

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：92604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360252

研究課題名(和文) 高炉セメントを用いた鉄筋コンクリート躯体の収縮ひび割れ制御設計手法の確立

研究課題名(英文) Investigation for shrinkage cracking controlling design scheme applying to reinforced concrete structures involving Blast Furnace Slag cement

研究代表者

関田 徹志 (Kanda, Tetsushi)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・その他

研究者番号：40416780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円、(間接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、CO₂排出量削減の喫緊の課題である混合セメント利用拡大に向け、乾燥の影響が少ない地下躯体に適用が限られる高炉セメントを用いた鉄筋コンクリート(RC)構造物を対象に、上部躯体への利用拡大を図ることを最終目的とする。高炉セメントRC部材は、収縮ひび割れ抵抗性に劣ることが問題で、同部材を対象に収縮ひび割れ制御設計手法の確立を目指した。本研究の結果、高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れメカニズムの解明および解析手法の提案、同コンクリートのひび割れ抑制対策の効果の定量化と解析的再現、高炉セメントRC部材の収縮ひび割れ制御システムの構築と妥当性の検証の3つの成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The ultimate goal of this study is to promote Blast Furnace Slag cement application, where reinforced concrete upper ground structures are targeted as well as underground structures. Toward this goal, this study focused to establish shrinkage cracking controlling design scheme for R/C with BFS cement concrete. Consequently, three major achievements were resulted: 1) clarifying and analytically reproducing restraint shrinkage cracking mechanism of BFS cement concrete, 2) developing countermeasures for reducing restraint cracking risks of BFS cement concrete, 3) Proposing and clarifying shrinkage cracking controlling design scheme.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：構造材料 高炉スラグ 収縮 ひび割れ クリープ 環境温度 養生

1. 研究開始当初の背景

高炉セメントなど混合セメントの利用拡大は、京都議定書目標達成のため喫緊の課題であり、建築構造物に関して適用部位が地下構造に限定されている高炉セメントの上部躯体への適用拡大が課題克服に重要である。適用拡大の障害要因のうち重要なものは、高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性が劣ることによる躯体品質の低下であり、同コンクリートの収縮ひび割れ制御設計手法の確立が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、収縮ひび割れ抵抗性の向上による躯体品質確保が課題で、乾燥の影響が少ない地下部材に適用が限定されている高炉セメントを用いた鉄筋コンクリート(RC)構造物を対象とした。ここでは、高炉セメントの建築上部躯体への利用拡大を最終目的とし、高炉セメント RC 部材の収縮ひび割れ制御設計手法の確立を目指し研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究で実施した研究項目を下記に示す。

- (1)高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ発生メカニズムの定量的解明
- (2)高炉セメントコンクリートを対象とした収縮ひび割れ解析手法の構築
- (3)同コンクリートのひび割れ抑制対策の効果の定量化と解析的再現
- (4)高炉セメント RC 部材の収縮ひび割れ制御システムの構築と妥当性の検証

4. 研究成果

- (1)高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ発生メカニズムの定量的解明

高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上および解析手法の構築に資する知見を得るため、同コンクリートの収縮ひび割れ発生メカニズムの定量的解明を試みた。本検討では、養生温度が異なる条件下での拘束ひび割れ試験(図 1)により、ひび割れ抵抗性を定量化すると共に、応力解析に必要な構成則に基づき、その発生メカニズムを検討した。

拘束ひび割れ試験から得られた養生温度がひび割れ材齢に与える影響を図 2 に示す。同試験において、早期にひび割れが生じるほど、収縮ひび割れ抵抗性が低いことを意味する。図 2 から、普通セメントコンクリートは養生温度によらず 40 日程度でひび割れが生じているのに対し、高炉セメントコンクリートは普通コンクリートよりも早期にひび割れが生じており、特に高温時にその傾向が顕著であった。

各構成則に関する試験結果から、高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性が低下する原因として、乾燥の影響により強度の増進が停滞すること(図 3)、養生温度が高い場合に自由ひずみが大きくなること(図 4)、

クリープ係数が普通コンクリートの0.5~0.8倍程度であり応力緩和が小さいことなどが(図 5)、実験的に明らかとなった。

本検討により、高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性が定量的に明らかとなり、その発生メカニズムに関わる要因を見出した。これらの新たな知見は、収縮ひび割れ抵抗性向上の鍵となるだけでなく、解析手法の実現に大きく寄与するものである。

