

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5月31日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360228

研究課題名（和文） 材料分離を考慮したコンクリートの生産・施工システムの構築

研究課題名（英文） Fundamental Study on Production and Construction Technology of Concrete Considering Material Segregation Resistance

研究代表者

李 柱国 (RI ZHUGUO)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：50432737

研究成果の概要（和文）：本研究では、合理的なコンクリートの設計・生産・施工システムを構築するための基礎研究として、フレッシュコンクリートの非破壊・統合的分離抵抗性評価試験法、振動打設したコンクリートの分離程度の推定方法および材料分離によるコンクリートの力学性能の不均一性の推定方法などを提案した。また、異なる程度に分離を生じたコンクリートの力学性能および耐久性を考察し、分離程度と各性能や性能の不均一性との関係を定量的に検討し、硬化コンクリートの性能に悪影響を与える分離限界を提案した。なお、フレッシュコンクリートを含水粒子集合体と見なし、理論解析によって静置状態のブリーディングモデルと粗骨材沈下分離モデルを構築した。

研究成果の概要（英文）：As a fundamental research for realizing rational design, production, and construction of concrete, in this study we proposed a non-destructive and integrated segregation resistance test method of fresh concrete, an estimating method of segregation degree of concrete placed by vibration, and the methods for estimating non-uniformities of compressive strength and Young's modulus of segregated concrete. Mechanical Properties, shrinkage, and durability of concretes with different segregation degrees were investigated, and the segregation limit was proposed following by discussing quantitatively the relationships between the segregation degree and the properties or their coefficients of variation. Also, on basis of considering fresh concrete to be a particle assembly with water, elapsed time-dependent bleeding and settlement of coarse aggregate of fresh concrete in standstill state were modeled by theoretical approaches.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

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：材料分離、評価試験法、分離限界、分離程度予測、性能不均一性、分離モデル

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の高性能化、高品質化、長寿命化が求められている現在、品質のよいコンクリートを確実に得るための設計・製造・施工技術の開発は重要な課題である。フレッシュコンクリートの材料分離は、主にブリーディングおよび粗骨材の分離である。多量のブリーディングが発生すると、水平鉄筋との付着力が低下し、水セメント比の不均一による力学性能の異方性が增大する。粗骨材の分離は、ジャンカなどの施工不具合をつくるおそれがある。ジャンカが生じなくても、粗骨材が偏在すると、粗骨材が少ない部分のコンクリートのヤング係数は小さくなり、収縮量は増大することが懸念される。過大な収縮率は、部材に耐久性上有害なひび割れが生ずる主要な原因である。そこで、構造物の形状寸法、配筋状態、打設方法などの条件に応じた適切な材料分離抵抗性を有するコンクリートを製造することが重要となる。このため、材料分離抵抗性の評価は、コンクリートの調(配)合設計および品質管理における重要な項目である。

現在、材料分離抵抗性の評価は、ブリーディングと粗骨材の分離抵抗性に分けて別々に行われている。ブリーディングの測定は、JIS A1123 試験方法に準じている。粗骨材の分離抵抗性の評価試験法は幾つか提案されたが、様々な問題があるため、国内外では粗骨材の分離抵抗性の評価試験法はまだ確立されておらず、材料分離抵抗性はほとんどの場合に定性的に表されている。そのため、分離抵抗性に対して、調合設計の際に目標値が設定できず、製造後の検査はほとんど目視で行い、曖昧な品質管理になっているのが現状である。そこで、物理的意味をもった数値で評価し、汎用性・統合性がある分離抵抗性の評価試験法を開発し、分離抵抗性の要求値を設定するのは急務な課題と考えられる。

フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性が高くても、打設後の分離程度は、鉄筋の配置密度、振動締固め時間および充填流動距離などの影響を受けて、過大な材料分離が発生するおそれがある。部材の構造条件と施工方法に応じてコンクリートに適切な分離抵抗性をもたせるべきである。そのため、実際の施工時に生じる分離程度の予測技術および部材の構造条件と施工方法を考慮した材料分離抵抗性の設定技術は必要である。

