

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420585

研究課題名(和文)レオロジーに基づくフレッシュコンクリートの施工設計法確立のための基礎的研究

研究課題名(英文)Basic study on construction design method of the fresh concrete based on the rheology

研究代表者

山田 義智 (YAMADA, Yoshitomo)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：80220416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：フレッシュコンクリートの施工設計法を確立するための基礎研究として、本研究では、新たなフレッシュコンクリートの流動解析手法を開発した。この流動解析手法では、コンクリートの温度依存や材料分離を考慮した解析が可能である。さらに本研究では、BIMを用いて流動解析のインプットデータを効率よく作成するシステムも開発した。このBIMの利用はフレッシュコンクリートの流動解析を効率的にした。

研究成果の概要(英文)：As basic study to establish construction design of the fresh concrete, we developed flow analytical technique of fresh concrete in this study. Analysis in consideration of temperature dependence and materials segregation of the concrete is available for this flow analytical technique. Furthermore, We used BIM (Building Information Modeling) as an efficient input data system of the flow analysis. The use of BIM did flow analysis of the fresh concrete effectively.

研究分野：建築材料学

キーワード：フレッシュコンクリート レオロジー 材料分離 MPS法 BIM

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは、流動性を有するフレッシュ状態の時期に型枠内に打込み・充填することによって、設計者の意図する様々な造形の構造物を継ぎ目のない一体なものとして作ることが出来る。しかし、その打込み・充填の仕上がり具合の良否は、コンクリートが不透明であることや、型枠で囲まれた密閉空間に打込まれることにより目視で確認することが出来ず、ワーカビリティの状態やパイプの挿入間隔、締固め時間等を判断材料として、技術者や職人らの経験に依存してきた面が大である。近年は、施工条件と使用材料の多様化や鉄筋量の増大、さらには経験豊かな技術者不足の状況も相俟って、コンクリートの施工を取り巻く環境は厳しくなっている。

このような状況において、予めコンクリートの打込み・充填をシミュレーションできる流動解析をコンクリート工事へ利用することが期待されている。しかし、コンクリートの温度や経過時間により変化するコンクリートの流動特性がいまだに定式化されていないこと、材料分離や鉄筋による閉塞、パイプによる振動などを考慮可能な流動解析手法が開発されていない問題がある。さらには過密に鉄筋が配筋された部材の内部空間を流動解析に応じてモデル化することが困難である課題がある。

2. 研究の目的

本研究は、フレッシュコンクリートの合理的な施工設計法の確立を目指して、レオロジーに基づきフレッシュコンクリートの流動特性を理解し、流動解析手法の課題を解決することを目的とする。

そのために、本研究ではコンクリートの流動特性として特徴的な以下の項目の考慮した流動解析手法を開発する。

- (1) セメント粒子の凝集と分散および水和の進行による流動性の変化。
- (2) 材料分離による流動特性の変化
- (3) 鉄筋周りでの閉塞や振動による流動特性の変化

また、コンクリートの施工設計を行うためには、鉄筋が配筋された複雑な部材断面をモデル化して流動解析を行わなければならないが、そのモデル化は困難である。そこで、本研究では、最近建築分野で普及しつつあるBIMを用いて、部材断面をモデル化する事で、過密に鉄筋が配筋された部材でも流動解析が比較的容易に行えるシステムを開発することも研究目的の一つとした。