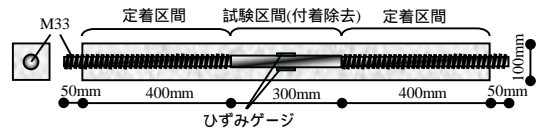


図 1 拘束ひび割れ試験体の詳細

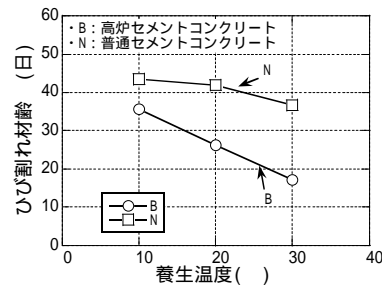


図 2 養生温度がひび割れ材齢に与える影響

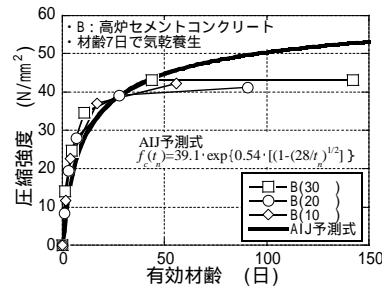


図 3 乾燥が強度発現に与える影響

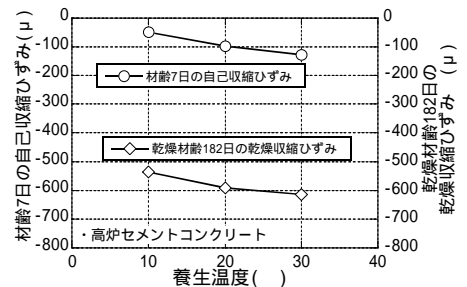


図 4 養生温度が自由ひずみに与える影響

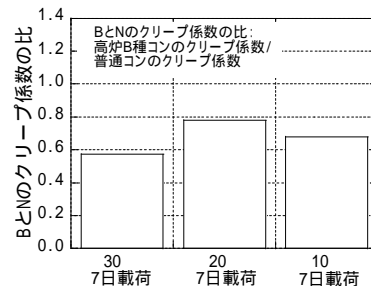


図 5 高炉セメントコンクリートと普通コンクリートのクリープ係数の比

- (2)高炉セメントコンクリートを対象とした収縮ひび割れ解析手法の構築
- 上述の試験結果から、高炉セメントコンク

リートに対応した各構成則モデルを検討し、これに基づく解析手法を提案した。(1)の知見から、収縮ひび割れに大きな影響を与える構成則として、強度発現、自由ひずみおよびクリープの3つが挙げられ、これらについて、試験結果を数式化し応力解析の入力に供した(図6~図8)。上記の拘束ひび割れ試験結果を解析対象として、普通コンクリートのひび割れ予測にも用いられるstep by step法により応力解析を実施した。

応力解析の結果、高炉セメントコンクリートにおいても、環境温度10~20であれば、適切な構成則を用いることで、普通コンクリートと同様の応力解析手法により、その収縮ひび割れ発生を予測できる見通しが得られた(図9~図10)。しかし、環境温度30における応力解析結果は実験結果の1.3倍程度であり、クリープを過小評価している可能性が認められ、その原因として微細ひび割れが多く発生したことにより応力緩和が生じたことが考えられる(図11~図12)。解析対象の試験体断面は10×10cmと小さく、試験体表面の微細ひび割れの影響を強く受ける条件であるが、実構造物では部材断面が大きいため、微細ひび割れの影響が小さくなることが予想され、本解析手法の精度向上が期待できる。

本検討により、高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ解析手法の見通しが得られた。特に、クリープに関する既往の研究が極

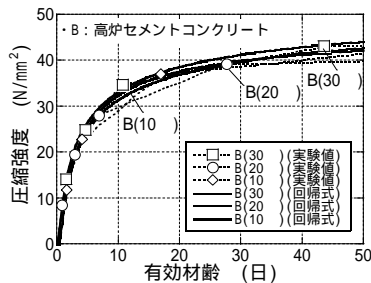


図6 圧縮強度の回帰式

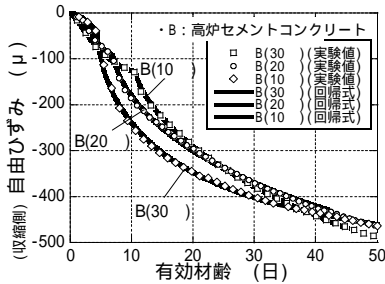


図7 自由ひずみの回帰式

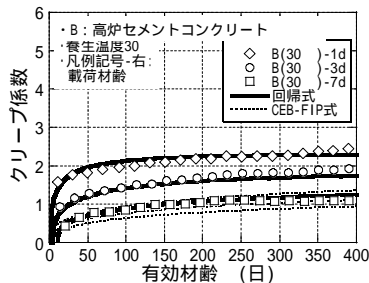


図8 クリープの回帰式 (B(30))