なお、前述したように、コンクリートに材料分離が発生すると、性能の不均一性をもたらす。打設したコンクリートの性能の不均一程度を予測する必要がある。

したがって、材料分離を考慮したコンクリート調(配)合設計、品質管理、施工管理および性能予測に関する一連の技術の開発は望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、上記の研究背景を踏まえて、材料分離を考慮したコンクリートの設計、品質管理、施工管理および性能予測などの一連技術を開発するためのものである。この研究によって、硬練りから高流動までのコンクリートに適用しうる非破壊型(骨材の洗い分析が不要)・統合型(ブリーディングと粗骨材分離を共に評価できる)の材料分離抵抗性評価試験法、振動打設時の分離抵抗性の評価試験法、振動打設したコンクリートの分離程度の予測法、および分離が発生したコンクリートの力学性能の不均一性の予測方法などを提案する。また、施工性、力学性能および耐久性に過大な悪影響を与えるコンクリートの分離限界を明らかにする。なお、フレッシュコンクリートの分離モデルを構築し、分離程度と経時変化を予測する技術を開発する。

3. 研究の方法

上記の研究目標を達成するために、本研究では、フレッシュコンクリート試料や硬化コンクリートの任意位置の密度を高精度で推定する実験装置を設計・製作した上で、実験的考察によって、フレッシュコンクリートの分離抵抗性、硬化後の分離程度の評価試験法および振動打設したコンクリートの分離程度の予測方法を開発した。また、振動時間を変えることによって、異なる分離程度を有させたコンクリートの力学性能と耐久性を測定し、過大な悪影響を生じない分離限度を検討した。なお、分離したコンクリートの各部位の密度の測定結果に基づいて、コンクリートの水セメント比と単位粗骨材量の分布を推定し、力学性能の分離による不均一性の予測方法を検討した。

一方、フレッシュコンクリートを含水粒子集合体と見なした上で、理論解析を行い、内部摩擦と粒子配列による粒子移動抵抗で支持できるせん断応力と垂直応力を考察し、過剰間隙水圧と固体粒子の受けるせん断応力およびその経時変化を考察することで、静置状態のブリーディング量と粗骨材沈降量の経時変化モデルを構築した。

4. 研究成果

(1) フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性評価試験法

本研究では、 γ 線密度計を用いて、フレッシュコンクリート試料の密度を精確に測定することによって材料分離抵抗性を評価する非破壊・統合型の方法提案した。実験装置は、図1に示すように、 γ 線源、 γ 線検出器、モータおよび制御・データ収録システムによって構成される。練混ぜた直後の試料を寸法が内径20cm×深さ30cmの塩ビ樹脂製容器に20cmの高さまで装入し、棒状パイプレーターで10秒振動した後、鉛直方向における7区

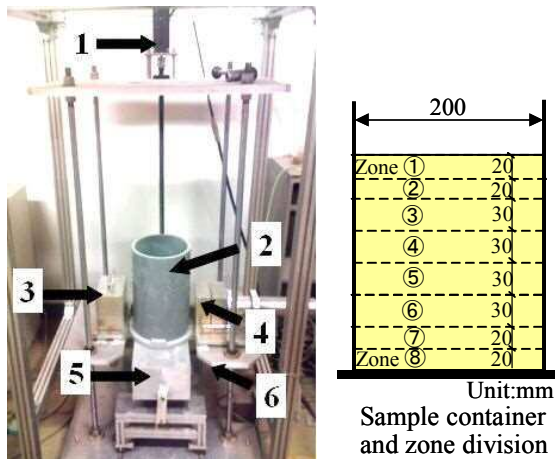


図1 γ 線によるコンクリートの密度推定装置:
(1)パルスモータ, (2)試料, (3) γ 線源, (4) γ 線検出器,
(5)試料や供試体台座, (6) γ 線密度計の昇降台座