3. 研究の方法

本研究では、上述した研究目的を達成するために、次の4項目の検討、開発等を行った。

- (1) 凝集・分散、水和、温度および経過時間が流動特性に及ぼす影響の検討
- (2) 流動構成式と材料分離を考慮した流動解

析手法の開発

- (3) 鉄筋による閉塞問題および振動伝播解析の検討
- (4) BIM と流動解析を併用したコンクリート充填シミュレーションシステムの開発

4. 研究成果

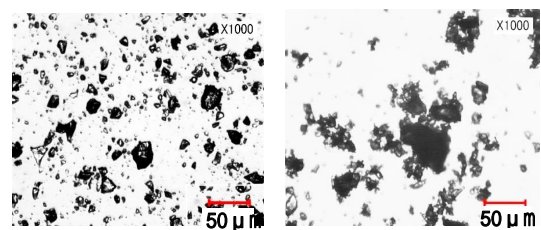
ここでは、上述の3章の研究の方法に記載した項目毎に研究成果を纏める。

- (1) 凝集・分散、水和、温度と経過時間が流動特性に及ぼす影響の検証

凝集・分散がペースト粘度に与える影響について、マイクロスコブによる観察結果と粘度に関する実験結果を以下に示す。

写真-1 はセメントペースト中のセメント粒子(普通ポルトランドセメント)の状態をマイクロスコブにより 1000 倍に拡大して示している。ここで、ペーストは練り混ぜた後に、観察が可能のように希釈している。写真-1(a)はポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤(以後、SP と略す)をセメント重量に対して 0.9% 添加して、セメント粒子が分散した状態である。また、写真-1(b)は SP を添加せずにセメント粒子が凝集している状態である。

図-1 は W/C45%ペーストのせん断ひずみ速度による粘度の変化を表している。図中の実線は SP を添加していない場合、点線は SP を添加した場合の結果である。なお、各せん断ひずみ速度におけるペーストの粘度は、せん断ひずみ速度を 300 秒間与え続けて、定常状態とみなせる場合の見かけの粘度である。



(a) Dispersion (b) Flocculation
写真-1 セメント粒子の状態

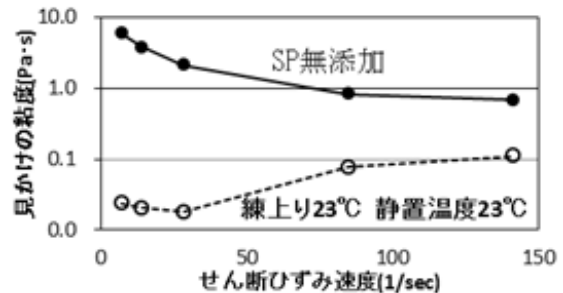


図-1 せん断ひずみ速度による粘度変化

セメント粒子が分散し、せん断ひずみ速度が作用しない場合、写真-1(a)の様に粒子の長径方向がランダムな状態である。しかし、せん断ひずみ速度が作用すると、せん断ひずみ速度の小さな範囲では、流体の流れによって粒子の長径方向が揃い流れやすくなる配

向が生じるために粘度が低下すると考えられ、図-1 中の SP 添加時の粘度挙動でもこの粘度低下の現象が確認できる。さらに、せん断ひずみ速度が大きくなると乱れの影響や粒子間の接触・衝突の影響で粘度が上昇すると考えられ、図-1 中の SP 添加時のダイヤラント的(ただし、ここでは体積増加は意味していない)な粘度挙動が確認できる。

一方、図-1 の SP 無添加時の粘度挙動は、粘度がせん断ひずみ速度の増加に伴い低下している。この粘度低下の現象は、凝集していたセメント粒子がせん断ひずみ速度やそれが作用する時間(ずり時間)により、次第に分散して、凝集体内に拘束していた水を放出するため粘度が低下しているものと考えられる。

図-2 にペーストの相対粘度とエトリンガイト生成量の関係を示す。ここで、相対粘度を用いた理由は、溶媒粘度の温度による影響を除くためである。図-2 より、エトリンガイト生成量の増加に伴い、ペーストの相対粘度も上昇する傾向が認められ、水和に伴う粘度増加の一端が明らかにされている。

初期の水和で主に生成されるエトリンガイトの温度および経過時間に伴う生成量を XRD/リートベルト法で求めて、図-3 に示す。ペーストの練上がり温度が 23 (左および中央)のエトリンガイトの生成量は、静置環境温度に関わらずほぼ同じである。一方、練上がり温度 35 のエトリンガイト生成量は、練上がり 23 の生成量よりも大きくなる。

