

# 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における人工軽量骨材の内部養生効果

伊藤 渉<sup>\*1</sup>・野々山 聡<sup>\*2</sup>・今本 啓一<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究は、廃石膏ボードの再利用を図るひとつの手法を提案する、廃石膏ボード微粉末、高炉スラグ、フライアッシュを結合材として用いた混合セメントコンクリート (Composite Cement Concrete : CCC) に関するものである。既往の研究において、CCC の基礎的力学的特性等についての検討を行い、その自己収縮ひずみの大きさが看過できないことを示した。本論は、その収縮特性の改善を図る試みのひとつとして、収縮を低減する効果を有するものとして再認識される人工軽量骨材の適用性を検討した。本論は、CCC における力学特性および収縮特性等を実験的に検討した上で、人工軽量骨材の内部養生効果について述べるものである。

**キーワード:** 人工軽量骨材, 廃石膏ボード微粉末, 高炉スラグ, フライアッシュ, 内部養生

## 1. はじめに

地球環境問題への対策、循環型社会を目指す取り組みは、現代社会の重要課題となっている。建築・土木分野では、施工方法や施工機器の改善によって、二酸化炭素排出を低減させる等の取り組みが行われているが、更なる取り組みとして、資源の枯渇、処分場のひっ迫等の問題から、廃棄物や産業副産物の構造材料等への積極的利用も重要である。本研究は、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 (以下CCCと略。(CCC : Composite Cement Concrete)) 利用を図ること、同時に産業副産物の構造材料への利用拡大を目的とし、提案するものである<sup>1)</sup>。これに関する既往の研究では、田中らによって、その基礎的力学的性質と、将来的に、マスコンクリートでの適用を想定し検証された、温度応力特性についての検討が成された<sup>2)</sup>。

本論は、2) で課題として明らかになった自己収縮低減を目的とした一つの手法として、質量の低減だけでなく、収縮低減効果も期待されている人工軽量骨材を粗骨材に用いた CCC の実験結果を示すものである。

実験は 2 つのシリーズで構成されている。シリーズ 1 では、供試体レベルを用いたもので、力学特性 (圧縮強度, 引張強度, 静弾性係数), および収縮特性 (乾燥収縮, 自己収縮) 等について検証し、普通骨材との比較を行った。シリーズ 2 では、CCC を実構造物として適用した場合の性質および特性を検証する試みとして、柱部材を想定したモデルを作製し、温度特性, 収縮特性, 人工軽量骨材による内部養生効果について検討した。同時に、比較のために、普通ポルトランドセメントコンクリートでも同モデルを作製し、両者を比較した結果も示す。

## 2. 使用材料について

実験に使用した材料一覧を表-1 に示す。

表-1 使用材料および諸物性

使用材料	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
廃石膏ボード微粉末	(PWB)	2.31	-
高炉スラグ	(GGBFS)	2.86	-
フライアッシュ	(FA)	2.25	-
軽焼ドロマイト	(BD)	2.99	-
普通ポルトランドセメント	(C)	3.16	-
細骨材*	(S)	2.58	2.31
人工軽量骨材**	(ALA)	1.63	26.0
粗骨材(碎石)*	(G)	2.66	0.70
混和剤		AE剤(303A) 高性能AE減水剤(SP8N)	

\*: 表乾状態, \*\*: 飽水状態

調査およびフレッシュ試験結果を表-2 に示す。人工軽量骨材を用いた CCC を CCC\_L, 普通骨材を用いた CCC を CCC\_N, 普通ポルトランドセメントコンクリートにおいて人工軽量骨材を用いたものを L, 普通骨材を用いたものを N と表記している。記号の後の数字は、水結合材比を表している。CCC は、PWB, GGBFS, FA を混合して結合材として用いるが、その構成は、PWB : GGBFS : FA = 20 : 40 : 40 (%) とした。この割合は、1) の研究結果から、流動性, 強度特性の双方を概ね満足する組み合わせとして選択したものである。軽焼ドロマイトは、アルカリ刺激剤として使用した。CCC は、フライアッシュに含まれる未燃カーボンが混和剤を吸着し効果を低減させるため、AE 剤を多く入れる必要があった。

\*1 東京理科大学 工学研究科 建築学専攻 修士課程 (正会員)

