

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と竹を用いた CFB の開発

野々山 聡^{*1}・伊藤 渉^{*1}・今本 啓一^{*2}

要旨：本研究は、廃石膏ボード微粉末、高炉スラグ、フライアッシュを結合材とした混合セメントコンクリート（CompositeCementConcrete：CCC）に関するものである。既往の研究では、普通骨材と人工軽量骨材が使用されているが、本論は、高炉スラグ骨材と再生骨材を使用し、骨材が CCC に与える影響の検討を行った。SEM 等で普通骨材と高炉スラグ骨材の界面における反応性状や骨材内部の状態について観察を行い、特に高炉スラグ骨材では界面の反応による構成素材の一体化が示唆された。また、竹による CCC への水分養生効果と力学的補強効果を期待し、CCC を充填した竹部材を提案し、その基礎的力学的性質に関する検討を行った。

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、高炉スラグ骨材、再生骨材、竹

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：CompositeCementConcrete））の利用を図り、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¹⁾。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²⁾、伊藤らによって、人工軽量骨材の内部養生効果について検討が成された³⁾。

本論は、伊藤らの研究³⁾で明らかとなった内部養生効果を維持し、自己収縮ひずみを抑えつつ、更なる環境配慮型構造材料を目指し、高炉スラグ骨材および再生骨材を使用した CCC の実験結果を示すものである。

シリーズ 1 では、供試体における、力学特性、収縮特性、温度特性について検証し、骨材の種類による比較を行った。シリーズ 2 では、普通細骨材と高炉スラグ細骨材を使用した際の骨材界面の反応の違いを、SEM および EPMA によって検証した。シリーズ 3 では、アルカリ性を有しない CCC を実構造物に使用するための検討として、竹に CCC を充填した部材（以下 CFB と略。（CFB：Concrete-Filled-Bamboo））を作製し、圧縮試験、曲げ試験について検討するものである。

2. 使用材料

実験に使用した材料を表-1 に、調査およびフレッシュ試験結果については表-2 に示す。高炉スラグ骨材を用いた CCC を CCC_S、再生骨材を用いた CCC を CCC_R、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 と表記する。また、高炉スラグ細骨材は 3 種類使用しており、産地毎に、京浜産を KH、神戸産を KB、呉産を KR と表記してある。結合材比は 40% のみとなっており、記号は省略してある。CCC は、PWB、GGBFS、FA を 20；40：40（%）で混合した粉体を結合材として使用している。この割合は、既往の研究結果¹⁾から、流動性および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、結合材の 1%をアルカリ刺激剤として使用した。

表-1 使用材料および諸物性

使用材料	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (m ² /g)	吸水率 (%)
廃石膏ボード微粉末	(PWB)	2.31	2.75	-
高炉スラグ	(GGBFS)	2.86	3.43 × 10 ⁻⁴	-
フライアッシュ	(FA)	2.25	4.83 × 10 ⁻⁴	-
軽焼ドロマイト	(BD)	2.99	8.84	-
高炉スラグ細骨材(京浜産)	(BFSFA)	2.73	-	0.97
高炉スラグ細骨材(神戸産)	(BFSFA)	2.79	-	0.65
高炉スラグ細骨材(呉産)	(BFSFA)	2.58	-	3.41
再生細骨材	(RCFA)	2.51	-	4.52
普通細骨材	(S)	2.58	-	2.31
高炉スラグ粗骨材	(BFSCA)	2.63	-	3.05
再生粗骨材	(RCCA)	2.48	-	3.97
普通骨材(碎石)	(G)	2.66	-	0.70
人工軽量骨材	(ALA)	1.63	-	26.0
混和剤		AE剤(303A) 高性能AE減水剤(SP8N)		

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻 修士課程（正会員）

*2 東京理科大学 工学部 建築学科 准教授 工博（正会員）

表-2 調査およびフレッシュ試験結果

記号	W/B (%)	質量(kg/m ³)										B×%			スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)							
		W	B			BFSFA	RCFA	S	BFSCA	RCCA	G	ALA	BD	AE剤				高性能AE減水剤						
			PWB	FA	GGBFS																			
CCC_S-KH	40	180	90	180	679	-	-	884	-	-	-	1.30	0.45	19.0	3.1	25.5								
CCC_S-KB					695								0.60				18.8	3.8	22.0					
CCC_S-KR					643								0.95				16.5	3.4	22.5					
CCC_R					-								372				185	-	918	7.00	0.44	17.0	3.6	20.0
CCC_N					-								-				582	-	-	0.60	0.40	23.0	2.7	23.0
CCC_L					-								-				578	-	-	7.90	0.30	18.0	3.8	22.0