域の密度を推定し、密度の変動係数（標準偏差と平均値の比）を分離指数とした。材料分離抵抗性は低いほど、分離指数は大きい。この方法は、非破壊試験で水の上昇分離と骨材の沈降分離を共に評価でき、硬練りコンクリートから高流動コンクリートまでの広範囲のコンクリートに適用し、動的分離抵抗性を評価できる。

(2) 振動打設時の分離抵抗性評価試験法

前述したように、振動打設したコンクリートの分離程度は部材の構造条件と施工条件に依存する。したがって、材料分離抵抗性の評価に用いられる円筒の代わりに、アクリル製のU型ボックスを用いて、振動打設時の分離抵抗性の評価方法を提案した。U型ボックスの左右室の境に鉄筋の流動障害物を設けた。部材の鋼材量が $100\sim 350\text{kg/m}^3$ の場合、3本の鉄筋（直径：13mm）の間隔は40mmである（タイプR1）が、 350kg/m^3 以上の場合、5本の鉄筋（直径10mm）の間隔を40mmとした（タイプR2）。

U型ボックスの左室にフレッシュコンクリートを600mm程度で充填した後、棒状パイプレーターを挿入し、左右室の間にあるゲートを引き上げてから、右室に30cm程度の充填高さまで左室のコンクリートに振動を加える。次に、左右室の下から30cmまでの範囲のコンクリートを8区域に分けて密度を推定し、密度の変動係数を求める。左室の変動係数を振動区域の分離指数、右室の変動係数を充填区域の分離指数とした。二つの分離指数の値は、材料自身の分離抵抗性に依存することが認められた。充填区域の分離指数と障害タイプR1を用いた場合の振動区域の分離指数は、材料分離抵抗性の低下に伴って、最初に減少するが、ある値に達すると、逆に増大する。しかし、障害タイプR2を用いた場合の振動区域の分離指数は、料分離抵抗性の低下に伴って直線的に低下する傾向が見ら

れた。R2に比べ、R1を用いたほうが振動打設時の分離抵抗性は高い。また、分離程度を大きく影響する加振時間は、試料の流動性に依存するため、振動打設時の分離抵抗性は試料の流動性の影響も受けることが認められた。この評価方法を用いると、振動打設時の分離抵抗性を簡便に把握できる。

(3) 振動打設したコンクリートのブリーディング量の予測

鉄筋コンクリート部材に鉄筋があるため、振動打設したコンクリートのブリーディング量は、JIS A1123 標準試験法による試験結果と同じではない。本研究では、JIS A1123 によるブリーディング量と上記のU型ボックスを用いた振動打設後のコンクリートのブリーディング量との関係を定量的に検討し、関係式が得られた。さらに、JIS A1123 法の試験結果に基づいた振動打設後のブリーディング量の推定方法を提案した。さらに、後述したブリーディング量と分離指数の関係を利用して、分離程度を推定した。

(4) 振動打設したコンクリートの分離程度の推定方法

振動打設したコンクリートの分離程度を推定するために、モデル振動打設実験を行う。まず、練混ぜた直後のコンクリートを、高流動コンクリートの充填性評価試験に一般的に使われるL型充填ボックス（鉄筋を代わりに、塩化ビニル樹脂棒をボックスの水平区域に配置した。配置量は実際の鉄筋コンクリートの鉄筋密度によって設定される）の垂直区域に45cmの高さまで装入し、棒状パイプレーターでL型ボックスの水平区域の充填高さが20cmになるまで加振する。次に、水平区域内の所定の5箇所における20cm高さの範囲を鉛直方向に7区域に分けて、各区域のコンクリートの密度を推定し、水平方向と鉛直方向の分離指数をそれぞれ計算する。また、密度の推定結果を基に、水平方向の材料分離を粗骨材の流動分離と、鉛直方向の分離を粗骨材の沈降分離と水上昇分離と近似的に見なして、流動充填区域の水セメント比と単位粗骨材量を求め、それぞれの2次元分布図を作成する。この分布図によって、打設したコンクリートの力学性能の不均一性を推定できる。

