

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560572

研究課題名（和文） 産業副産物を結合材としたグリーンコンクリートにおける自己養生機能の付与と評価

研究課題名（英文） Self-curing of Green concrete using by-product

研究代表者 今本啓一（IMAMOTO KEIICHI）

東京理科大学工学部第二部建築学科准教授

研究者番号：60337300

研究成果の概要（和文）：

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包括的な実験を行った。CCC 結合材のペースト実験より、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。また、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。さらに、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。

研究成果の概要（英文）：

This study 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 of concrete using blast furnace slag aggregate 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.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
23 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
24 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：構造材料, 環境負荷低減材料

1. 研究開始当初の背景

高炉スラグ微粉末に排煙脱硫石こうとアルカリ刺激剤を添加して硬化体とする研究はこれまでも行われており、JIS（日本工業規格）のスラグ石こうボードが存在する¹⁾。また、フライアッシュ、高炉スラグの産業副産物は古くよりセメントの混和材としての適用がなされてきている。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、1950年代頃から、国内では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³⁾らによってコンクリートとしての適用性が検討された。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、また初期に十分な湿潤養生を行わない表層部分が粉化して強度が低下するなど、構造材料として用いるにあたっての問題点も多く指摘されている。

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る。2003年度では国内で98万トン排出され、2013年度には176万トンに達するものと推計されている⁴⁾。この廃石こうボードの再利用方法として、再脱水による半水石こう化としての再利用や地盤改良材への適用があるが、前者は歩留まりが少なく、また後者は本来の排出元とは全く異なる分野での処理という点で検討の余地を残す。最終処分場の確保が難しい状況の中、石こうボード廃材の有効利用は喫緊の課題である。廃石こう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1996年の重倉・高橋らの研究が挙げられる⁵⁾。しかし、その研究実績は非常に少ないのが現状である。

[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
- 4) (社)石膏ボード工業会資料, 2002.
- 5) 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

2. 研究の目的

本研究に用いるコンクリートは、廃石こうボードを微粉末化し、アルカリ刺激剤とともに高炉スラグおよびフライアッシュを硬化させ、これを結合材としている。申請者らは従来から、これらの粉体の組み合わせおよびこれを用いたコンクリートについて実験的な検討を行ってきた。これまでの検討におけるこの硬化体の長所と短所を挙げると以下の通りとなる。

・組み合わせた粉体のフレッシュ特性

廃石こう微粉末が多いほど、フレッシュ時のフローが小さく（流動性が低下する）傾向になるが、フライアッシュのボールベアリング効果により、この混入量が多くなるほど流動性に優れたペーストが得られる。

・硬化ペーストの特性

高炉スラグ混入率が多いほど圧縮強度は大きくなるが収縮量が大きくなる。フライアッシュの混入により強度は若干低下するが、収縮量を低減することができる。

・組み合わせた粉体を用いたコンクリートの特性

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圧縮強度が得られる（水粉体比30%材齢28日で約50N/mm²）。しかし自己収縮ひずみが大きく、また中性に近いため、部材としてのひび割れの危険性や耐久性に検討を要する。

このことから、産業副産物である高炉スラグ微粉末とフライアッシュを主たる結合材料とした、本研究で提案するグリーンコンクリート（F-S-Gコンクリート）を実用化する上で、研究期間内で検討・解決すべき事項を列挙すると以下の通りとなる。

・自己養生機能の付与方法の効果の確認

高炉スラグやフライアッシュを混和材として用いる場合に水分の適切な供給（養生）が重要であることは古くから指摘されている。この高炉スラグやフライアッシュそのものを主たる結合材として利用する場合、硬化体への水分の供給の重要性はさらに増すものと考えられる。この課題を解決するために、高強度コンクリートの分野において、主として海外で精力的に研究された多孔質骨材や吸水性ポリマーなどによる内部養生効果の適用性を、本F-S-Gコンクリートにおいて検討し、自己養生機能の付与方法を提案する。

・F-S-Gコンクリートにおける自己養生効果を達成するための材料設計手法の開発

フライアッシュ、高炉スラグの混和材単体の硬化体における力学的性質とそれぞれの

混和材の反応率との関係を踏まえた上で、F-S-G コンクリートの水和反応過程において消費される水分量と骨材から供給される水分量がバランスするための適切な材料物性や調合条件を、硬化体の力学特性や耐久性の観点に立って提案する。

