

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18191

研究課題名(和文) コンクリートの充填不良リスクの定量的予測とその展開

研究課題名(英文) Estimation of the risk of defective concrete filling and the expansion

研究代表者

陶山 裕樹 (Suyama, Hiroki)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：20507876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリートの充填不良の発生モデルとして、型枠内を自由落下するコンクリートからモルタル成分が鉄筋に付着して逸失し、粗骨材過多となったコンクリートが型枠底部を先行して充填するモデルを提案した。同モデルに基づいて、型枠を通過するコンクリートの調合、流量および配筋条件が、鉄筋によって逸失するモルタル成分の量に与える影響を実験によって明らかにした。また、一度粗骨材過多となったコンクリートの充填不良のリスクを解消するために必要な振動エネルギーについても考察を行った。得られた実験結果を基に、壁工事のケーススタディを通じて、コンクリートの充填不良のリスクを定量的に予測する手法を示した。

研究成果の概要(英文)：As a model for defective filling, I propose a mortar loss model in which the mortar component of concrete falling freely down into a frame is considered to adhere to rebar inside the frame. Concrete arriving at the bottom of the frame thus contains an excess amount of coarse aggregate, a situation considered prone to defective filling. Under the mortar loss model, I clarified the effect of concrete mix proportion, concrete flow quantity and rebar arrangement on the amount the mortar loss through the experiments. I considered the vibrational energy to eliminate the risk of defective filling on the concrete containing an excess amount of coarse aggregate. Finally, I apply my measurements to a wall construction case study and, within it, estimate the risk of defective concrete filling.

研究分野：建築材料・施工

キーワード：コンクリート工事 充填不良 ジャンカ モルタル逸失モデル

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の耐久性は、施工中の不具合によって容易に損なわれる。JCI コンクリート基本技術調査委員会不具合補修 WG 報告書（2012 年）に、主要な施工中の不具合として、ひび割れをはじめとした 11 項目が列挙されている。なかでもコンクリートの充填不良は、今なお頻繁に発生している問題であり、コンクリート構造物の耐久性を失わせる因子のひとつとして知られている。

JCI コンクリート施工におけるリスク要因の発生確率調査研究委員会（2008 年）に、中高層 RC 集合住宅における充填不良の発生率が 39%に達し、未然防止率が 3%に過ぎないことが報告されている。コンクリートの充填不良に対する現場技術者の不安も大きく、AIJ 関東支部コンクリートの施工性の現状に関する調査 WG（2011 年）によると、ジャンカに対する不安が 2 位、充填不良に対する不安が 3 位に挙げられている（ジャンカは広義の充填不良に含まれる；ひび割れに対する不安が 1 位）。ひび割れ防止を目的とした研究が古くから盛んに行われていることと比較して、充填不良に関する学術的知見は限定的といえる。建設会社は、充填不良の防止策として各社で独自のガイドラインを設けているが、統一の見解は存在しない。充填不良への対策は、概して個々の現場作業員の経験に裏付けされた技能に委ねられているようである。

2. 研究の目的

建築工事におけるコンクリートの充填不良の発生率は、土木工事と比較して顕著に高い。このことから、建築工事特有の過密な配筋が、充填不良の主要因と考えられる。現在、鉄筋を要因とした材料分離のモデルとして、鉄筋の隙間を粗骨材が閉塞するモデルが提案されている。しかしながら、従来モデルでは壁部材の充填不良の発生頻度が顕著に高いこと（全体の 75%を占めることが報告されている）を説明できない。よって、壁部材に生じる充填不良を想定したモデルを用意する必要がある。壁部材のコンクリート工事では、トレミー管が型枠の底部まで届かず、上部からコンクリートを落とし込まざるを得ない。このことが、充填不良の発生率を高めていると考えられる。本研究では、新たな充填不良のモデルとして、型枠内を自由落下するコンクリートからモルタル成分が鉄筋に付着して逸失し、粗骨材過多となったコンクリートが型枠底部を先行して充填するモデル（モルタル逸失モデル、図 1）を提案する。モルタル逸失モデルを用いることで、壁部材等に生じる充填不良が解析可能となると考えられる。

本研究の目的は、上述のモルタル逸失モデルに基づいてコンクリートの充填不良の発生リスクを定量的に予測する手法を開発することである。実施工において、コンクリートの打込み前に充填不良の発生リスクを明確にすることで、費用対効果に配慮した効率的な対

策が可能になると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 逸失モルタル量の測定方法

前述のモルタル逸失モデルに基づいて、コンクリートの打込み時に鉄筋に付着するモルタル成分の量（以下、逸失モルタル量）の測定実験を行った。実験では、配筋された型枠中にコンクリートを通過させ、鉄筋に付着した逸失モルタルの質量を測定した。型枠には底板を設けず、投入したコンクリートが、逸失モルタルを残して底から排出されるようにした。型枠へのコンクリートの投入には、鉄筋の上端から 200mm の高さから固定した逆さのスランブコーンを用いた。予めスランブコーンの底部（直径 100mm）をせき板で塞ぎ、5L のコンクリートをスランブコーンに流し込んだ後、せき板を外して一気に型枠内にコンクリートを自由落下させた。この作業を繰り返し、計 20~30L のコンクリートが型枠を通過するまで繰り返した。なお、流動性の経時変化に配慮し、測定に供するコンクリートは注水後 2 時間までとした。実験状況を写真 1 に示す。

