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 竹を補強材として用いた CFB (Composite Cement Concrete-Filled-Bamboo) の開発

COMPOSITE CEMENT CONCRETE-FILLED-BAMBOO COMPRISING PULVERIZED WASTE
PLASTERBOARD, FLY ASH AND GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

今 本 啓 一*

Kei-ichi IMAMOTO

This paper deals with the development of composite cement concrete-filled-bamboo (CFB) comprising pulverized waste plasterboard (P-WPB: G), fly ash (F), ground granulated blast-furnace slag (GGBFS: S) and bamboo. The fundamental properties of the F-S-G paste with regard to fluidity, drying shrinkage and compressive strength were tested, and the influence of the replacement ratio of P-WPB was investigated. Using the optimum proportion of the F-S-G mixture, the properties of green concrete, such as compressive strength, Young's modulus, shrinkage strain and air permeability were tested. Furthermore, a counter measurement to decrease the autogenous shrinkage was conducted. Finally, author proposed concrete-filled-bamboo (CFB) and investigated the effect of reinforcement with bamboo throughout the bending and compressive strength of CFB.

Keywords: waste plaster board, fly ash, blast furnace slag, activators, bamboo

廃石膏ボード, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 刺激材, 竹

1. はじめに

1ton の製造のために約 800kg の二酸化炭素を排出するセメントに代わる硬化体の研究はこれまでに進められた経緯がある。例えば、高炉スラグ微粉末に排煙脱硫酸石膏とアルカリ刺激剤を添加して硬化体とする研究はその一つに位置付けられ、JIS (日本工業規格)においてスラグ石こう板が存在する¹⁾。特に高炉スラグについては各種のアルカリ刺激剤によって高強度の硬化体が得られることから、国内では1950年代頃から、近藤らによってポルトランドセメント代替材料としての適用研究が進められ²⁾、1980年前後には魚本・小林らによってコンクリートへの適用性が検討された³⁾。また、近年では阪田らによって製鋼スラグを用いた検討も進められている⁴⁾。この高炉スラグを主たる結合材として用いたコンクリートの強度特性は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに匹敵するものであることが報告されているが、収縮ひずみが大きく⁵⁾、また初期に十分な湿潤養生を行わない場合に表層部分が粉化して強度が低下するなど³⁾、構造材料として用いるにあたっての問題点も指摘されている³⁾。

一方、住宅などの解体に伴い排出される石こうボードの量が増加する傾向にあり、2009年度の国内の排出量は104万トンであり、2030年度には240万トンに達するとの推計もされている⁶⁾。石膏ボード廃材を半水石膏化し石膏ボードに再利用することも試みられている⁷⁾。他方、廃石膏を高炉スラグの刺激剤として適用し、繊維補強ボードの開発を試みたものとして重倉らの研究が挙げられる⁸⁾。この種のコ

ンクリートはpHが普通ポルトランドセメントと比較して必ずしも高くなく、本材料を構造材料として用いる場合、鉄筋に代わる補強材についても検討が必要となる。本研究は、廃石膏ボードを微粉末化し、他のアルカリ刺激剤とともにフライアッシュおよび高炉スラグを刺激・硬化させ、これを結合材としたコンクリート (Composite Cement Concrete: CCC) の基礎的特性⁹⁾について述べるとともに、これを構造部材として用いることを意図して、補強材として竹を用いたコンクリート充填構造 (CFB: Composite Cement Concrete-Filled-Bamboo) の適用性を検討したものである。本論は特に以下についての検討を行い、その概要を述べるものである。

- 廃石膏ボード微粉末－高炉スラグ－フライアッシュペースト (F-S-G)の基礎的特性検討
- 刺激材の効果に関する検討
- コンクリート(CCC)の諸特性
- コンクリートの強度に及ぼす養生の影響
- CFB(Composite Cement Concrete-Filled-Bamboo)の力学特性

2. 結合材の検討

2.1 使用材料

(1) 廃石膏ボード微粉末

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

本論文の一部は参考文献9)および10)において発表されたものである。

* 東京理科大学工学部第二部建築学科
准教授・博士(工学)(正会員)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

通過したものである。図 1 左下に示すように、ボード表面のコート紙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同図に示す。図右下に示されるように、廃石膏の粒度は一般に流通している廃煙脱硫石膏(以下、標準石膏)と比較して粗いことが示されている。