3. シリーズ1

3.1 実験概要

シリーズ1では、φ100mm×高さ200mmの供試体を作製し、骨材の違いによる諸物性の検討をする。CCC_Nの結果は1)から、CCC_Lの結果は2)より、引用したものである。試験日は、CCC_Nは材齢3, 7, 14, 28日で、それ以外は材齢3, 7, 14, 28, 56, 91日となっている。供試体は試験日まで、恒温恒湿室(温度20°C, 相対湿度60%)にて、封かん養生したものを使用した。本論では、供試体の中心部に埋め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 化学特性

(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、JISA 1108に示される圧縮強度試験方法に準じて行った。既往の研究^{2), 3)}からCCCの強度発現は遅くなる傾向が見られるが、CCC_S-KRは材齢3日から、CCC_S-KBでは材齢7日から強度発現が確認でき、材齢28日以降の強度発現においても、CCC_S-KR, CCC_S-KBは高い傾向を示した。高炉スラグ細骨材による傾向が、産地毎に異なる結果となったが、表-3に示す表から、化学成分や粗粒率は同程度であるため、今後、他の要因を検討していきたい。高炉スラグ骨材を使用したCCCは全体的に強度発現が高い傾向を示した。

(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、JISA 1113に示される割裂引張強度試験方法に準じて行った。圧縮試験と同様に、CCC_S-KB, CCC_S-KRは若材齢での強度発現が見られた。材齢28日では、概ね同程度の値を示したが、その後の強度発現に違いが見られた。高炉スラグ骨材を使用したCCCには、破断面に反応生成物を確認することができ、高炉スラグ粗骨材の周囲には、他の骨材を使用したときには見られなかった反応生成物を確認することができた。

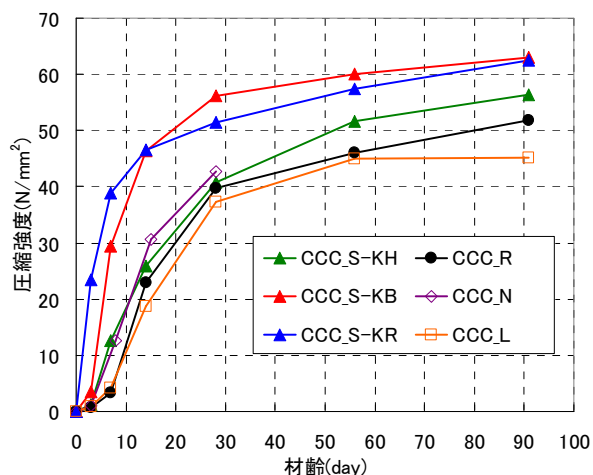


図-1 圧縮強度の変化

表-3 高炉スラグ細骨材の化学成分および粗粒率

記号	KH	KB	KR
CaO	43.2	41.0	43.6
S	0.72	1.10	0.82
SO ₃	0.01	0.10	0.03
FeO	0.44	0.30	0.27
粗粒率	2.61	2.58	2.37