・ F-S-G コンクリートに適用する補強筋が具備すべき特性と構造部材としての挙動

本研究で検討する F-S-G コンクリートは、セメントのような強アルカリを保持しない。したがって、構造部材として従来一般に用いられている鉄筋はその使用の前提条件が崩れることになり、新たな補強筋を模索する必要がある。本研究ではまず、補強筋としてだけでなく、水分供給効果を有する「竹」の可能性について検討する。自己養生効果を評価した上で、構造部材としての挙動を解析し、その結果に応じて段階的に他の補強筋もしくは補強方法の適用も視野に入れて検討を深める。

3. 研究の方法

本研究の焦点を以下に絞る。

・ F-S-G コンクリートへの自己養生機能の付与方法

多孔質骨材や吸水性ポリマーによる自己養生の付与方法について、コンクリートの力学特性や耐久性の観点から評価を行う。

・ F-S-G コンクリートにおける自己養生効果を達成するための材料設計手法の開発
結合材料の硬化体力学的特性への寄与度の把握し、自己養生機能を付与するための、適切な材料選定手法と調合設計法を提案する。

・ 構造部材としての挙動

鉄筋以外の素材による力学的な補強効果を構造部材レベルで把握・解析する。

具体的には、

・ 自己養生機能の付与方法の検討

高炉スラグやフライアッシュを混和材として用いる場合に水分の適切な供給（養生）が重要であることは古くから指摘されている。この高炉スラグやフライアッシュそのものを主たる結合材として利用する場合、硬化体への水分の供給の重要性はさらに増すものと考えられる。右図は申請者が実施した既往の研究の一例を示すものである¹⁾。ここに示されるように、F-S-G コンクリート (F:S:G=40:40:20)。図中では CCC として表記。CCC30 は水結合材比が 30%であることを示す。縦軸の正は収縮側) では従来のコンクリートに比べて自己収縮ひずみが極めて大きいことが示されており、あくまで一例であるが、自己収縮の低減を図る必要がある。

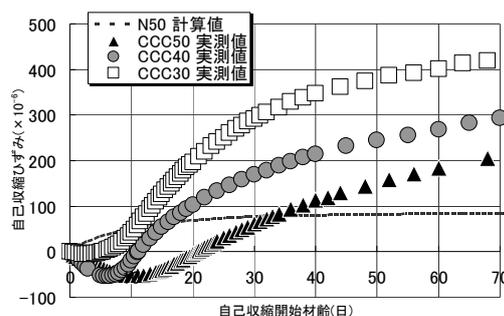


図 B_F_G グリーンコンクリート：CCC (N50 は普通コンクリート w/c50%の計算値) の自己収縮¹⁾

これまで、高強度コンクリートにおける自己収縮ひずみの低減や水分の供給を目的とした内部養生に関する研究は国際的にも活発に行われ、RILEM (国際材料構造試験研究機関・専門家連合) より技術の現状が刊行されている²⁾。その中では、多孔質骨材や吸水性ポリマーなどが有効な水分供給のための材料として提案されている。しかし、ポルトランドセメントを用いた低水セメントペーストの系と本研究で対象とする高炉スラグ・フライアッシュ・廃石こうを用いた系では、自己乾燥の特性そのものが大きく異なる可能性がある。このため、ここでの検討は、B-F-G グリーンコンクリートへの自己養生機能の付与方法とその効果について実験的に検討を行うこととする。すなわち、多孔質骨材および吸水性ポリマーを F-S-G コンクリートに適用した場合の強度発現や自己収縮ひずみ特性などの巨視的特性を把握し、その効果を検証することを目的とする。併せてコンクリート内部の含水率の状態を湿度センサーにより評価し、内部養生効果を検証する。湿度センサーによる測定は、原則として局所的な水分状態の相対評価にとどまるため、中性子ラジオグラフィーによる F-S-G コンクリート全体における水分移動状況 (結合材部分における水分の消費状況と骨材からの水分供給) を可視化し、コンクリート内部における自己養生効果を定量的に評価することを試みる。

・ F-S-G コンクリートにおける自己養生効果を達成するための材料設計手法の開発

本研究では、高炉スラグとフライアッシュの硬化体形成への寄与度を、硬化体の力学性質の観点から検討する。特に本研究においては、右図に示すように高炉スラグの含有率が高いほど圧縮強度が高い傾向にある (F:フライアッシュ, S:高炉スラグ, G:石こう。図中の番号は実際に実験データを取得した調合を示す)。このため、流動性や硬化体の