また、静置状態のフレッシュコンクリートの鉛直方向における各区域の密度を推定した上で、分離指数を求め、分離指数とブリーディング量の関係を検討した。さらに、鉛直方向の水セメント比の分布を推定し、ブリーディングに起因したフレッシュコンクリートの材料不均一性を明らかにした。

これらの方法を活用すれば、振動打設したコンクリートの分離状況およびその性能に与える影響を推定できると思われる。

(5) 硬化コンクリートの材料分離による力

学性能の不均一さの推定方法

本研究では、粗骨材量と水セメント比の影響を直接に考慮した西田静弾性係数モデルとフランスの Laboratoire Central des Ponts et Chaussées が提案した LCPC 圧縮強度モデルを利用して、分離を生じたコンクリートの水セメント比と単位粗骨材量の推定結果を基に、圧縮強度、静弾性係数およびそれらの標準偏差を計算し、力学性能の不均一性の推定技術を開発した。さらに、推定精度を検討した。実験結果に比べて、圧縮強度と静弾性係数の最大推定誤差はそれぞれ4%と20%である。静弾性係数の推定誤差が大きいのは、推定モデルの精度に限界があり、静弾性係数を高精度で測定しにくいためである。この技術を活用して、材料分離による圧縮強度の標準偏差のデータを蓄積し、調合強度の決定の際に材料分離の影響を考慮することによって、より正確なコンクリートの調合設計を行うことができると考えられる。

(6) コンクリートの分離限界

図-1 に示す装置を利用して、コンクリートの直径 10×高さ 20cm の円柱供試体および幅 10×高さ 10×長さ 40cm の乾燥収縮、促進中性化試験用角柱供試体の打込み方向に5区域の密度を推定し、密度の変動係数をコンクリートの分離程度とした。また、振動締固め時間を変えることによって、コンクリートに異なる分離程度を有させて、分離したコンクリートの圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数、および乾燥収縮・中性化抵抗性の不均一さを測定した。さらに、分離程度と上述の各性能の関係を定量的に考察した。得られた知見として、① 振動打設したコンクリートの乾燥収縮量は、鉛直方向においては部位によって異なる。部位別の大小順は、上部>中部>下部である。上部収縮ひずみの増加率の安定値は、約20%であるが、下部収縮ひずみの減少率の安定値は、調合によって異なり、20%以内である。コンクリートの分離指数が2%より大きいほど、上・中・下部の収縮ひずみの変動係数の絶対値は大きい。② 分離したコンクリートの中性化抵抗性は不均一である。中性化抵抗性の不均一程度（四面の促進中性化深さの変動係数）は、振動締固めの時間によって異なり、分離程度が大きいほど大きい。打設面の中性化抵抗が低い。③ 振動打設したコンクリートの凍結融解抵抗性を決定する空気量は、振動時間の増加に伴って減少し、振動時間が20sを超えると、3%の空気量を下回る。過量の振動締固めによる材料分離の程度は大きいほど、空量の減少率は直線的に増大する。④ 粗骨材分離が単独に発生しても、普通コンクリートの圧縮強度は粗骨材分離の影響をあまり受けないが、高強度コンクリートの場合、粗骨材の分離程度の増加に伴って小さくなる。しかし、分離程度が2.0%以

上になると、ヤング係数は小さくなる。また、分離程度が2.0%以上であれば、圧縮強度とヤング係数の変動係数は、分離程度の増加に伴って大きくなる。一方、ブリーディングと粗骨材の沈降分離が共に発生した場合、材料分離程度がある程度(2.0%)以上であれば、コンクリートの圧縮強度とヤング係数は、分離程度の増加に伴い低下し、両者の変動係数は大きくなる。強度レベルの低いコンクリートほど、力学性能が材料分離の影響を受けやすく、性能の低下とばらつきが多い。