図 1 光学顕微鏡による石膏の状態と粒度分布

(2) 実験に用いた使用材料の特性

本実験で使用した材料とその物性を表 1 に、蛍光 X 線分析の FP 法による定量分析結果(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)を表 2 に示す。

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 ³ , 比表面積 3430cm ² /g
高炉スラグ(S)	密度 2.86g/cm ³ , 比表面積 4830cm ² /g
標準石膏(G)	密度 2.34g/cm ³ , 比表面積 0.104m ² /g*, pH8.76**
廃石膏(RG)	密度 2.19g/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	普通ポルトランドセメント:密度 3.16g/cm ³

*N₂ 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 ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO
F	0.78	20.44	59.58	0.88	0.63	2.18	4.05	0.06	8.88	0.19
S	3.75	10.43	26.98	—	1.85	0.62	53.34	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 F-S-G 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)・二水石膏(G)混合硬化体全般の特性が俯瞰できるように広く分布した混合比を選択し、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。水結合材比は 0.4 とした。なお、二水石膏、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 ペースト実験の組合せ(表中単位: %)

No	F	S	G	廃石膏置換率			
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)

2.3 F-S-G 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。

図 3 フロー値の分布(図中単位:mm。図中の数値は廃石膏置換率 0% 時のフロー値を示す)

標準石膏のみ(廃石膏置換率 0%)の混合比では全てにおいてフロー 200mm を満足しており、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、その領域が狭められていく傾向が認められた。これは廃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(図 1 参照)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。

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。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験は各試験体につき3体用い、JIS R 5201 に準じて行った。材齢28日時点における標準水中養生（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）圧縮強度を図4に示す。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目安としている 35N/mm^2 を確保できる領域が若干狭められる傾向にある。なお、図において二水石膏の混入率50%を境（図中点線 No.9,13 および No.10,14）に圧縮強度が著しく小さくなる傾向が認められる。各試料の累積細孔量と材齢28日圧縮強度の関係を図5に示す。累積細孔量は、 20°C 、60%R.H.環境下の材齢91日の試料をアセトン処理した後にポロシメータ（水銀圧入試験機）により測定した。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6に示す。図より、特に二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 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に示したように、No.9 および 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、No.9 および No.13 については、この石膏の余剰分による粗な空隙の存在により強度が相対的に低くなったものと推測される。

図4 圧縮強度の分布(図中単位: N/mm^2)

図5 累積細孔量と圧縮強度の関係

図6 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。乾燥条件は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ R.H.とし、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 試験体3体の材齢91日時点における平均値を基に評価を行った。結果を図7に示す。全般的に高炉スラグ混入率が多い領域で収縮ひずみが大きい傾向にあるが、これはCollonsらの指摘⁹⁾と類似している。一方、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り、収縮ひずみ低減の観点からは、前述の流動性の確保と並んで一定量のフライアッシュの混入が有効であると考えられる。

図7 乾燥収縮の分布 (-1000×10^{-6} 以下)

以上の結果から、流動性、強度特性も概ね満足する CCC (Composite Cement Concrete) のフライアッシュ：スラグ：廃石膏の各結合材の組み合わせとして、下図のハッチ部が適切であると考えられる。

図8 各種特性の分布

3. 刺激材の効果に関する検討

予備的実験として、硬化体の反応を促進させるためのアルカリ添加量（刺激材）の効果を検討した。刺激材の物性および粉体に対する質量添加率を表4に示す。

表4 刺激材物性と添加率

使用材料	比表面積(m^2/g)*	pH**	添加率(%)
石灰	11.385	12.83	1, 5, 10
ドロマイト	8.84	12.63	
大谷石	16.063	9.43	
ゼオライト Na	---	11.1	1, 3
ゼオライト K	---	11.82	
ゼオライト Ca	---	9.95	

* N_2 吸着による B.E.T 試験値

**濃度 10%溶液における値

強度特性に及ぼす刺激材の影響をより明確に見るために、図8に示したハッチ部の組み合わせでより高い強度が得られると思われる F : S : G = 20 : 60 : 20 について検討を行った。水結合材比を 0.4 とし、刺激材として栃木県で比較的多く産出される、石灰、ドロマイト、大谷石、ゼオライト(Na, K, Ca)を適用した。なお、計量における精度を確保するため、結合材に対して外割 1% (質量) を下限とし、刺激材としての普通ポルトランドセメント (セメント) との比較の下に、各刺激材を用いた硬化体の材齢 7 日強度を、JIS R 5201 に準じて評価した。試験結果を図9に示す。図より、刺激材としてドロマイトを質量比で外割 1% 用いた場合の材齢 7 日強度が最も高い値を示