乾燥収縮を相対的に低減する機能を持つフライアッシュについて、圧縮強度への寄与度を把握することは、本硬化体を構造体コンクリートとして検討する上で重要な意味を持つ。現状、高炉スラグとフライアッシュが同時に存在

する系でフライアッシュの反応率を評価する方法は確立されていない。このため、個別の反応率から系における反応率を間接的に評価することになる。定性的な評価の域を出ない検討ではあるが、材料特性の概ねの傾向を捉えることは十分可能であると考え。具体的には、フライアッシュ・二水石こう・アルカリ刺激剤（現状では軽焼ドロマイトを使用予定）における硬化体の強度発現や収縮特性と選択溶解法により評価される反応率との関連性を検討する。混和材の力学的性質と反応率の特性を踏まえ、F-S-G コンクリートとしての結合材の水和過程において消費される水分量と骨材から供給される水分量がバランスするための適切な材料物性や調合条件を、硬化体の力学特性や耐久性の観点に立って提案する。

平成 23 年度以降

・構造部材としての挙動

本研究で検討する F-S-G コンクリートは、セメントのような強アルカリを保持しない。したがって、構造部材として従来一般に用いられている鉄筋はその使用の前提条件が崩れることになり、新たな補強筋を模索する必要がある。本研究では、まず「竹」を用いることを検討する。この理由は以下の通りである。

- ・ 竹はそれ自体が吸水性を有するため、補強筋としての効果だけでなく F-S-G コンクリートへ水分を供給する効果が期待できる。
- ・ 鉄筋代替とすることによる二酸化炭素の排出抑制への更なる寄与が期待できる。
- ・ アルカリ環境下において竹が有するリグニンの分泌によりセメントが硬化不良を起こすが、F-S-G においてはその懸念が払拭され、以上の点からも、F-S-G コンクリートと竹の組み合わせには一定の合理性が存在する。

過去に、竹を補強筋としての利用するための研究もあった⁴⁾。今一度、F-S-G コンクリートとの組み合わせにおいてその適用性を検討したい。竹の適用性が困難な場合、連続繊維などによる補強やその他の補強方法の可能性を模索する。

[参考文献]

1)伊藤渉, 今本啓一他: 高炉スラグ・フライアッシュ・廃石膏ボード微粉末混合セメントコンクリートに関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.825-828, 2009.

2)RILEM, Internal Curing of Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC Edited by K. Kovler and O. M. Jensen, 2007.

3)今本啓一他: 廃せっこう微粉末とフライアッシュ, 高炉スラグを用いた無機硬化体の開発, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.591-592, 2006.

4)例えば, 巽純一: 竹筋コンクリート梁の湾曲試験, 建築学会論文集, 第 13 号, 昭和 14 年 4 月

4. 研究成果

本研究成果は以下にまとめられる。

(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。

なお、本研究成果の一部としての竹を用いた構造部材の開発は、2013 年度の大林研究助成を獲得し、バングラディッシュでのサイクロンシェルター建設のための基礎的な検討として展開している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 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竹を補強材として用いた CFB (Composite Cement Concrete-Filled-Bamboo) の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 686 号, 2013 年 4 月
2. 今本 啓一, 野々山 聡, 磯 文夫: 高炉スラグ骨材を用いた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特性, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, (公社) 日本コンクリート工学会, pp.2011.12

[学会発表] (計 3 件)

1. Kei-ichi IMAMOTO, Composite Cement Concrete- Filled-Bamboo Comprising Pulverized Waste Plasterboard, Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Workshop on Utilization of Waste Materials in Manila 2013, Sep. 2013, Manila, Philippines
2. 雨宮 栞, 小川裕史郎, 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竹を補強材として用いた構造部材の開発~その 1 結合材の性質~, (社) 日本建築学会関東支部研究発表会, 2013 年 03 月 06 日~2013 年 03 月 09 日, 東京
3. 小川裕史郎, 雨宮 栞, 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竹を補強材として用いた構造部材の開発~その 2 部材の性質~, (社) 日本建築学会関東支部研究発表会, 2013 年 03 月 06 日~2013 年 03 月 09 日, 東京

[その他]

ホームページ等

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/imamoto/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 今本啓一 (IMAMOTO KEIICHI)
東京理科大学工学部第二部建築学科准教授
研究者番号：60337300
- (2) 研究分担者 兼松学 (KANEMATSU MANABU)
東京理科大学工学部建築学科准教授