以上の実験結果に基づいて、コンクリートの分離限界は2.0%であることを提案した。この分離限界は、コンクリートの調合設計、品質管理および施工管理の基礎になりうると思われる。

(7) 静置状態のブリーディングモデル

フレッシュコンクリートを含水粒子集合体とみなして、ブリーディングを、粒子配列（インターローキング）が粒子の自重を十分に支持できないことによって発生した過剰間隙水圧に起因するものと考え、粒子配列が自重を支持する能力に及ぼすセメント水和の影響を考慮し、自由水による実効間隙比の概念を導入することによってブリーディングモデルを提案した。まず、粒子配列およびセメントの水和生成物が支持できる重力と垂直圧力の経時変化について理論的考察を行い、静置状態の過剰間隙水圧の経時変化式を得た。

次に、Kozeny-Carman 透水係数式に基づき、フレッシュコンクリートに適用でき、自由水量を考慮した透水係数式を提案した。また、自由水量の求め方を提示した。

さらに、Darcy 則によって、静置状態におけるフレッシュコンクリートのブリーディング量の経時変化モデル式、最終ブリーディング量式、ブリーディング速度式をそれぞれ誘導して求めた。

なお、8シリーズのコンクリートを用いて、試料の高さ、垂直圧力、単位水量および水セメント比がブリーディング量に与える影響について実験的考察を行った。各時点のブリーディング量の計算値と測定値を比較することによって、提案したブリーディング量の経時変化モデルの妥当性を検討し、静置時間がおよそ1時間以降のブリーディング量をこのモデルで予測しうることを明らかにした。このモデルによって、非標準試験や現場施工の条件下のブリーディング量を推定することが可能である。

(8) 静置状態の粗骨材沈降分離モデル

フレッシュコンクリートを含水粒子集合体とみなして、外力による粒子の移動確率と移動挙動を検討し、実験的考察によってフレッシュコンクリートのせん断変形挙動を明らかにし、理論解析によってせん断変形状態

の力学構成式(応力(せん断応力、垂直応力)－せん断ひずみ－載荷持続時間の関係式)を求めた。

粒子配列が粒子の自重を十分に支持できないことによって発生した過剰間隙水圧は固体粒子に作用する。そのため、ブリーディングと粒子沈下は共に発生すると考えられる。粒子沈下に伴って粒子配列は強くなり、過剰間隙水圧は減少し、やがてゼロになる。粒子配列が支持できない荷重が粗骨材粒子に作用すると想定した上で、Ansley式を適用し、マトリックスモルタルのせん断変形状態の力学構成式によって、静置状態において、マトリックスモルタル中の粗骨材粒子の平均沈降距離の経時変化式および最終沈降量式が得られた。

さらに、ブリーディングが殆ど生じなく、高流動性を有した高強度コンクリートの鉛直方向における各区域の密度の静置時の経時変化をγ線密度計によって推定する実験を行って、粗骨材粒子沈降量経時変化式の妥当性を検証した。

上記の研究成果は、材料分離を考慮したコンクリートの調合設計、品質管理、施工管理および性能照査などを遂行するための基礎技術となり、コンクリート生産・施工技術の合理化に貢献できるものと考えられる。

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8件)

- ① Z. Li, and Z. Wang: Non-uniformity of fresh concrete resulting from bleeding, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, 2013. 7 (採用印刷中)
- ② 李柱国: フレッシュコンクリートのレオロジー的性状に関する理論的研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 78, No. 687, pp. 895-904, 2013. 5
- ③ 李柱国: 静置状態におけるフレッシュコンクリートのブリーディングモデルに関する理論的研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 77, No. 679, pp. 1357-1366, 2012. 9
- ④ 李柱国・谷川恭雄: モデル材料の内部可視化実験に基づくフレッシュコンクリートの粒状体性質に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 77, No. 678, pp. 1175-1184, 2012. 8
- ⑤ 李柱国・流田靖博・王志堅・谷川恭雄: 振動打設したコンクリートの乾燥収縮の不均一性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, pp. 472-477, 2012. 7
- ⑥ Z. Wang, Z. Li, and Q. Li: An

experimental study on estimating method of bleeding capacity of vibration-placed fresh concrete, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, pp. 1192-1197, 2012. 7