\*2 東京理科大学 工学研究科 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 工博 (正会員)

表-2 調合およびフレッシュ試験結果

記号	W/B (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )								B × %			スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
		水 (W)	結合材(B)				S	ALA	G	BD	AE剤	高性能 AE減水剤				
			PWB	GGBFS	FA	C										
シリーズ1	CCC_L50	50	180	72	144	144		686	591		1.0	1.2	0.2	20.0	0.3	21.5
	CCC_L40	40		90	180	180		578				7.9	0.3	18.0	3.8	22.0
	CCC_L30	30		120	240	240		434				8.0	0.5	16.0	2.4	22.0
	CCC_N50	50	180	72	144	144		673	972	1.0	0.6	0.3	20.5	2.5	24.0	
	CCC_N40	40		90	180	180		582			0.6	0.4	23.0	2.7	23.0	
	CCC_N30	30		120	240	240		424			0.7	0.7	22.5	2.4	21.0	
シリーズ1	L40	40	180				450	578	591			2.8	0.2	18.5	5.5	22.0
	N40	40								965			0.7	0.3	20.5	2.7
シリーズ2	CCC_L30	30	180	120	240	240		434	591	1.0	10.0	0.6	19.0	2.7	22.0	
	CCC_N30	30									965		3.1	0.7	19.0	2.1
	L30	30	180				600	434	591			0.5	0.4	21.0	3.3	23.0
	N30	30								965			0.7	0.6	22.5	5.8

3. シリーズ1

3.1 実験概要

シリーズ1は、φ100mm×高さ200mmの供試体を作製し、CCC\_L、CCC\_N、LおよびNについての強度特性（圧縮強度、引張強度、静弾性係数）、および収縮特性（乾燥収縮、自己収縮）等を比較するものである。CCC\_Nの結果は、2) から引用したものであるが、その結果から、材齢28日以降も継続した強度発現が予想されたことから、CCC\_Lでは、強度試験を材齢91日まで実施した。供試体は、強度試験日まで、恒温恒湿室（温度20°C、相対湿度60%）にて封かん養生させたものを使用した。本論では、供試体の中心部に埋込み型ひずみゲージを設置し、材齢1週まで水中養生させた後、恒温恒湿室にて計測したひずみを乾燥収縮ひずみ、脱型後、表面をアルミテープで覆い、空気中への水分乾燥を断った状態で、恒温恒湿室にて計測したひずみを自己収縮ひずみとしている。

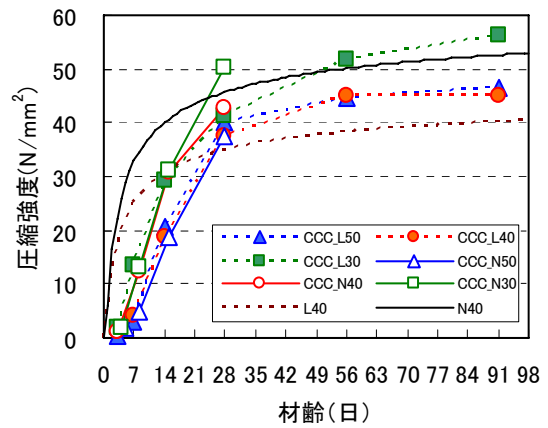
3.2 力学特性

(1) 圧縮強度

圧縮強度の変化を図-1に示す。圧縮強度試験は、JIS A 1108に示される圧縮強度試験方法に準じたが、L40およびN40の結果は、材齢28日強度を試験し、式(1)から求めた計算値である。CCC\_NはNに比べて、強度発現が遅い傾向にあったが<sup>2)</sup>、CCC\_Lにおいても同様の傾向であった。人工軽量骨材を用いたことによる、強度的な影響については、材齢7日でのCCC\_L40がCCC\_N40の35%程度に低下したものが最大で、概ね大幅な強度低下は見られなかった。材齢28日以降の強度発現であるが、水結合材比30%で大きいことが確認されたが、40%以上では、大きな強度発現はみられなかった。