した。石灰を外割 1% (質量) 用いた場合でも同一材齢で $20\text{N}/\text{mm}^2$ の強度が得られているが、いずれも、添加率を増すことにより大幅に強度が低下している。このことより、刺激材は 1% が実質的な添加率と判断した。

図9 刺激材の添加率と圧縮強度

4. コンクリート (CCC) の諸特性

F-S-G を結合材としたコンクリートの特性を検討した。ここでは収縮をなるべく抑制することを意図して、F : S : G = 40 : 40 : 20 とした。

4.1 使用材料と調合

実験に使用した材料を表5に、調合およびフレッシュ試験結果を表6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, 人工軽量骨材および普通骨材を用いた場合は記号末尾をそれぞれ_Lおよび_Nと付記する。また、高炉スラグ細骨材は産地毎に, KH, KB および KR と表記してある。前述の検討を受け、アルカリ刺激材として軽焼ドロマイトを結合材の外割 1% (質量) 使用した。

表5 使用材料

使用材料(調合表の記号)	密度(g/m^3)	吸水率(%)
廃石膏ボード微粉末(G)	2.31	-
高炉スラグ微粉末(S)	2.86	-
フライアッシュ(F)	2.25	-
軽焼ドロマイト(BD)	2.99	-
高炉スラグ細骨材KH(BFSFA)	2.73 (表乾)	0.97
高炉スラグ細骨材KB(BFSFA)	2.79 (表乾)	0.65
高炉スラグ細骨材KR(BFSFA)	2.58 (表乾)	3.41
再生細骨材(RCFA)	2.51 (表乾)	4.52
普通細骨材(S)	2.58 (表乾)	2.31
高炉スラグ粗骨材(BFSFA)	2.63 (表乾)	3.05
再生粗骨材(RCCA)	2.48 (表乾)	3.97
普通粗骨材(G)	2.66 (表乾)	0.70
人工軽量粗骨材(ALA)	1.63 (表乾)	26.0
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	

4.2 実験概要

ここでは骨材種類の違いによる CCC の諸物性への影響を、(1)圧縮強度、(2)乾燥収縮、(3)自己収縮および(4) 骨材界面の画像の観点から検討する。強度・収縮用供試体は全て $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ とし、3体の平均値で評価した。圧縮強度は恒温恒湿室(温度 20°C , 相対湿度 60%)にて封かん養生した後に測定した。収縮ひずみは供試体の中心部に設置した埋め込み型ひずみゲージにより測定し、乾燥収縮は材齢 1 週まで水中養生させた後に恒温恒湿室にて、自己収縮は脱型後表面をアルミテープで覆い、空気中への水分逸散を断った状態で、恒温恒湿室にて計測した。

表6 調合およびフレッシュ試験結果

	W/B (%)	質量 (kg/m ³)										B×%			スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)			
		W	B			BFSFA	RCFA	S	BFSCA	RCCA	G	ALA	BD	AE剤				高性能AE 減水剤		
			G	F	S															
CCC_S-KH	40	180	90	180	180	679	884	-	884	-	-	-	1.0	1.30	0.45	19.0	3.1	25.5		
CCC_S-KB						695								1.30	0.60	18.8	3.8	22.0		
CCC_S-KR						643								2.80	0.95	16.5	3.4	22.5		
CCC_R						-	-	372	185	-	918			972	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

表7 高炉スラグ細骨材の化学成分

記号	KH	KB	KR
CaO	43.2	41	43.6
S	0.72	1.1	0.82
SO ₃	0.01	0.1	0.03
FeO	0.44	0.3	0.27
粗粒率	2.61	2.58	2.37

4.3 実験結果

(1) 圧縮強度

圧縮強度の変化を図10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て行った。既往の研究^{9)・10)}からCCCの初期の強度発現は鈍い傾向にあるが、高炉スラグ骨材を用いたCCC_S-KR、KBおよびKHでは材齢3日から良好な強度発現が確認でき、材齢28日時点の強度発現においても、普通骨材を用いた場合と比較して同等もしくは若干高い値を示した。なお高炉スラグ細骨材の産地毎に若干異なる強度の差を示したが、表7から化学成分や粗粒率は同程度であるため、今後、この原因を検討してゆきたい。総括的には、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。