- ⑦ 李柱国・李潔勇: フレッシュコンクリートのせん断変形特に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 75, No. 653, pp. 1173-1180, 2010. 7
- ⑧ 張文博・李柱国: 振動打設したコンクリートの分離および充填性に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 32, No. 1, pp. 1193-1198, 2010. 7

[学会発表] (計14件)

- ① 李柱国・吉村貢: コンクリートの材料分離限界に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013. 9. 1, (印刷中), 北海道大学(北海道).
- ② Z. Li: Effect of segregation on test results of mechanical properties of concrete, *Proc. of 7th Conference of International Structural Engineering and Construction Society*, 査読有, 2013. 6. 20 (採用印刷中), Honolulu (USA).
- ③ 李柱国・内藤賢哉: 材料分離によるコンクリートの中酸化抵抗性の不均一さに関する研究, 第67回セメント技術大会講演要旨, pp. 29-30, 2013. 5. 14, ホテルメトロポリタン(東京都)
- ④ 内藤賢哉・李柱国・流田靖博・杉原大祐: 硬化コンクリートの性能に与える材料分離の影響に関する実験的考察, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 36, pp. 29-32, 2013. 3. 3, 岡山理科大学(岡山市)
- ⑤ 四枝拓也・李柱国・流田靖博・岡村憲二: コンクリートの力学性能に及ぼす材料分離の影響に関する実験的考察, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 36, pp. 25-28, 2013. 3. 3, 岡山理科大学(岡山市)
- ⑥ Z. Li, and Z. Wang: Experimental study on uniformity of fresh concrete resulting from bleeding, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 36, pp. 21-24, 2013. 3. 3, 岡山理科大学(岡山市)
- ⑦ 李柱国・吉村貢・谷川恭雄: フレッシュコンクリートの振動打設時の分離抵抗性評価法に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 223-224, 2012. 9. 12, 名古屋大学(名古屋市)
- ⑧ 李慶濤・王志堅・李柱国: 振動打設したコンクリートのブリーディング量の予

測方法に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 35, pp.114. 1-4, 2012. 3. 4, 広島工業大学 (広島市)

- ⑨. 李柱国・内藤賢哉・流田靖博・杉原大祐: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす材料分離の影響に関する実験的考察, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 35, pp.115. 1-4, 2012. 3. 4, 広島工業大学 (広島市)
- ⑩. 森山望・李柱国: フレッシュコンクリートの振動打設時の分離抵抗性評価法に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 35, pp.116. 1-4, 2012. 3. 4, 広島工業大学 (広島市)
- ⑪. 李潔勇・李柱国: フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼす細骨材の粒形の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.415-416, 2011. 8. 23, 早稲田大学 (東京都)
- ⑫. 李柱国・李潔勇: モデル材料の内部可視化実験によるフレッシュコンクリートの粒子配列に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 407-408, 2011. 8. 23, 早稲田大学 (東京都)
- ⑬. Z. Li, and J. Li: Granular material characteristic of fresh concrete, Proc. of 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 査読有, pp.423-433, 2010. 9. 26, Montreal (Canada)
- ⑭. 李柱国・吉村貢: フレッシュコンクリートの分離抵抗性の非破壊型評価試験法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.597-598, 2010. 9. 10, 富山大学(富山市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

李 柱国 (LI ZHUGUO)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 50432737

(2)研究分担者

谷川 恭雄 (TANIGAWA YASUO)

名城大学・理工学部・教授 (2010年)

研究者番号: 70023182

松尾 栄治 (MATSUO EIJI)

山口大学・大学院理工学研究科・助教
(2010-2011年)

九州産業大学・工学部都市基盤デザイン工学科・准教授 (2012年)

研究者番号: 10284267