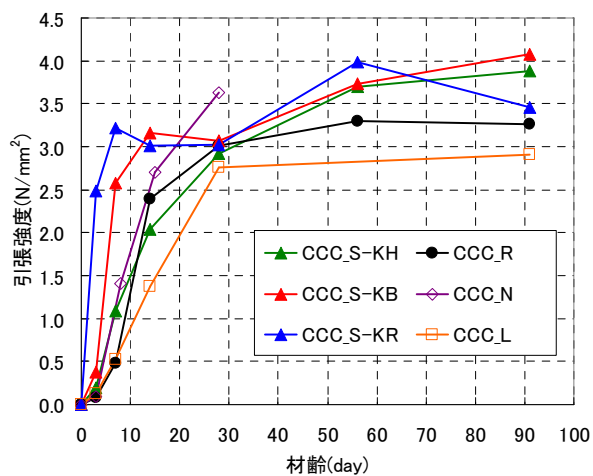


図-2 引張強度の変化

(3) 静弾性係数

静弾性係数の変化を図-3に示す。圧縮試験と同様に、CCC_S-KB, CCC_S-KR は若材齢で静弾性係数が高くなる傾向が見られた。材齢28日では、CCC_SとCCC_Rは、CCC_Nと同程度の値となり、材齢28日以降は、CCC_Lよりも大きな値を示した。実験値とNewRC規準式(式(1))に準じて算出した計算値の相関を図-4に示す。 γ は試験結果を、その他の係数に関しては、式(1)に準じた係数を使用した。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、骨材の種類に関係なく、式(1)を使用して、圧縮強度から予測することが可能だと考えられる。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_c(t)}{60}\right)^3 \quad (\text{kN/mm}^2) \quad (1)$$

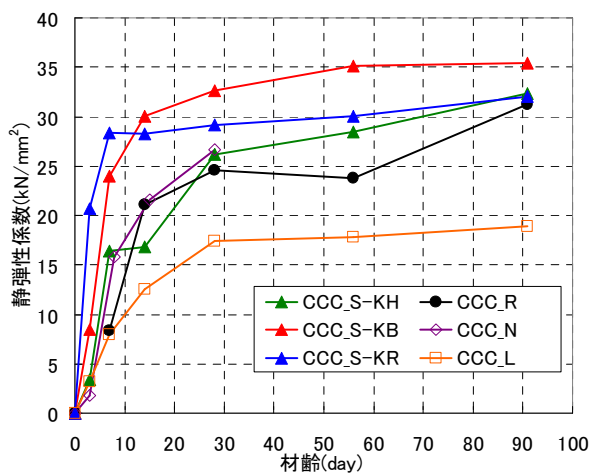


図-3 静弾性係数の変化

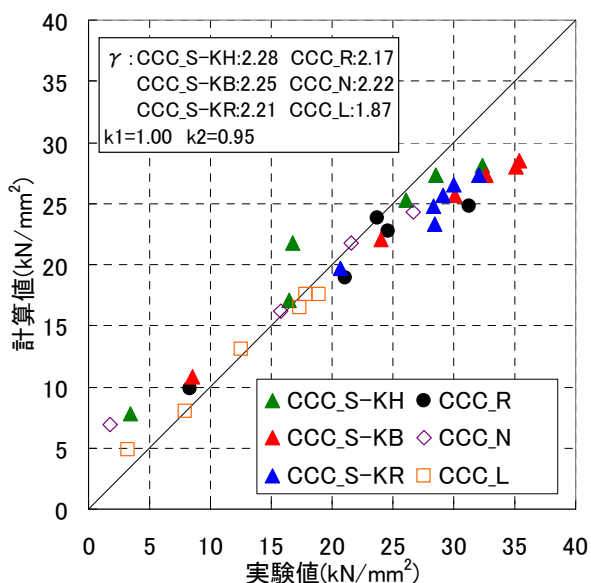


図-4 静弾性係数 実験値と計算値

3.3 収縮特性

(1) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの変化を図-5に、収縮を正として示す。CCCにおける自己収縮ひずみの問題点は、CCC_Nでは収縮が大きく²⁾、CCC_Lは著しく膨張してしまうことであった³⁾。CCC_SとCCC_Rの自己収縮ひずみは、CCC_NとCCC_Lの間に位置しており、最も膨張したCCC_S-KHでもCCC_Lの半分程度に抑えることができた。高炉スラグ骨材および再生骨材にも、人工軽量骨材ほどではないが、水分供給効果があることが確認することができた。

(2) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの変化を図-6に収縮を正として示す。CCC_RはCCC_Lと同程度の値をとり、CCC_Nより低減した。CCC_Sについても3材料ともに低減が確認でき、CCC_S-KRではCCC_Nの半分程度に低減を確認することができた。