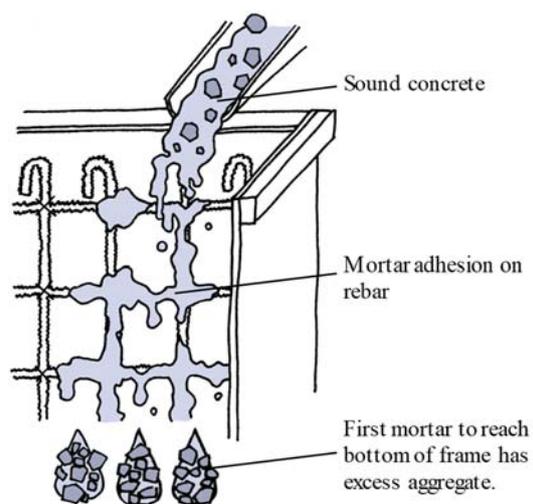


図 1 モルタル逸失モデルによる充填不良の説明



写真 1 逸失モルタル量の測定

実験 A では、型枠を通過するコンクリートの調合（低スランプ、普通スランプ、中流動および高流動タイプ）、コンクリートの流量（5～30L）および鉄筋径（D13、D16、D25 および D32）を因子とした。実際の躯体には、横筋、縦筋および両者の交差部が現れることから、横筋 1 本のみを配筋した型枠、縦筋 1 本のみを配筋した型枠、横筋と縦筋を 2 本ずつ配筋して 4 つの交差部を作った型枠を用いて実験を行った。

実験 B では、鉄筋の位置と間隔が逸失モルタル量に与える影響を明らかにするため、別途、鉄筋の配筋パターンを実験因子に加えた。横筋のみを対象とした実験では、横筋 9 本を鉛直方向に平行に配筋し、鉄筋間隔を 100、150、200mm に設定した型枠を用いた。同様に縦筋のみを対象とした実験では、縦筋 1 本の長さをそれぞれ 200、450、900、1,800mm とした型枠を用いた。

(2) 充填不良の境界条件の検討方法

モルタル逸失モデルでは、型枠底部に到達したコンクリートが十分なモルタル成分を残していないとき、充填不良のリスクが発生すると考える。本報告書では、鉄筋によってモルタル成分を逸失し、充填不良を起こす可能性を持ったコンクリートの状態をポーラス状態と称す。コンクリート工事では鉄筋によってポーラス状態となったコンクリートが型枠底部に先行して落とし込まれ、その上部に比較的健全なコンクリートが落とし込まれる。ポーラス状態のコンクリートの空隙には、上部の比較的健全なコンクリートから、モルタル成分が重力および振動締固めによって供給される。このときにモルタル成分が供給されなかった空隙が、硬化後に充填不良として現れることとなる。本節では、一度ポーラス状態となったコンクリートが、振動締固めを受けて充填不良のリスクが解消される現象について実験検討した。実験では、二層のコンクリートを対象とした締固め性試験を行い、充填不良のリスクを解消するために必要な振動エネルギーについて考察を行った。

締固め性試験のベースは土木学会基準の超硬練りコンクリートの締固め性試験方法（JSCE-F 508-2007）とした。試験に用いた装置の写真 2 に示す。装置は振動台、容器、上載板、変位計、加速度計およびデータロガーから構成される。振動台にはセメント強さ試験（JIS R 5201: 2015）用のものを用いた。振動台の主な振動方向は鉛直方向であり、容器に試料を詰めた状態で 3.5G 以上の最大加速度および約 60Hz の振動数を示すことを確認した。容器は、151mm の内径および 340mm の内高を有する。STK400 の円形鋼管を旋盤加工した筒に、底板として SS400 の鋼板を溶接して作成した。上載板は SS400 の鋼板を加工した 149mm の直径および 19.6mm の厚さを有する円板に、容器に固定された腕で支持された滑り棒を取り付けたものとした。上載板の全質量は 2.8kg であった。変位計はワイヤー式

の巻込型変位計（容量 500mm）とし、天井から吊り下げられた鋼板にマグネット治具を用いて固定した。ゲージ端子となるワイヤーを上載板と繋がった滑り棒に固定し、上載板が容器中で鉛直方向に沈んだ深さを測定した。容量 50G の 2 個の加速度計を、容器を挟んで振動台の天板に取り付け、試料に与えられた振動の加速度を測定した。変位計および加速度計の測定データを動ひずみ測定型のデータロガーに出力し、0.002 秒の間隔で測定データを記録した。測定手順は下記の通りとした。