めて少ない状況の中で、同コンクリートの解析手法構築に向けクリープに着目した点は新規性が高く、このことは同解析手法の精度向上に大きく寄与している。

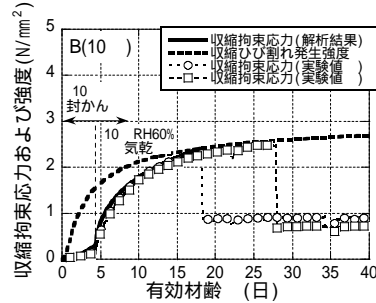


図9 収縮ひび割れ解析結果-B(10)

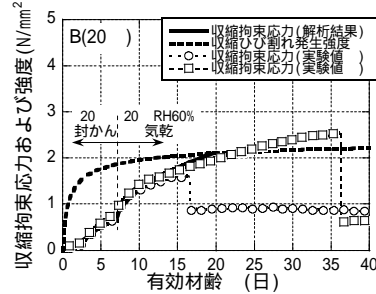


図10 収縮ひび割れ解析結果-B(20)

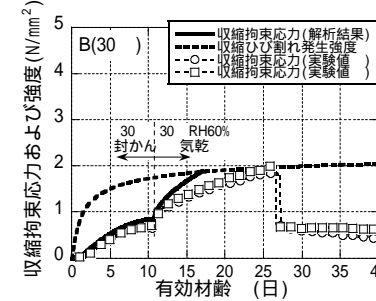


図11 収縮ひび割れ解析結果-B(30)

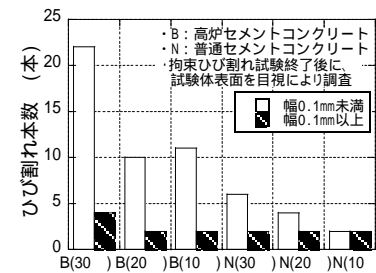


図12 拘束ひび割れ試験後の微細ひび割れ調査結果

(3) 同コンクリートのひび割れ抑制対策の効果の定量化と解析的再現

ひび割れ抑制対策の効果の定量化

施工性および経済性の観点から、建築工事で採用可能な現実的なひび割れ抑制対策として、材料的な対策と施工的な対策の2つのアプローチを試みた。材料的な対策としては、高炉スラグ混和率の低減、石膏および炭酸カルシウム添加、低ブレン高炉スラグ、収縮低減剤などに着目し、図1の拘束ひび割れ試験により各対策の効果の評価した。施工的な対策としては、水和に水分を多く必要とする高炉セメントコンクリートの特性に着目

し、湿潤養生の効果を検討すると共に、実工事に採用できる養生方法を提案した。

ひび割れ抑制対策を講じた高炉セメントコンクリートの拘束ひび割れ試験結果を図13に示す。図13から、各材料の効果は定量的に明らかとなり、経済性の観点から、高炉スラグ混和率の低減、石膏および炭酸カルシウムの添加、湿潤養生などの組合せが有望な対策であることを見出した。

湿潤養生では、水分供給量の多い冠水養生が望ましいが、他の工程に与える影響が大きく実工事での採用が困難な場合も多い。ここでは、冠水養生に代わる養生方法として、散水後にフィルムを敷く湿封養生を提案した(図14)。検討の結果、スラブ厚さ250mm以下であれば、この湿封養生は冠水養生と同等の効果が得られることが確認された(図15)。

本検討により、実用的なひび割れ抑制対策を提案した。特に施工性および経済性を重視した点が重要で、本研究成果は学術的意義に加え実務に大きく貢献できると考える。

ひび割れ抑制対策の解析的再現

前記ひび割れ対策では、特に石膏の添加や湿潤養生を実施した場合に、硬化初期にコンクリートが膨張することにより、圧縮応力が導入される。この特徴的な挙動を上述の解析手法にて再現できること確認した。