(2) 引張強度

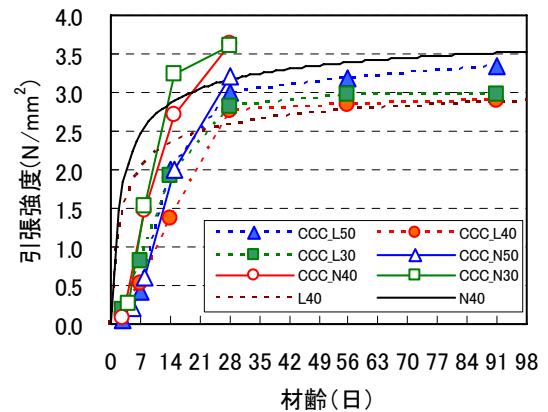
引張強度の変化を図-2に示す。引張強度試験は、JIS A 1113に示される割裂引張強度試験方法に準じたが、



$$f_c(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \cdot f_{c28} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

s: 0.31(普通ポルトランドセメント)  
t: 材齢(日)  
f<sub>c28</sub>: 材齢28日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>) [L40: 35.0, N40: 45.8]

図-1 圧縮強度の変化



$$f_t(t) = 0.18 \cdot f_c^{0.75} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

図-2 引張強度の変化

L40 および N40 の結果は、式 (2) から求めた計算値である。引張強度では、人工軽量骨材を用いたことによる強度低下が、圧縮強度よりも大きく影響したとみられる。材齢 28 日以降の強度発現については、水結合材比によらず低い。

### (3) 静弾性係数

静弾性係数の変化を図-3 に示す。L40 および N40 の結果は、図-4 中の式 (3) から求めた計算値である。人工軽量骨材を用いたことで、CCC\_L は CCC\_N に比べて、静弾性係数が低下したが、L, N との比較では、CCC\_L, CCC\_N とともに同程度であった。そこから図-4 に示すように、New RC 規準式 (式 (3)) を用いて CCC の静弾性係数を評価したところ、実験値と計算値が概ね一致していることから、CCC の静弾性係数は、式を用いて骨材種類によらず、予測することが可能であると考えられる。

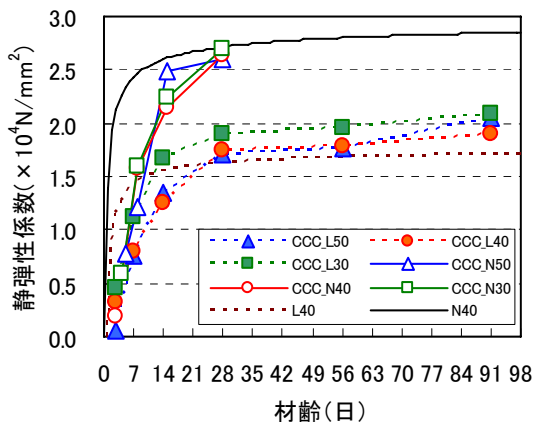
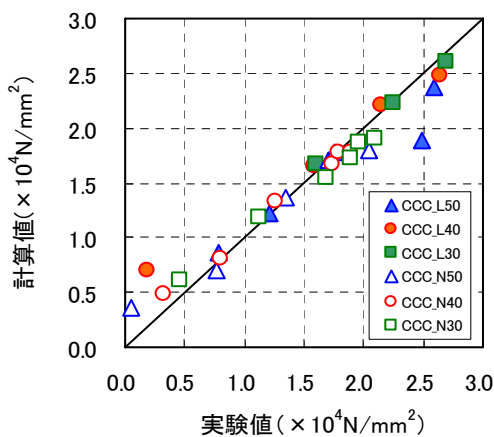


図-3 静弾性係数の変化



$$E_c(t) = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_c}{60}\right)^{1/3} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

$\gamma$ : 単位容積質量 (t/m<sup>3</sup>)

[L:1.88, N:2.32, LC:1.87, GC:2.22]

図-4 静弾性係数 実験値と計算値の相関性

## 3.3 収縮特性

### (1) 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみの変化を図-5 に示す (この項目のみ L40 ではなく L50 のデータ)。収縮は正として示す。水結合材比 40%, 50%では CCC\_L にしたとき、収縮が低減されており、人工軽量骨材が収縮低減に関与したと思われるが、30%では、逆に CCC\_N よりも CCC\_L の方が、収縮が増大した。