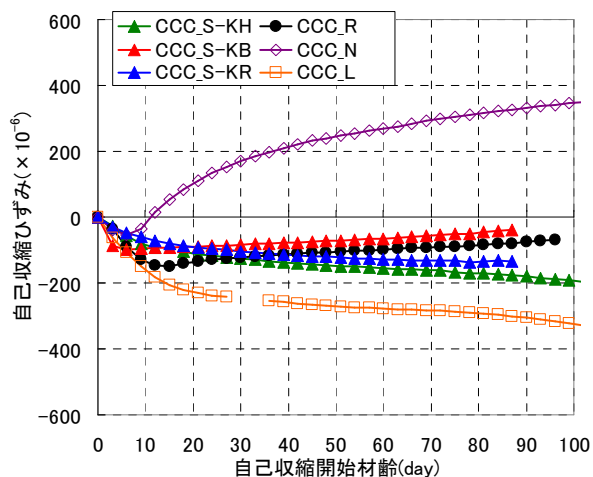


図-5 自己収縮ひずみの変化

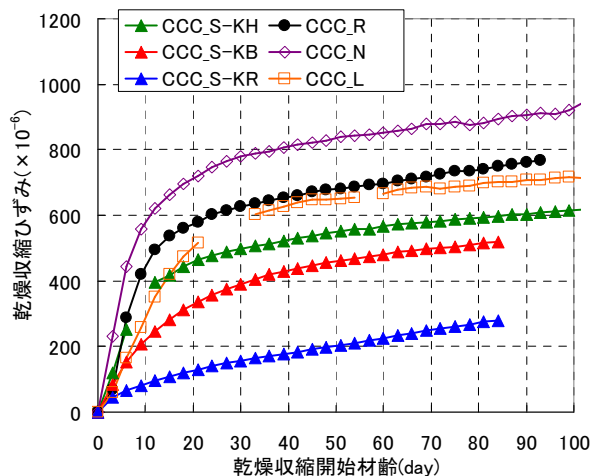


図-6 乾燥収縮ひずみの変化

3.4 温度特性

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-7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、普通コンクリートに比べて著しく低い値を示し²⁾、CCC_Lにおいても、概ね温度上昇量に変化は見られなかった³⁾。CCC_Sでは、CCC_NおよびCCC_Lと比較して、温度上昇が早い傾向が見られたが、温度上昇量は概ね同程度の値を示した。

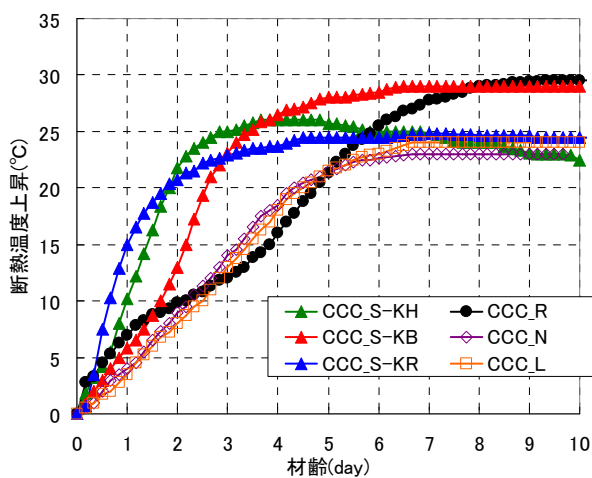


図-7 断熱温度上昇の変化

4. シリーズ2

4.1 実験概要

シリーズ2では、フィルムケース大の試験体を作製し、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察用試料は、試料の一部を砕いて採取し、破断面を観察できるように試料台に固定した。電子マイクロアナライザー (EPMA) 用材料として、厚さ5mmのディスク状の試料を切り出した後、真空乾燥後に、内径22mmのフェノール製リングに入れエポキシ樹脂により包埋した。樹脂の硬化後、その断面を得るために切断、乾式研磨を行った。調製が終わった試料は、その表面に導電性を持たせるために、SEM観察用には白金-パラジウムをスパッタリングし、EPMA用試料にはカーボン蒸着した。試験材料は、モルタルを使用し、細骨材を普通細骨材および高炉スラグ細骨材(呉産)の2種類とした。

4.2 SEM 試験結果

高炉スラグ細骨材の破断面を写真-1に、気泡内壁を写真-2に示す。普通骨材とペーストの境界面を写真-3に示す。高炉スラグ細骨材の破断面は、滑らかな状態であったが、ペーストに接している部分では、反応生成物