ひび割れ対策を講じた高炉セメントコンクリートの拘束ひび割れ試験結果を対象に、応力解析を行った結果、同コンクリートの特

徴的な硬化初期の圧縮応力の導入を精度良く再現できることが確認された(図16~17)。

本検討により、高炉セメントコンクリートにひび割れ抑制対策を講じた場合においても、応力解析により、そのひび割れ発生を予測できる見通しが得られた。

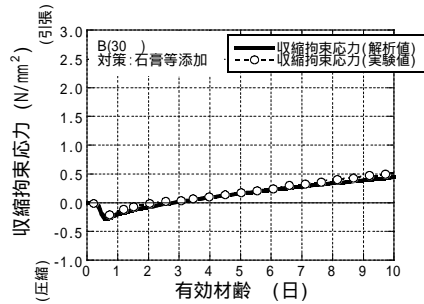


図16 収縮ひび割れ解析結果
-B(30)+石膏等添加-

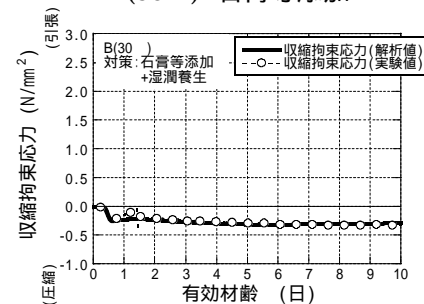


図17 収縮ひび割れ解析結果
-B(30)+石膏等添加+湿潤養生-

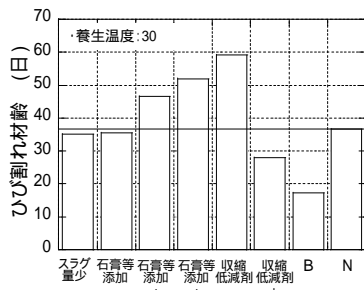


図13 ひび割れ抑制対策による
収縮ひび割れ抵抗性の向上効果

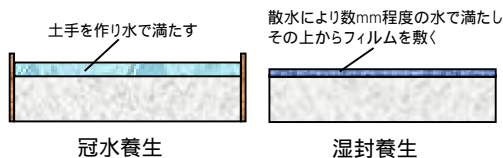


図14 湿潤養生の詳細

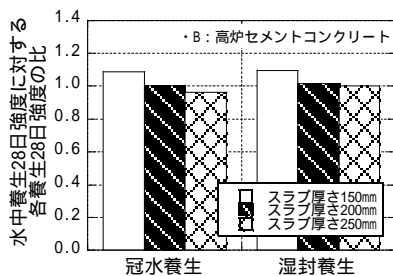


図15 湿潤養生が圧縮強度に与える影響

(4)高炉セメント RC 部材の収縮ひび割れ制御システムの構築と妥当性の検証

これまでの検討により提案した解析手法および抑制対策を要素技術とした収縮ひび割れ制御システムを構築した(図18)。ここでは本制御設計手法の妥当性検証を目的として、高炉セメントコンクリートにより実大デッキスラブを作製し、そのひび割れ測定結果などから、本解析手法の精度を検証した。

実大デッキスラブ試験体の詳細を図19に示す。デッキスラブは、厚さ150mm、幅1250mm、長さ3000mmの形状とした。長手方向の拘束度は0.7程度を想定し、鉄鋼にはH-300x300x10x15を2本配した。デッキスラブの配筋は、D10@150mmダブルとし、鉄筋比は0.61%とした。

今回の解析では、平面内の拘束状態を適切に表現するために、2次元の非線形有限要素法を用いることとした。コンクリートと鉄骨は膜要素、鉄筋は配筋方向の軸剛性のみ持つ分布鉄筋とし、コンクリートと鉄骨間のシアキーをスカラーバネでモデル化した。また、コンクリートの収縮によって鉄骨に曲げ変形が生じたため、鉄骨の断面積を適宜減じることで、曲げ変形によって生じる見かけの軸剛性の低下を表現した。なお、実験結果では、鉄骨上のコンクリートのみひび割れ、中央部はひび割れていないため、解析モデルでは、鉄骨上のコンクリートのみひび割れを許容