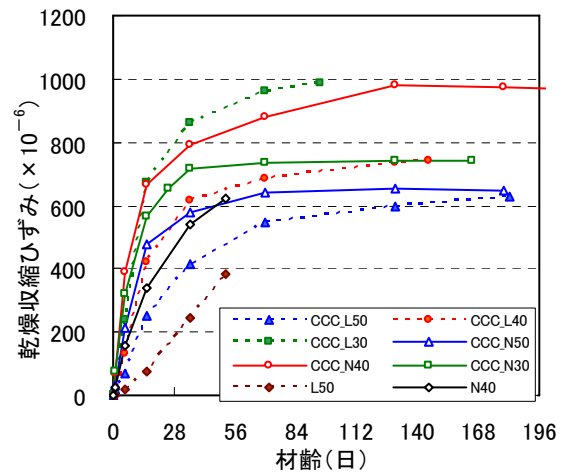


図-5 乾燥収縮ひずみの変化

### (2) 自己収縮

自己収縮ひずみの変化を図-6 に示す。CCC\_Nは、自己収縮がNと比べて非常に大きいことが問題であったが<sup>2)</sup>、CCC\_Lでは、人工軽量骨材の水分供給効果により、収縮低減にとどまらず、打設直後から急激な膨張を示すという正反対の挙動を示した。Lにおいても膨張傾向を示したが、その膨張量はLよりも著しく、水結合材比が低いほど大きい。

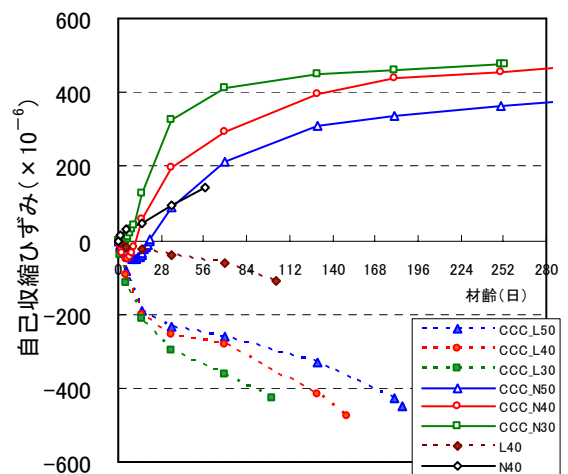


図-6 自己収縮ひずみの変化

### 3.4 その他の特性

#### (1) クリープ

写真-1 に示すクリープ試験機を用い、JSTM C 7102 : 1999 に準じて圧縮クリープ試験を行った。一定载荷(载荷材齢時の圧縮強度×20%) 中で測定されたひずみから、収縮ひずみを除いて得られたひずみをクリープひずみとし、材齢とともに変化するクリープ係数(クリープひずみ/载荷時の弾性ひずみ)を図-7 に示す。クリープ係数が大きいほど、クリープし易いことを表し、CCC\_N では、Nよりもクリープが進行し易いという結果を得たが<sup>2)</sup>、CCC\_Lでは、全ての载荷材齢においてCCC\_Nよりも低い値を示した。特に若材齢での著しい効果がみられ、CCCにおいて、人工軽量骨材がクリープを低減する効果が認められた。



写真-1 クリープ試験機

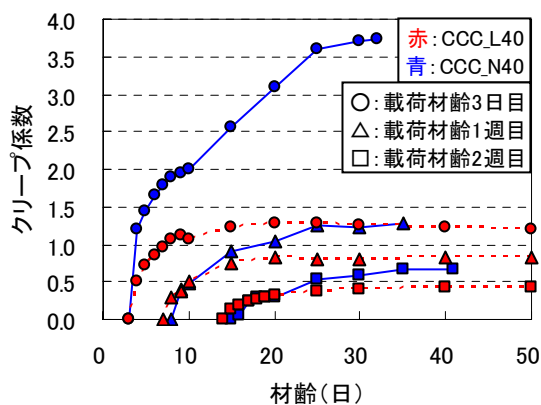


図-7 クリープ係数の変化

#### (2) 断熱温度上昇

写真-2 に示す、簡易断熱温度上昇試験機を用いて、断熱温度上昇試験を行った結果を図-8 に示す。断熱温度上昇試験は、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一定に保ち、発熱を測定するもので、CCC\_Nでは、結合材に水和発熱を低減する作用をもつ高炉スラグおよびフライアッシュを含むことから、Nに比べて著しく低い値を示した<sup>2)</sup>。CCC\_Lにおいても、CCC\_L50で発熱速度に変化が認められたものの、概ね温度上昇量に変化は見られなかった。



