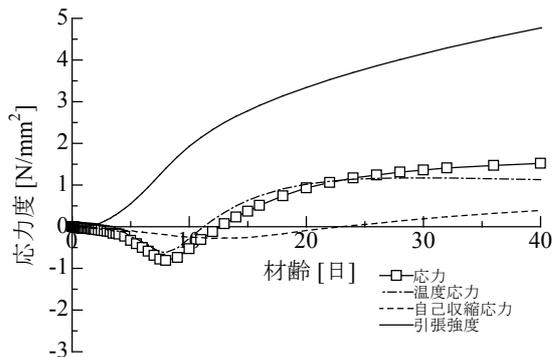


図-17 CCC50 応力履歴

3. まとめ

本研究で得た混合セメントコンクリートの基礎的力学的性質と解析結果を普通ポルトランドセメントコンクリートと比較し得られた知見をまとめる。

- 1) 混合セメントコンクリートの断熱温度上昇量は普通ポルトランドセメントコンクリートの 1/2 以下である。
- 2) 圧縮強度は普通ポルトランドセメントと同様に水粉体比によって制御可能であり、普通ポルトランドセメントと同等もしくはそれ以上である。
- 3) 静弾性係数は、NewRC 規準式で評価できる。
- 4) 自己収縮は、普通ポルトランドセメントより増大する傾向にある。
- 5) 透気係数は、普通ポルトランドセメントコンクリートより高い。水中養生することにより透気性は改善される傾向にある。
- 6) 混合セメントコンクリートは温度応力において普通ポルトランドセメントコンクリートより優位性を持つが、自己収縮応力の低減が課題である。

参考文献

- 1) (社) 石膏ボード工業会資料等, H17
- 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を刺激剤とした高炉スラグ-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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.349-354, 2008.7
- 9) マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説 (日本建築学会)
- 10) Concrete Society Technical Report No.31, Permeability Testing of Concrete-A Review of methods and Experience, p75, 1988.