図10 圧縮強度の変化

(2) 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみの変化を図11に収縮を正として示す。普通骨材を用いたCCC_Nは乾燥収縮ひずみが最も大きく、高炉スラグ細骨材を用いたCCC_S-KR、-KBは相対的に収縮が小さいものであった。定容法 (Hydrosorb 試験機 (Quantachrome 製)) により取得した骨材の等温吸着曲線を図12に示す。図に示すように乾燥収縮の小さい高炉スラグでは全般に吸着量が少なく、特に低圧域 (相対圧0.3付近) の吸着量が小さく、収縮が大きい普通骨材はこの領域の吸着が全般に大きい。このことは骨材の比表面積が高炉スラグ骨材において相対的に小さいことを意味しており、この種の骨材を用いた場合に乾燥収縮が小さい傾向は、既往の研究¹¹⁾の指摘と概ね合致する。

図11 乾燥収縮の変化

図12 骨材の等温吸着曲線

(3) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの変化を、収縮を正として図13に示す。高炉スラグ微粉末を多量に使用するCCCの系において収縮が大きくなることは既往の研究でも指摘されている通りであり、一方、人工軽量骨材を用いたCCC_Lでは著しく膨張している¹⁰⁾。この挙動は人工軽量骨材からの過大な水分補給によるアルミネート相の反応によるものとも推測されるが、詳細な検討が今後必要である。一方、高炉スラグおよび再生骨材を用いたCCC_Sおよび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、ほぼ0である。高炉スラグ骨材において、自己収縮低減のための適切な水分供給効果のあることが確認できる。

図 13 自己収縮ひずみの変化

(4) 骨材界面の SEM 画像

主として高炉スラグ細骨材を用いた場合の初期の高い強度発現の原因を検討する目的で、コンクリートと水：結合材：細骨材の割合が同じモルタルを作製し、材齢 7～14 日でこの試料の一部を破碎し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて骨材界面の観察を行った¹²⁾。SEM 観察用試料表面には白金－パラジウムをスパッタリングした。観察対象は普通細骨材および高炉スラグ細骨材 (KR) の 2 種類とした。

写真 1 高炉スラグ細骨材 (破断面) 写真 2 高炉スラグ細骨材界面

写真 3 普通骨材界面

高炉スラグ細骨材の破断面を写真 1 に、骨材界面を写真 2 に示す。高炉スラグ細骨材は真円上の空隙を有していることが観察される。骨材界面を拡大した写真 2 では、写真右側の結合材と接する面において反応生成物の析出が観察された。なお、高炉スラグ細骨材の気泡内壁および普通細骨材の表面 (写真 3) にはこのような状況は観察されなかったことから、本結合材において高炉スラグ骨材を用いることにより、界面部において反応が生じたことが強度発現に寄与したことも推測される。この点についても今後さらに検討を進めて行きたい。

5. CCC の強度に及ぼす養生の影響

混和材を多量に使用したコンクリートの特性に及ぼす養生の影響の大きいことは一般に指摘されている。結合材の組み合わせとして、比較的初期の硬化速度の遅いフライアッシュの量を若干多くしかつ一定量のスラグを確保することによって、ある程度の強度域で養生の影響をより顕著に見ることを意図して、F : S : G=30 : 60 : 10 とした CCC の、特に圧縮強度に及ぼす養生条件 (気中および水中養生) の影響を検討した。

5.1 使用材料と調合

使用材料は表 1 に加え、下表の細・粗骨材他を用いた。また、刺激材には軽焼ドロマイトを外割 1% (質量) 使用した。

表 8 細・粗骨材他物性

使用材料	物性
細骨材	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.3%, 粗粒率 3.2%
粗骨材	表乾密度 2.67g/cm ³ , 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

表 9 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)				
		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 10 CCC の調合

記号	W/P (%)	単位量(kg/m ³)						
		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

5.2 実験結果

材齢 14, 28 日における圧縮強度と静弾性係数の測定結果を図 14 に示す。圧縮試験までの養生温度は 20±2℃とした。CCC においても圧縮強度を水結合材比で制御することが可能であり、CCC30 は材齢 14 日において N50 と同等の圧縮強度を有し材齢 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 1/2～1/3 程度に留まっていることから CCC にとって養生方法は極めて重要であると考えられる。