写真-2 簡易断熱温度上昇試験機

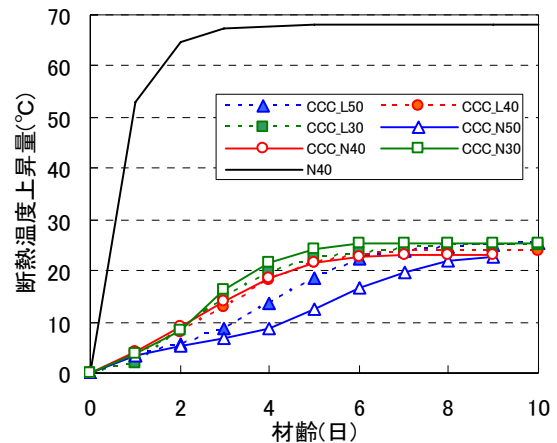


図-8 断熱温度上昇

## 4. シリーズ 2

### 4.1 実験概要

シリーズ 2 は、CCC\_L, CCC\_N, L, Nについて実大断面部材を想定した試験体を作製し、温度特性、収縮特性とコンクリートの含水状態について検討することを目的とした実験である。内法寸法 400×400×400mmの木製型枠に、写真-3 のように、高さ 200mmの地点にセラミックセンサーを、試験体中心部、表層部とその中間部に配置した。また、埋込み型ひずみゲージを試験体中心部、表層部に配置した。セラミックセンサー<sup>3)</sup>は、電気抵抗値を測定することでコンクリート内部の含水状態を判断する指標として用いた。電気抵抗値の測定にはLCRメーターを使用した(1kHz, 1000V)。試験体は恒温恒湿室に配置し、型枠脱型は材齢 7 日に行った。また、試験体側面にドリルで水平方向に削孔し、湿度センサーを埋設(CCC:材齢 8 週目, NおよびL:材齢 5 週目)して相対湿度を測定した。

### 4.2 温度特性

図-9, 図-10 に各試験体の中心部および表層部で計測された温度変化を示す。CCCは、総じて普通コンクリートよりも発熱が小さく、図-8 で示した断熱温度上昇試験結果を裏付ける結果となった。CCCでは、脱型後、表面部、中心部ともに躯体温度が外部温度よりも下がる現象が確認された。この理由としては、脱型によって水分が蒸発することによる気化熱の影響によるものとも推察されるが、詳細は今後の検討課題である。

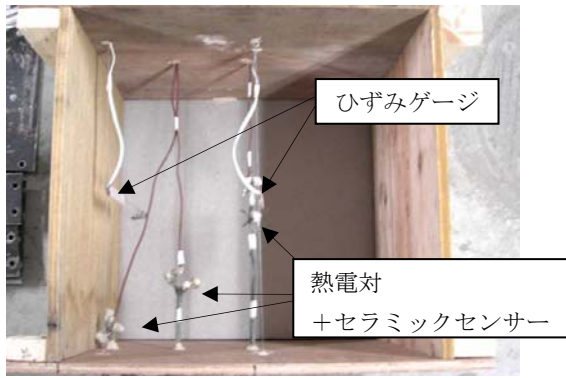


写真-3 熱電対等の配置図

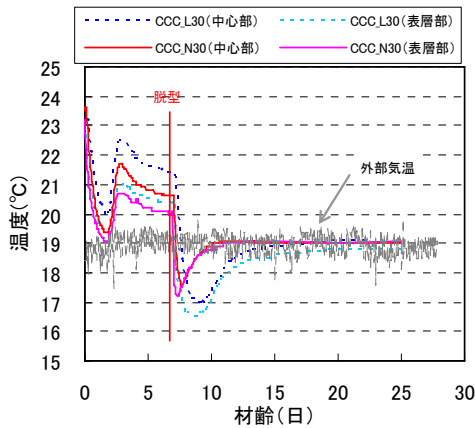


図-9 温度変化 (CCC)