図-2 および図-3 より、温度と経過時間が水和の進行に影響を与え、水和の進行程度とペーストの粘度には相関が有ることが分かった。

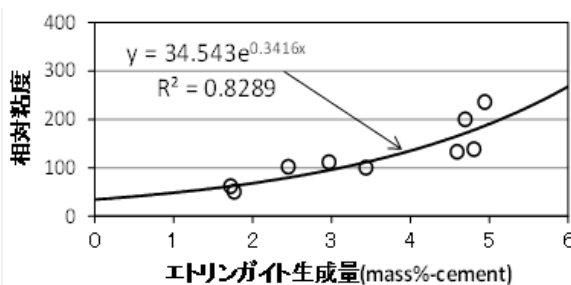


図-2 エトリンガイト量と粘度の関係

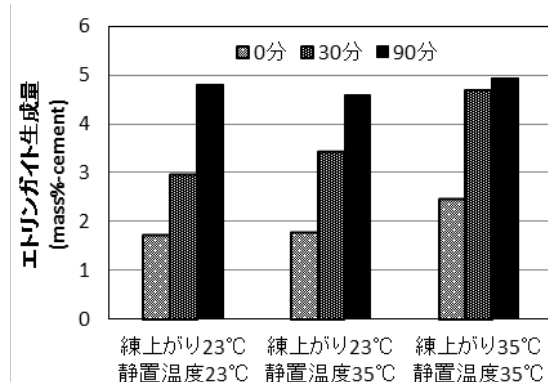


図-3 温度、経過時間とエトリンガイト量

(2) 流動構成式と材料分離を考慮した流動解析手法の開発

Regularized Bingham モデル

Bingham モデルはひずみ速度が 0 の場合、せん断応力が降伏値以下で不定となり解析が行えない。そこで、低ひずみ速度では非常に粘度の高い流体を表し、高ひずみ速度では Bingham モデルと一致するように工夫した連続関数である Regularized Bingham モデルが提案されており、本研究では流動構成式としてこのモデルを用いた。図-4 に Regularized Bingham モデルの概要を記す。

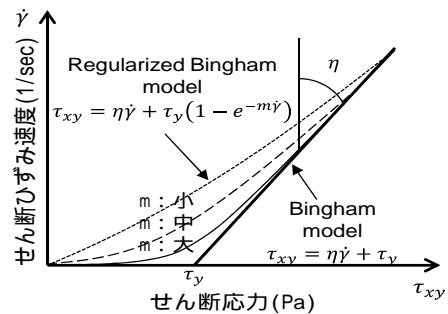


図-4 Regularized Bingham モデルの概要

MPS 法による材料分離を考慮した流動解析手法の開発

本研究では、越塚らによって開発された粒子法の一つである MPS 法をベースに流動解析手法の開発を行った。

従来の MPS 法では圧力が時間・空間的に振動し、計算が不安定になることが知られている。そこで、本研究では、入部らの提案する勾配計算式と田中らの提案する圧力ポアソン方程式を用いて、圧力の振動を抑えて安定した流動解析が行えるようにした。

さらに本研究では、流体内の圧力差に応じてコンクリート中のモルタル分が移動するモデル(図-5 参照)を MPS 法に組み込み、コンクリートに生じる材料分離を表す解析手法も開発した。

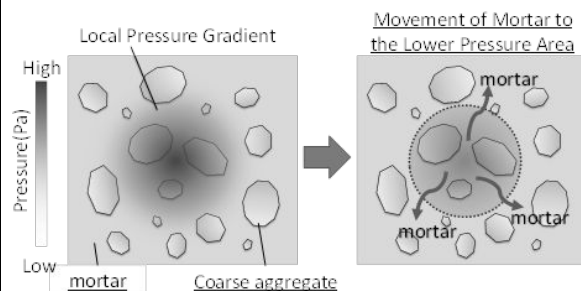


図-5 材料分離モデルの概要

材料分離解析の有効性の確認

各種調合のコンクリート試料を用いてスランプフロー試験を行い、円状に広がったコンクリート試料を半径方向に 3 分割して(図-6 参照)、それぞれの領域のコンクリートに含まれる粗骨材の割合を求めた。

上記と同様な条件で、MPS 法による材料分

離を考慮したスランプフロー解析を行い、3分割したそれぞれのコンクリート中に含まれる粗骨材の割合を求めて、上述の実験結果と比較したところ、図-7に示す様に実験結果と解析結果はよく一致した。このことより、今回開発した材料分離を考慮した流動解析手法は有効であることが確認された。