図 14 各水結合材比における養生条件と圧縮強度

6. CFB (Composite Cement Concrete-Filled-Bamboo) の力学特性

6.1 概要

竹についてはこれまで鉄筋の代替としての検討¹²⁾や短繊維補強材

料としての適用検討事例がある¹³⁾。一方、前述したように、CCC は初期の養生が十分でないと強度発現が著しく低くなることが示されている。また、ポルトランドセメントの代替を指向する CCC の補強筋としてはなるべく低炭素型のものが望ましいと考える。このため、本研究では補強筋としての効果以外にコンクリートからの急激な水分蒸発を抑制する効果も期待し、隈研吾の作品に着想¹⁴⁾を得て、CCC を竹に充填する構法 (CFB: Composite Cement Concrete-Filled-Bamboo) を考えた。竹は写真 4 に示すように外皮ほど繊維組織が密に存在し、強度特性に優れている。1cm 厚にスライスした CFB 断面の中性子遮蔽率の結果を図 15 に示す。中性子は水素による減衰が高いため、この中性子を照射した際の遮へい率を測定することにより素材中の水分(水素)の分布を連続的に測定することができる。図によると、乾燥により中性子遮へい率が般に低下しているが、竹の最外側部分においては乾燥前後の変化が極めて小さい。これは、最外側部分においては、中性子は竹の水分ではなく竹を構成するセルロースによって減衰しているためと考えられ、内部と比較して竹の最外部は水分の入り込む余地のないほどに緻密であることが分かる。このことから、CFT 構造のように CCC を竹に充填する形式とすることにより、①CCC 中の水分が竹管内部に保持されかつ、②生竹を使用することにより、予め乾燥させた竹を用いるよりは CCC の水分が竹に吸い取られることが相対的に抑制され、さらに、③最外皮が緻密であることから構造的にも極めて合理的に作用する部材とすることができる、と考えた。

写真 4 竹の断面組織¹⁵⁾

一方、竹は周面方向の割り裂き抵抗性に劣るため、竹内部が封緘状態であると仮定すると、この状態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生じないことが確認されている CCC_S-KB と CCC_R を充填用コンクリート(調合は、4.と同様)とした。この際、竹内部の隔壁は棒によりくまなく突き破り除去した。試験は材齢 28 日まで恒温恒湿室にて存置した後に行った。圧縮強度、曲げ試験に用いた竹は内側直径平均 100mm、肉厚平均約 5mm の真竹を用いた。竹は一般に乾燥させて使用するが、本研究では上記の観点から水分供給効果も期待することとして生竹を使用した(写真 5)。

図 15 中性子遮蔽率

写真 5 CFB の外観

6.2 圧縮試験

圧縮試験では、節が高さ中央付近に一か所として高さが 200mm になるように切断した竹内部に CCC を充填し、材齢 28 日に試験を行った。図 16 に試験結果を示す。いずれも圧縮強度が低下している。この原因として、竹の節部分で CCC の断面が局所的に小さくなり、欠損となったと考えられる(写真 6)。

写真 6 試験体概要

図 16 圧縮試験結果

6.3 曲げ試験

曲げ試験荷重状況を写真 7 に示す。試験体長さは 1400mm (支点間距離 1000mm、中央荷重)とし、スパン内の竹の節数は 2 とし、荷重位置の左右にほぼ均等な位置となるよう設置しそれ以外の節は支点位置もしくはこれよりも外側とした。なお変位は中央部にて計測した。また、CCC を充填した CFB 竹を各コンクリートについて 1 本、コンクリートを充填していない竹のみの試験体 2 本を比較用とした。

写真 7 G-CFB 曲げ荷重試験状況

曲げ部材の荷重-変位曲線を図 17 に示す。竹による補強を行っていない CCC 単体の最大曲げ荷重は、下式に図 16 の CCC の圧縮強度を代入して便宜的に求めた。図に示されるように、計算上の CCC の曲げ強度は非常に小さい。CFB の載荷終了時の破壊状況は、竹が繊維方向に割れたものとなっていた。CFB は CCC 単体よりも大幅に、そして竹単体よりも曲げ耐力が上昇している。竹による補強効果は明確である。一方、CFB の曲げ耐力は充填しているコンクリートにより若干異なっているが、図 16 の結果が反映されている訳ではない。これは竹素材のバラつき（図 17：竹のみ 1,2 参照）も影響しているものと推察されるが、今後のこのような自然素材の特性を考慮した評価方法が重要になるものと思われる。

$$\sigma_0 = 0.51\sqrt{F_c} \quad (1)$$

図 17 曲げ応力とひずみ

7. まとめ

普通ポルトランドセメントを使用しない、廃石膏ボード微粉末を刺激材とし、アルカリ刺激材とともにフライアッシュおよび高炉スラグを結合材としたコンクリート（Composite Cement Concrete: CCC）の適用性を検討するとともに、この種のコンクリートを用いた鉄筋コンクリートに代わる新しい構造材料の可能性について基礎的実験を行った。本研究における知見と課題を以下に述べる。