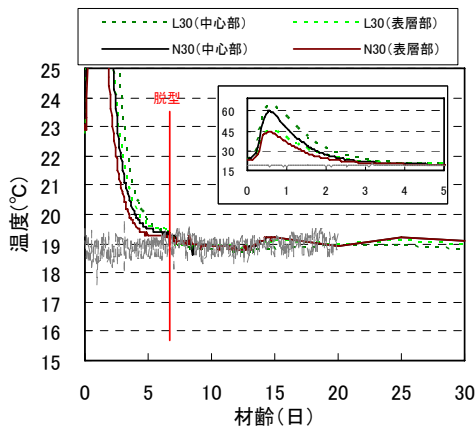


図-10 温度変化 (普通コンクリート)

### 4.3 収縮特性

図-11、図-12 に各試験体の中心部および表層部で計測された収縮ひずみの変化を示す。CCC\_Nでは、初期に膨張の挙動を示したものの、脱型直後から急激に収縮に転じた。収縮は表層部にとどまらず、中心部にも及んだ。一方、CCC\_Lでは、初期から中心部、表層部ともに膨張を示し、脱型後も中心部、表層部ともに膨張を続けており、人工軽量骨材の内部養生効果が劇的に発揮された。普通コンクリートについては、従来の高強度コンクリー

トにおける人工軽量骨材による自己収縮低減効果と同様の結果<sup>4)</sup> が得られている。

### 4.4 セラミックセンサーが示す電気抵抗値

図-13、図-14 に各試験体の中心部および表層部において、セラミックセンサーを用いて計測された電気抵抗値の変化を示す。普通骨材を用いたコンクリートについては収縮ひずみの増加を裏付ける形で電気抵抗値が増加している。しかし、人工軽量骨材を用いたコンクリートの表層部において、収縮ひずみとしては膨張傾向を示すにも関わらず、電気抵抗値は増大するケースがある (CCC\_L)。セラミックセンサーは、主として液体の多少を評価するものか、また、相対湿度の高低を評価するものか不明な点がある。そこで、試験体に設置された相対湿度の変化を計測できる湿度センサーの変化を図-15 に示す。図から明らかに、湿度センサーでは人工軽量骨材を用いた場合において、相対湿度が高い値を示しており、このことから、湿度センサーは主に水蒸気としての水分の状態を検知することが予想される。一方で、セラミックセンサーでは電気抵抗値が増大し、湿度センサーでは高湿度が計測されている状態でほぼ同じ位置の収縮ひずみが膨張を示しているということは、人工軽量骨材による水分供給効果は、液体としての移動ではなく骨材から水蒸気として移動することによって供給されるものと思われる。

### 5. まとめ

本研究から以下のことが明らかになった。

1. 人工軽量骨材を用いた CCC の圧縮強度は、普通骨材を用いた場合と強度発現に大きな差は認められなかった。割裂引張強度は、普通骨材を用いた場合よりも相対的に低い傾向を示した。
2. 人工軽量骨材を用いた CCC の静弾性係数も、New RC 規準式で概ね評価が可能である。
3. 人工軽量骨材を用いることで、概ね CCC の乾燥収縮の低減が可能である。
4. 人工軽量骨材を用いることで、人工軽量骨材の水分供給効果により、著しく自己収縮が低減され、むしろ膨張の挙動を示した。
5. CCC において、人工軽量骨材がクリープを低減する効果が認められた。
6. CCC において、断熱温度上昇量に骨材種類の影響は認められなかった。
7. 400mm 角の実大模擬部材において、収縮ひずみと含水率による電気抵抗および湿度センサーによる相対湿度の変化を計測した。セラミックセンサーでは電気抵抗値が増大し、湿度センサーでは高湿度が計測されている状態でほぼ同じ位置の収縮ひずみが