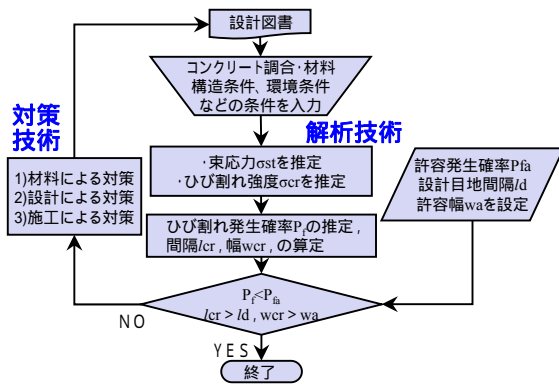


図 18 収縮ひび割れ制御システムの概要

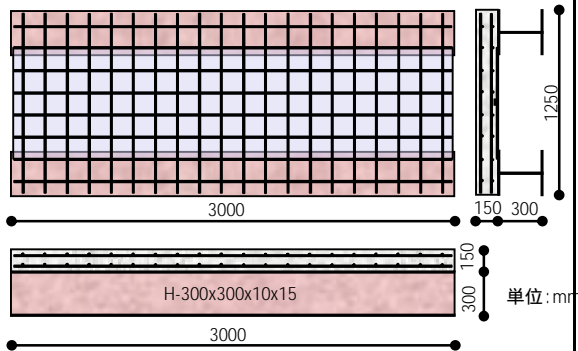


図 19 実大デッキスラブ試験体の詳細

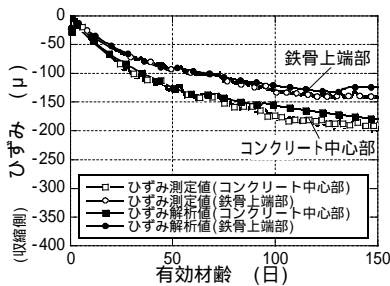


図 20 鉄骨上端とデッキ鉄筋のひずみの推移

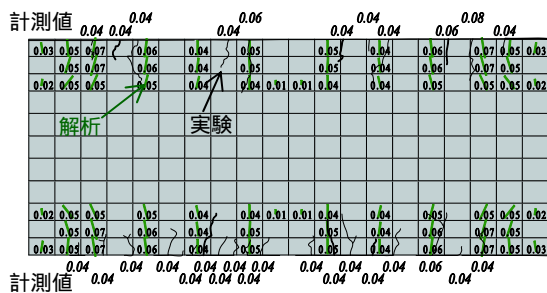


図 21 有効材齢 150 日時点のひび割れ図
図中の数値はひび割れ幅[mm]

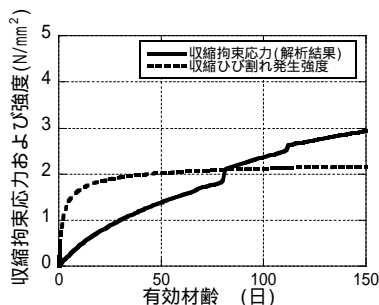


図 22 コンクリートの応力と引張強度の関係

して、中央部は弾性状態を維持すると仮定し中央部の応力状態を考察することとした。

図 20 は、得られた鉄骨上端のひずみとコンクリート中心部のひずみを示しており、計測値と解析値はよく一致している。図 21 に、有効材齢 150 日時点のひび割れ図を示す。計測で得られたひび割れは、鉄骨上の微細なひび割れであり、解析でも同様なひび割れを得た。以上のひずみとひび割れ図の比較より、今回の解析モデルの妥当性を確認した。

一方、図 22 に示すように、コンクリート中心部の応力の推移を確認すると、材齢 80 日ごろにはひび割れ強度を超過しており、今回のモデル化が正しいのであればデッキ中央ではひび割れが生じるはずである。しかし、実験ではデッキ中央にひび割れは生じていないため、今回のモデル化では考慮されていない要因（例えば曲げ変形の 3 次元的な効果など）が存在すると推測できる。以上のことから、課題は残るものの、実大デッキスラブのひずみ挙動をおおよそ再現できる結果が得られ、本制御設計手法の妥当性確認に向け見通しが得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 19 件)

- 1) 百瀬晴基、閑田徹志、石関浩輔、今本啓一、清原千鶴：低収縮高炉セメントコンクリートに関する研究、鹿島技術研究所年報、Vol.62、2014 (査読無)(掲載予定)
- 2) 閑田徹志、百瀬晴基、依田和久、今本啓一、小川亜希子：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性及び各種要因の影響およびその向上対策に関する実験検討、日本建築学会構造系論文集、No. 695、pp.9-16、2014 (査読有)
- 3) 荒井圭子、今本啓一、清原千鶴、西祐宜：高炉セメントコンクリートの乾燥収縮抑制対策に関する実験的研究、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.84、pp.21-24、2014(査読無)
- 4) 清原千鶴、閑田徹志、百瀬晴基、石関浩輔、今本啓一：低収縮型高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究 その 4 応力解析手法の検討概要、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.84、pp.14-17、2014(査読無)
- 5) 清原千鶴、閑田徹志、百瀬晴基、石関浩輔、今本啓一：低収縮型高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究 その 3 養生方法の検討、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.84、pp.13-16、2014(査読無)
- 6) 百瀬晴基、石関浩輔、閑田徹志、今本啓一、清原千鶴、鳴澤岳：夏期高温環境における高炉セメント A 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性向上に関する実験検討、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.84、pp.9-12、2014(査読無)
- 7) 百瀬晴基、閑田徹志、依田和久、笠井浩：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび

割れ抵抗性の向上に与える軽量骨材の効果に関する実験検討コンクリート年次論文集、Vol.35、No.1、pp.589-594、2013(査読有)

8)石関浩輔、坂敏秀、閑田徹志、丸山一平：RBSMを用いたRC壁の乾燥収縮ひび割れ解析における完全付着モデルの適用性検討、コンクリート年次論文集、Vol.35、No.1、pp.457-462、2013(査読有)

9)Kanda, T., Momose, H., Ishizeki, K., Imamoto, K. and Kiyohara, C.:Effect of optimizing curing condition and constitutive materials on improving shrinkage cracking resistance of BFS blended cement concrete exposed to hot environment, Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction(EASEC-13)、Sapporo、2013(査読無)

10)百瀬晴基、閑田徹志、石関浩輔、今本啓一：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する実験検討、鹿島技術研究所年報、Vol.61、pp.111-118、2013(査読無)

11)石関浩輔、閑田徹志、百瀬晴基、今本啓一、清原千鶴、鳴澤岳：高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に関する実験検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.11-13、2013(査読無)

12)Kanda, T., Momose, H., Yoda, K. and Shintani, A.: Experimental Investigation for Improving Shrinkage Cracking Resistance of BFS Blended Cement Concrete Exposed to Hot Environment, Third International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (SCMT 3)、Kyoto、2013(査読無)

13)閑田徹志、百瀬晴基、新谷 彰、依田和久：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす高温環境および構成材料の効果に関する実験検討その 1 実験計画、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.83、pp.209-212、2013(査読無)

14)閑田徹志、百瀬晴基、新谷 彰、依田和久：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす高温環境および構成材料の効果に関する実験検討 その 2 実験結果、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.83、pp.213-216、2013(査読無)

15)百瀬晴基、閑田徹志、今本啓一、小川亜希子：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する実験検討 その 2：拘束ひび割れ試験結果およびクリープ試験結果、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.83、pp.189-192、2013(査読無)

16)百瀬晴基、閑田徹志、今本啓一、小川亜希子：高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する実験検討 その 1：実験計画、フレッシュ試験結果および強度試験結果、日本建築学会関東支部研究報告集 I、

Vol.83、pp.185-188、2013(査読無)

17)鳴澤 岳、閑田徹志、百瀬晴基、石関浩輔、今本啓一、清原千鶴：低収縮型高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究 その 2 強度試験および拘束ひび割れ試験、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.83、pp.209-212、2013(査読無)

18)清原千鶴、閑田徹志、百瀬晴基、石関浩輔、今本啓一、鳴澤 岳：低収縮型高炉セメントコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究 その 1 実験計画、日本建築学会関東支部研究報告集 I、Vol.83、pp.213-216、2013(査読無)

19)Kanda, T., Shintani, A., Momose, H., Imamoto, K., and Ogawa, A.: Shrinkage cracking resistance of BFS blended cement concrete subjected to different ambient temperatures、8th International Conference - Concrete in the Low Carbon Era, Dundee, pp. 1106-1118、2012(査読無)
〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：高炉セメントコンクリートの養生方法

発明者：百瀬晴基、閑田徹志

権利者：鹿島建設株式会社

種類：特許権

番号：特願 2013-034945

出願年月日：平成 25 年 2 月 25 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

閑田 徹志 (KANDA TETSUSHI)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・グループ長

研究者番号：40416780

(2)研究分担者

百瀬 晴基 (MOMOSE HARUKI)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・主任研究員

研究者番号：30416789

坂 敏秀 (SAKA TOSHIHIDE)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・主任研究員

研究者番号：30443740

今本 啓一 (IMAMOTO KEIICHI)

東京理科大学・工学部第二部建築学科・教授

研究者番号：60337300

石田 雅利 (ISHIDA NASATOSHI)

鹿島建設株式会社(技術研究所)・その他部局等・グループ長

研究者番号：70443736