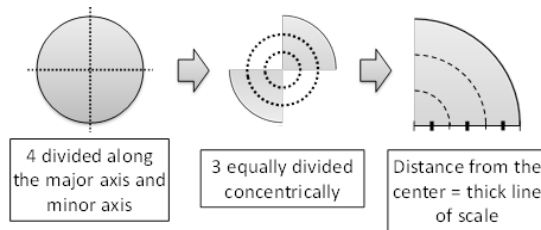


図-6 スランプフロー試験後のコンクリート試料の分割

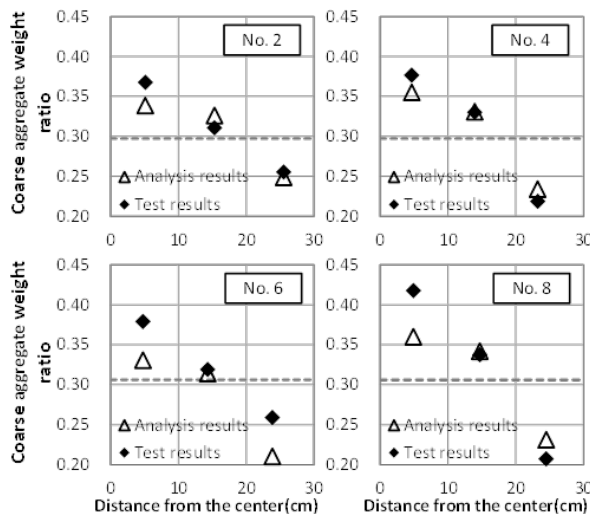


図-7 スランプフロー試験後のコンクリート試料中の粗骨材割合に関する実験結果と解析結果の比較

(3) 鉄筋による閉塞問題および振動伝播解析の検討

鉄筋周りの材料分離（粗骨材の滞留現象）

図-8に鉄筋周りにおける材料分離（粗骨材の滞留）の状況について、開発したMPS法による2次元流動解析結果を示す。

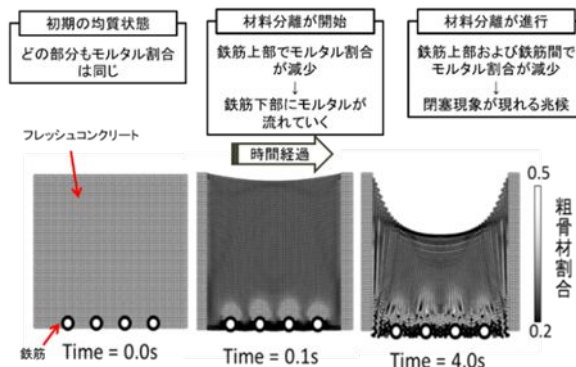


図-8 鉄筋周りの材料分離（粗骨材滞留）解析

図-8は、左から右に時間が経過している。同図より、まず鉄筋上部に粗骨材割合の高い部分ができ、次にその部分が鉄筋間の上部にも拡張していることが確認できる。この粗骨材割合の高い滞留部分では、固相の増加により粘度が増して流動性が低下する。

本解析手法では、粗骨材のかみ合いによる閉塞問題は直接的に表現できないが、粗骨材が鉄筋周りに滞留することを定量的に表すことが出来るので、間接的に閉塞の危険性を評価できるものと考えている。

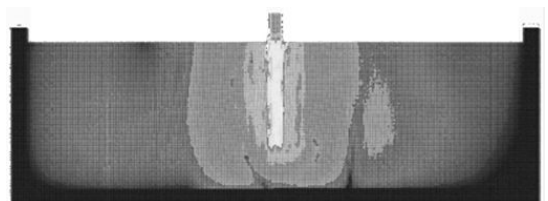
振動加速度伝播解析

解析対象モデルは高さ50cm、横幅180cmの矩形型枠で、パイプレータは型枠の壁から90cm、型枠の底から15cmの位置に先端が来るように設定した。ここで、パイプレータの振幅および振動数は2.1mmと200Hzとし、コンクリートのレオロジー定数は、塑性粘度 = 168.9 [Pa · s]、降伏値 $y = 1373.1$ [Pa]とした。

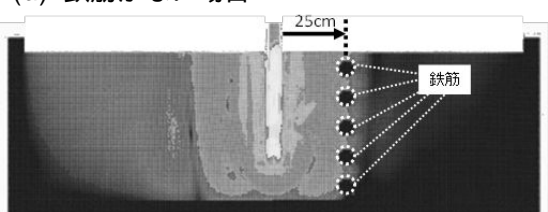
図-9に振動加速度伝播解析の解析結果を可視化して示す。なお、図-9(a)は鉄筋の無いモデルの結果であり、図-9(b)は鉄筋を配置した場合の結果である。