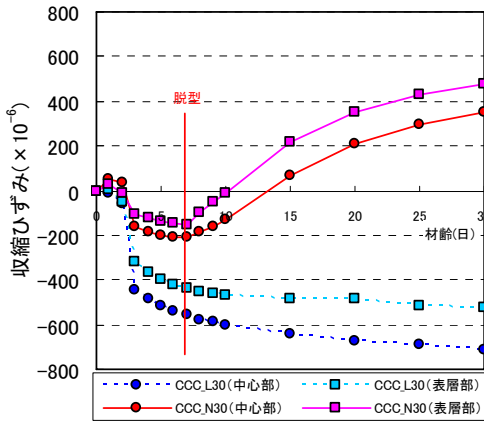


図-11 収縮ひずみの変化 (CCC)

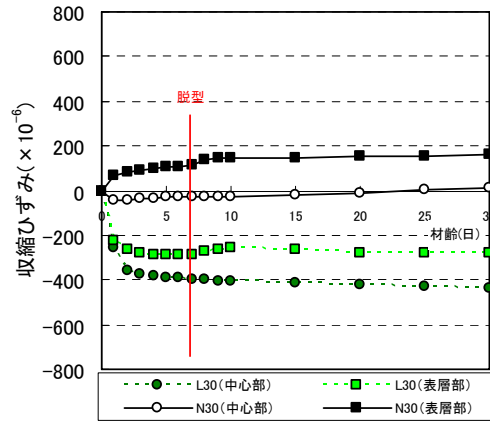


図-12 収縮ひずみの変化 (普通コンクリート)

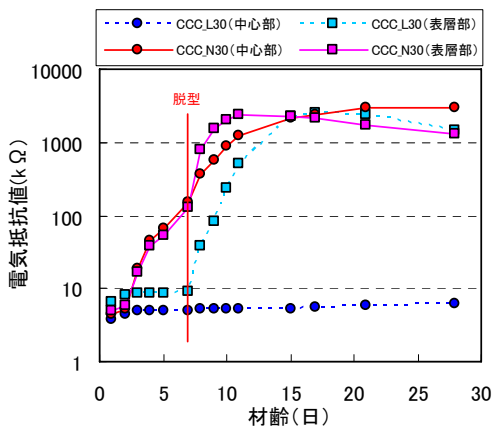


図-13 電気抵抗値の変化 (CCC)

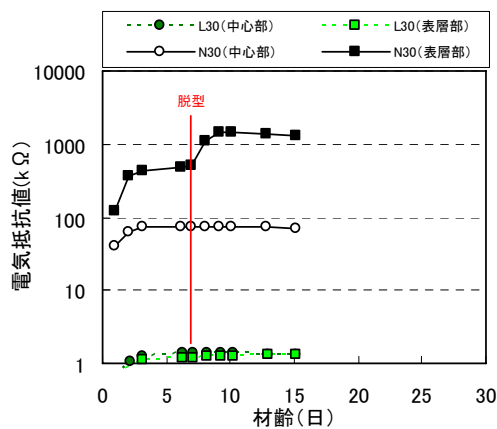


図-14 電気抵抗値の変化 (普通コンクリート)

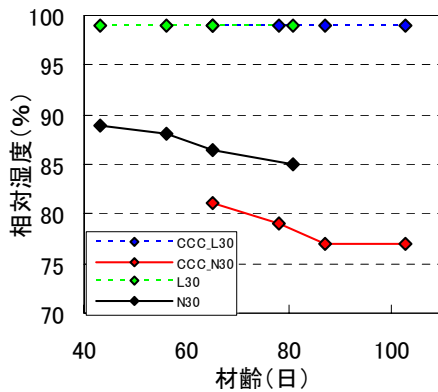


図-15 相対湿度の変化

膨張を示しているということから、人工軽量骨材による水分供給効果は液体としての移動ではなく骨材から蒸気として移動することによって供給されるものと思われる。

### 謝辞

本論文の第三著者は、セラミックセンサーの作製にあたり、日本大学生産工学部准教授 湯浅昇先生のご指導を

得ましたことを付記し、ここに深謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 今本啓一他：廃石膏ボード微粉末を刺激材とした高炉スラグー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
- 2) 田中章夫他：廃石膏ボード微粉末-高炉スラグー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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，2009.7
- 3) 湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇：埋め込みセラミックセンサーの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，構造系論文集，NO.498，pp.13，1997.8
- 4) 成川史春，藤木英一，石川雄康：人工軽量細骨材の自己収縮低減用材料としての適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1 分冊，pp.435-436，2006.9