と考えられる物質を確認することができた。気泡に挟まれた壁の部分拡大した写真-2では、写真左側の気泡内壁面に接する断面には変化が見られなかったが、右側は通常のスラグとは異なる組織の部分が内壁面に見られ、反応生成物が生じた状態と考えられる。普通細骨材の表面は、比較的滑らかな形状をしていた。付着していたペーストが剥離した部分の様子から、ペーストと普通細骨材の間には、前述のような反応生成物は確認することはできなかった。

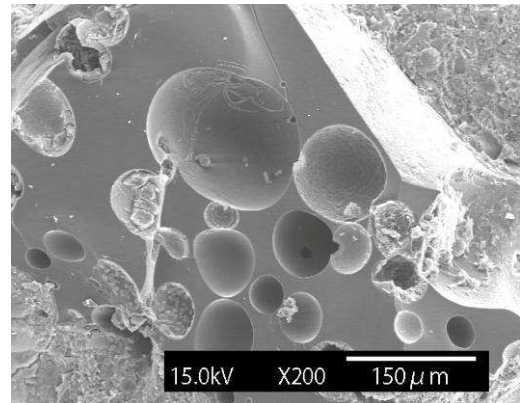


写真-1 高炉スラグ細骨材(破断面)

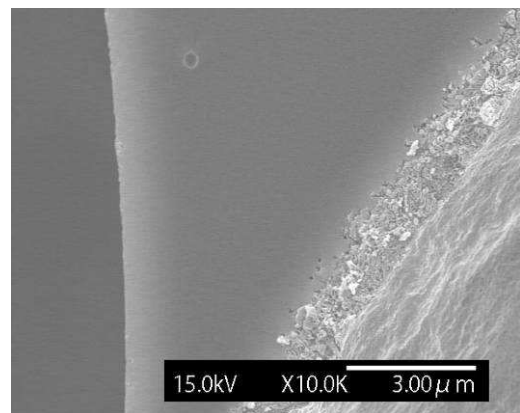


写真-2 高炉スラグ細骨材(気泡内壁)

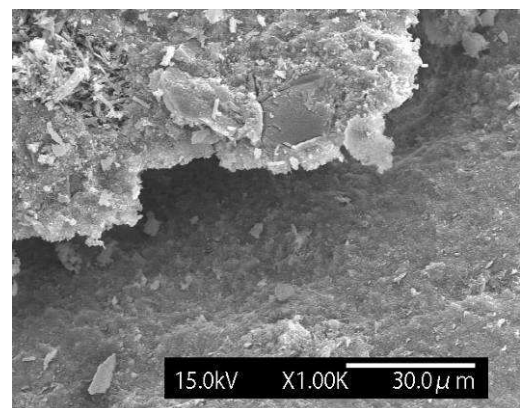


写真-3 普通細骨材(細骨材とペーストの境界面)

4.3 EPMA 試験結果

高炉スラグ細骨材の断面を写真-4に、普通細骨材の断面を写真-5に示す。高炉スラグ細骨材の表面には、厚さが数 μm の層状の反応性生物が確認できたが、普通細骨材の表面には、反応生成物が認められなかった。細骨材の内部には、高炉スラグ細骨材には気泡が確認できたが、普通細骨材には確認できなかった。この気泡により、普通細骨材よりも、高炉スラグ細骨材に高い内部養生効果が期待できると考えられる。

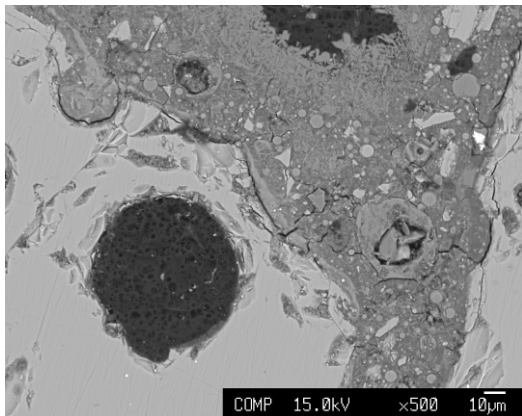


写真-4 高炉スラグ細骨材 (断面)