パイプレータからの距離によって加速度が急速に減少することは既往の計測結果と対応している。また、鉄筋による加速度の減衰についても確認できる。

鉄筋が複雑に配筋された空間におけるフレッシュコンクリート中の振動加速度伝播状況の理解は、締固めの程度を定量的に把握することに活用できる。



(a) 鉄筋がない場合



(b) 鉄筋がある場合



図-9 振動加速度伝播の可視化

(4) BIMと流動解析を併用したコンクリート充填シミュレーションシステムの開発

BIMの概要

BIM (Building Information Modeling) とは、3次元CADで建築物を作成したモデルに、使用材料のコストや物性、施工方法や維持管

理情報などの属性データを追加した建築物データベースを、設計・施工から維持管理まであらゆる工程における情報を連携しながら有効活用する新しい手法である。

本研究では、今後活用されるであろう BIM を用いてコンクリート充填シミュレーションを行う部材を対象に配筋や型枠の 3 次元形状データを作成している。

なお、BIM ソフトウェアは、Vectorworks 2015 を用いた。

形状データについて

BIM で作成された建築物のデータ (BIM データ) は、単に建物を 3 次元的に表現する図形データを持つだけでなく、柱や床に使用される部材単価や材料物性、鉄筋の配置や本数など、構成する部位・部材などの属性情報を 1 次元的に纏めるデータ構造 (IFC: Industrial Foundation Class) を有している。BIM データは、IFC を介して設計ソフトウェアと構造解析ソフトウェアの各データの連携が可能である。

本研究では、IFC から鉄筋および型枠データを STL (Standard Triangulated Language) 形式で抽出し、MPS 法流体解析ソフトウェアである Particeworks の入力形状データとして読み込んでいる。

BIM と流動解析を併用したフレッシュコンクリートの充填シミュレーションの試み

図-10 には BIM と MPS 法を併用したコンクリート充填シミュレーションの一例として柱梁接合部のコンクリート充填シミュレーション結果を示す。図は左から右に打込みが進んでいる状態を示している。解析対象としたコンクリートは、スランプフロー 65cm の高流動コンクリート (降伏値 50Pa, 塑性粘度 300Pa・s) である。なお、コンクリートの打込みは、左右の梁の両端部より行っている。この程度の配筋密度であれば、高流動コンクリートを用いる事により、柱梁接合にコンクリートが容易に充填されていることが確認できた。

このように、BIM は流動解析の対象となる鉄筋が配筋された複雑な部材のモデル化を容易にし、流動解析による施工設計の一助となることが検証された。

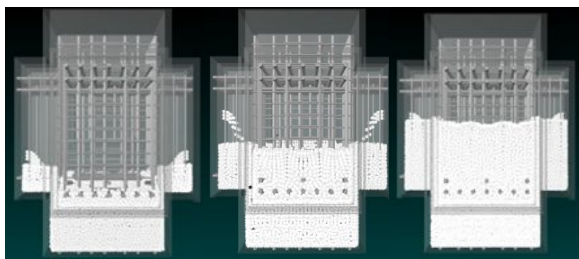


図-10 BIM と MPS 法を併用した柱・梁接合部のコンクリート充填シミュレーション

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 4 件)

(1) 上原義己, 山田義智, 崎原康平, 早川隆之: セメントペーストのレオロジー試験による高流動モルタルおよびコンクリートの流動特性の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016.7, (査読有)(掲載決定)

(2) 上原義己, 山田義智, 崎原康平, 浦野真次: MPS 法を用いた材料分離シミュレーションに関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.711-717, 2016.3, (査読有)

(3) 上原義己, 山田義智, 崎原康平, 赤嶺糸織: 高温環境下におけるフレッシュコンクリートのスランプロス解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, pp.1396-1401, 2014.7 (査読有)

(4) 上原義己, 崎原康平, 山田義智, 浦野真次: 高精度手法を用いた MPS 法によるフレッシュコンクリートのスランプ解析に関する一考察, Cement Science and Concrete Technology, Vol.67, pp.626-633, 2014.3(査読有)

〔学会発表〕(計 12 件)