- (1) CCC 結合材のペースト実験より、高炉スラグ微粉末をより多く用いるほど、より高い高強度が達成できることを示した。一方、この場合の収縮は大きくなることも明らかとなった。これらの事前検討を踏まえ、廃石膏ボード微粉末-高炉スラグ-フライアッシュの最適混合比を本研究において特定した。
- (2) 高炉スラグ骨材を使用した CCC は相対的に強度発現が高い傾向がみられた。
- (3) SEM 画像観察結果から、高炉スラグ細骨材表面では反応生成物が確認でき、一方、普通細骨材にはこれを確認することができなかった。このことから、上記の強度発現はこの骨材界面の反応が寄与していることが示唆された。
- (4) 高炉スラグ骨材および再生骨材を用いることで、自己収縮ひずみをほぼ 0 とすることができた。
- (5) 竹に自己収縮がほぼ 0 に近い高炉スラグ骨材および再生骨材を用いた CCC を充填した CFB（Concrete-Filled-Bamboo）を提案した。本部材に対して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。一方圧縮試験においては、竹の節は断面的に弱点となりやすく、強度を低減する可能性のあることも確認できた。竹による内部養生効果の定量化と併せて今後検討が必要である。また、竹素材間のバラつきも考慮した評価方法の確立が重要であることを示した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、元東京理科大学大学院工学研究科修士伊藤渉君、野々山聡君、元足利工業大学工学部成田瞬氏、石井寿美江女史のご助力を、足利工業大学客員研究員磯文夫博士、(財)県南技術支援センター吉葉光夫氏、加藤榮女史には化学分析において貴重なご助言を賜った。また、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た。さらに廃石膏ボード微粉末は(株)安住より、また高炉スラグ骨材は鉄鋼スラグ協会より提供を受けた。

本研究において測定した細骨材の等温吸着曲線は火災時の爆裂挙動の基礎情報ともなるものであるが、この情報は東京理科大学グローバル COE プログラム「先導的火災安全工学の東アジア教育研究拠点」において整備された等温吸着試験機により取得された。また、本研究は文部科学省科学研究補助金（基盤研究 C：課題番号 22560572）の助成を受けて実施したものであり、付して深謝の意を表する。

参考文献

- 1) JIS A 5430:2004, 繊維強化セメント板
- 2) 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.
- 3) 小林一輔, 魚本健人：高炉水砕スラグ・排煙脱硫せ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
- 4) 藤井隆史, 田中秀和, 綾野克紀, 阪田憲次：鉄鋼スラグ水和固化体の pH が強度および耐久性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1653~1658, 2004. 7
- 5) F.Collins and J.G.Sanjayah, Cracking tendency of alkali-activated slag concrete subjected to restrained shrinkage, Cement and Concrete Research, 30(2000), pp.791-898, 2000.
- 6) (社)石膏ボード工業会：廃石膏ボードの対応策について、2010.5
- 7) 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., pp.415-422, 1997.
- 8) 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, pp.11-20, 1996.2
- 9) 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
- 10) 伊藤渉, 野々山聡, 今本啓一：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、コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1415-1420, 2010
- 11) 今本啓一, 石井寿美江, 荒井正直：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響、日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.9-14, 2006.8
- 12) 巽純一：竹筋コンクリート梁の彎曲試験, 建築學會論文集, No.13, pp.184-193, 1939
- 13) 大谷俊裕, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 大内成司：木炭と竹繊維の機能特性を活用した建築ボードの開発に関する基礎的研究, Cement Science and Concrete Technology, No.55, pp.323-330, 2001
- 14) 長井宏憲：素材の系譜（監修：隈研吾）グラフィック社, 2009.12
- 15) 野口貴文, 今本啓一他：ベージック建築材料, p.155, 彰国社, 2010

(2012年11月5日原稿受理, 2013年1月17日採用決定)