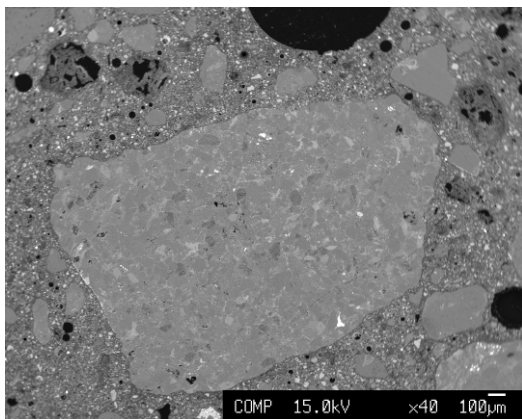


写真-5 普通細骨材 (断面)

5. シリーズ3

5.1 実験概要

シリーズ3では、竹にCCCを充填したCFB部材を作製し、圧縮試験と曲げ試験について検討する。混和材を多量に使用したコンクリートでは水分による養生の必要性が多く、研究で指摘されている。さらに、CCCは中性に近いので、補強筋としては従来の鉄筋に代わるものを選定する必要がある。このため、本研究では竹に補強筋としての効果以外にコンクリートを養生する効果を期待し、CCCを充填する構法を考えた。一方、竹は周面方向に対する割り裂き抵抗性に劣るため、養生下で膨張する

コンクリートは不向きである。本研究では、骨材の内部養生効果によって著しい自己収縮も自己膨張もないことが確認されているCCC_S-KBとCCC_Rを充填コンクリートとした。調合は、シリーズ1と同様とした。試験は、材齢28日まで恒温恒湿室にて封かん養生した試験体で行った。圧縮強度、曲げ試験ともに、計算を行う上で、直径100mm、竹の厚さ5mmとした。竹は一般に乾燥させて使用するが、竹からの水分供給効果も期待できるCFBではCCCの乾燥も抑制できると考え、本実験では竹は生の真竹を使用した。材齢7日における中性子遮蔽率の結果を図-8に示す。竹の外側部分において乾燥前後ではほぼ変化なく高い値を示しているのは、中性子が竹の水分に減衰したのではなく、竹のセルロースがこの結果を示したと考えられる。すなわち、竹は外部が水分の入り込む余地のないほどに緻密であり、内側は比較的多くの水分を含むことが分かる。このことから、CCCの水分は竹管内部に保持されかつ、竹水分がCCCに供給され、養生効果を相乗的に高めることが期待され、さらに、構造的にも極めて合理的であると考えられる。

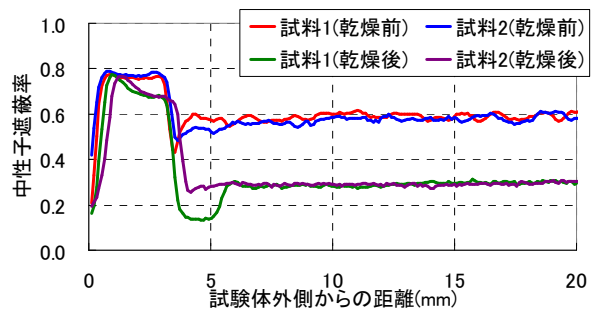


図-8 中性子遮蔽率

5.2 圧縮試験

圧縮試験では、高さが200mmになるように切断した竹内部にCCCを打設し、材齢28日に試験を行った。図-9に試験結果を示す。CCC_S-KBとCCC_Rともに、圧縮強度が下がった。この原因として、竹の節でCCCの断面が小さくなり、強度が低くなったと考えられる。今後検討を進めてゆきたい。

5.3 曲げ試験

曲げ試験載荷状況を写真-6に示す。試験体は長さを1400mm(支点間距離1000mm, 中央載荷)とし、中央部下側にひずみゲージを設置した。CCCを詰めた試験体を各1本、竹のみの試験体を2本で、曲げ試験を行った。試験結果を図-11に、曲げ強度と曲げヤング係数を表-5示す。曲げ強度の予測は式(2)にCCC_S-KBの圧縮強度を代入して求めた。CCC_Rを充填した試験体と竹のみの試験体は曲げ強度が同程度の値になったが、CCC_S