(1) 上原義己, 山田義智, 崎原康平, 細川佳史: 温度環境がセメントペーストおよびコンクリートの流動性に及ぼす影響, 第 70 回セメント技術大会講演要旨, Vol.70, pp.128-129, 2016.5, ホテルメトロポリタン東京池袋, 東京都・豊島区

(2) 上原義己, 山田義智, 崎原康平: 温度履歴によるフレッシュコンクリートのスランプ変化に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, No.55, pp.141-144, 2016.3, 琉球大学, 沖縄県・西原町

(3) 東舟道裕亮, 山田義智, 上原義己, 崎原康平: 高性能 AE 減水剤添加量によるセメントペーストの流動特性変化に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告, No.55, pp.137-140, 2016.3, 琉球大学, 沖縄県・西原町

(4) 山田義智, 上原義己, 崎原康平: BIM と粒子法を援用したコンクリート充填シミュレーションの試み, 日本建築学会九州支部研究報告, No.55, pp.161-164, 2016.3, 琉球大学, 沖縄県・西原町

(5) 山田義智, 上原義己, 崎原康平, 浦野真次: 新たな材料分離モデルを適用したフレッシュコンクリートの MPS 法流動解析(その 1. 材料分離モデルの提案および粗骨材の分布測定試験), 日本建築学会大会学術講演概要集(関東), pp.1-2, 2015.9, 東海大学, 神奈川県・平塚市

(6) 上原義己, 山田義智, 崎原康平, 浦野真次: 新たな材料分離モデルを適用したフレッシュコンクリートの MPS 法流動解析(その 2. 材料分離係数の決定および材料分離モデルを適用した MPS 法による流動解析), 日本建築学会大会学術講演概要集(関東), pp.3-4,

2015.9, 東海大学, 神奈川県・平塚市
(7)上原義己, 山田義智, 崎原康平: 新たな材料分離モデルの提案およびMPS法による流動解析への適用, 第12回日本・韓国建築材料施工JOINT SYMPOSIUM, Vol.12, pp.279-282, 2015.7, 日本大学, 千葉県・習志野市

(8)Yoshiki UEHARA, Yoshitomo YAMADA, Kohei SAKIHARA, Shinji URANO: Proposal of a New Segregation Model and Application to Numerical Analysis Method, Proceedings of the 9th International Symposium between China, Korea and Japan on Performance Improvement of Concrete for Long Life Span Structure, Vol.9, pp.85-92, 2015.7, Harbin Institute of Technology, Harbin China

(9)崎原康平, 山田義智, 上原義己, 浦野真次: 振動下における見掛けのレオロジー定数変化に関する一考察, 第69回セメント技術大会講演要旨, Vol.69, pp.124-125, 2015.5, ホテルメトロポリタン東京池袋, 東京都・豊島区

(10)上原義己, 山田義智, 崎原康平, 浦野真次: MPS法によるフレッシュコンクリートの材料分離および振動伝搬解析, 日本建築学会九州支部研究報告, No.54, pp.109-112, 2015.3, 熊本大学, 熊本県・熊本市

(11)崎原康平, 山田義智, 上原義己, 清水峻, 赤嶺系織: MPS法によるフレッシュコンクリートの材料分離および振動伝搬解析, 日本建築学会大会(近畿)学術講演概要集, pp.531-532, 2014.9, 神戸大学, 兵庫県・神戸市

(12)清水峻, 山田義智, 崎原康平, 伊波咲子: セメント粒子の形状および粒度分布とペースト粘度に関する検討, 第68回セメント技術大会講演要旨, Vol.68, pp.106-107, 2014.5, ホテルメトロポリタン東京池袋, 東京都・豊島区

(13)上原義己, 山田義智, 崎原康平, 浦野真次: MPS法を用いたフレッシュコンクリートの間隙通過性に関する検討, 第68回セメント技術大会講演要旨, Vol.68, pp.112-113, 2014.5, ホテルメトロポリタン東京池袋, 東京都・豊島区

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等:

http://www.kankyo.tec.u-ryukyu.ac.jp/kenntiku/field_staff/field5.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 義智 (YAMADA YOSHITOMO)

琉球大学・工学部・教授

研究者番号: 80220416

(2)研究分担者

崎原 康平 (SAKIHARA KOHEI)

琉球大学・工学部・助教

研究者番号: 20647242