-KB では、曲げ強度が下がる結果となった。載荷終了時の破壊状況は、竹が繊維方向に割れ裂けたものとなっていた。なお、CCC 単体の曲げ強度と比較すると CFB の耐力は大幅に増加しており、このことから竹による補強効果は明瞭に認められる。ただし、竹の素材によるばらつきも大きく、今後のこのような自然素材の特性を考慮した設計法が重要になるものと思われる。

$$\sigma_0 = 0.51\sqrt{F_c} \quad (2)$$

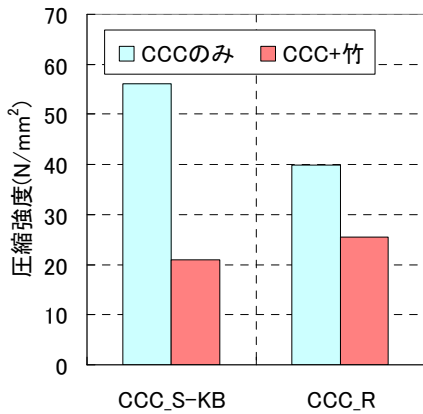


図-9 圧縮試験

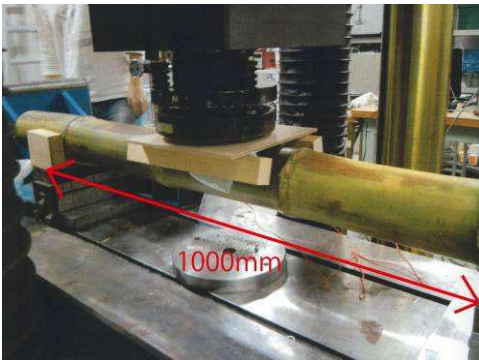


写真-6 曲げ試験載荷状況

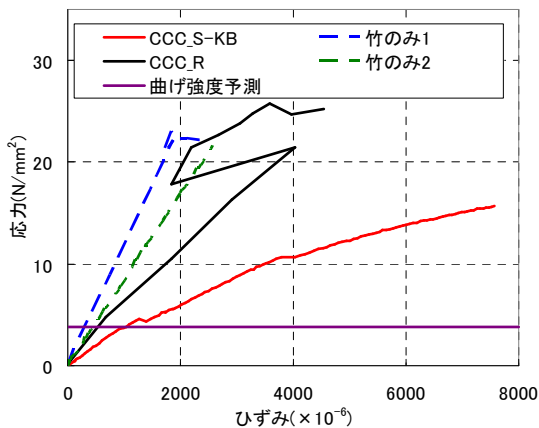


図-10 曲げ試験

表-4 曲げ強度と曲げヤング係数

	曲げ強度 (N/mm²)	曲げヤング係数 (kN/mm²)
CCC_S-KB	15.7	2.2
CCC_R	25.8	5.7
竹のみ1	23.0	11.3
竹のみ2	21.6	8.1

6. まとめ

本研究から以下のことが明らかとなった。

1. 高炉スラグ骨材および再生骨材を使用した CCC は、普通骨材を用いた場合と、強度発現に大きな差は見られなかった。引張強度についても、同様な傾向が見られ、人工軽量骨材を用いた場合よりも、高い値となった。
2. 高炉スラグ骨材および再生骨材を用いることで、自己収縮ひずみを、普通骨材を用いたときと人工軽量骨材を用いたときの間 (≒ -50×10^{-6}) に抑えることが可能である。
3. SEM および EPMA 試験結果から、高炉スラグ細骨材では骨材界面に反応生成物が生じており、組織としての融合が確認できた。一方、普通細骨材には、このような現象は確認できなかった。高炉スラグ細骨材の内部には、円状の気泡が存在し、これが内部養生効果を生み出していると考えられる。
4. 竹に CCC を充填した CFB (Concrete-Filled-Bamboo) 部材を提案した。圧縮試験と曲げ試験を行った結果から、竹による力学的な補強効果が確認された。竹の節は、断面的に弱点となりやすく、強度を下げる可能のあることも確認できた。

謝辞

中性子の試験にあたり、東京理科大学准教授兼松学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) 今本啓一ほか：廃石膏ボード微粉末を刺激剤とした高炉スラグレ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) 田中章夫ほか：廃石膏ボード微粉末-高炉スラグレ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性質と温度応力特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, 2009.7
- 3) 伊藤渉ほか：廃石膏ボード微粉末-高炉スラグレー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，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, 2010