- ① ポーラス状態を想定して作成したコンクリート（下層の試料）を容器に定められた高さまで落とし込み、試料上面をほぼ平らとなるよう均す。実施工を想定し、突き棒を用いた締固めは施さなかった。
- ② 健全なコンクリート（上層の試料）を試料容器に定められた高さまで落とし込み、下層と同様に試料上面を均す。
- ③ 種類の試料を詰めた試料容器を振動台に固定し、上載板を試料上面に載せる。データ処理系を起動し、この時点での加速度を 0、上載板の鉛直方向の変位を 0 とする。
- ④ 振動台の電源を投入して機械振動系を駆動させる。

任意の締固め時間における締固めエネルギー E (J/kg) は、式 (1) によって計算した。

$$E = \frac{\alpha_{max}^2 t}{(2\pi)^2 f} \quad (1)$$

ここに、 α_{max} : 振動の最大加速度 (m/s^2)、 t : 振動時間 (s)、 f : 振動数 (s^{-1})。

試料として用いた健全なコンクリートの調合は前節と同じとした。これに対し、単位粗骨材かさ容積を 100% としたポーラス状態の調合を設定した。同調合のコンクリートは、一部のモルタル成分が粗骨材に付着して流動しないため、単独で粗骨材の隙間をモルタル成分が充填できない。

(3) 充填不良予測のケーススタディ方法

鉄筋コンクリート建築物の壁工事を想定し、コンクリートを打込む際に生じる充填不良の

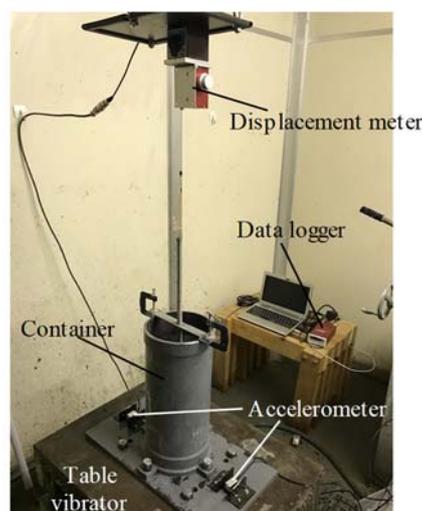


写真 2 締固め性試験に用いた装置

リスクを、モルタル逸失モデルに基づき実験データを用いて予測した。検討対象となる壁工事の配筋条件は、縦筋・横筋ともに 100mm もしくは 200mm 間隔としたダブル配筋とした。壁の高さは 3,600mm、厚さは 200mm とした。

4. 研究成果

(1) 逸失モルタル量の測定結果

実験 A における逸失モルタル量の測定結果を図 2~4 に示す。横筋および縦筋による逸失モルタル量は、コンクリートの調合によって変動するものの、コンクリートの流量の平方根と鉄筋の周長の積と比例関係にあった。図 4 における鉄筋の交差部による逸失モルタル量の変化には、交差部を設けた鉄筋に付着したモルタル成分の質量の測定値から、横筋および縦筋に付着したと推定される値を減じて導出された交差部ひとつあたりの変化量を示した。変化量が負のとき、横筋が傘となって下の縦筋に付着したモルタル成分を減少させる効果が卓越し、変化量が正のとき、横筋が受け皿となって上の縦筋に付着したモルタル成分を増加させる効果が卓越したと解釈される。鉄筋の交差部による逸失モルタル量の変化は、コンクリートの調合による影響を大きく受けず、横筋と縦筋による逸失モルタル量の和の平方根に、縦筋の直径と横筋の直径の積を乗じた値を変数とした一次関数で近似された。

実験 B の結果得られた横筋の高さ位置および間隔が逸失モルタル量に与える影響を図 5 に示す。逸失モルタル量は、最上部から 2~3 本目の横筋において最も大きくなり、3~4 本目の横筋から下に配された横筋によるものほど小さくなった。上に配された横筋が傘の役割を果たすため、基本的に下に配置された横筋ほど逸失モルタル量が減少すると考えられる。例外的に、打込み時に最上部の横筋に最も勢いよくコンクリートが当たるため、一部のモルタル成分が剥落し、最上部の横筋による逸失モルタル量は、2~3 本目より小さくなったと考えられる。下部に配された横筋による逸失モルタル量は、一定値に収束する傾向を示した。このとき、横筋の間隔が広いほど大きい値に収束し、間隔が狭いほど小さい値に収束した。横筋の間隔が広いほど、上に配された横筋が傘の役割を果たす効果が小さくなると考えられる。

縦筋の上端からの距離と逸失モルタル量との関係を図 6 に示す。縦筋の上端から 0~200mm の範囲に、モルタル成分が最も付着した。その他の範囲による逸失モルタル量は、上端から 0~200mm の範囲に対して 4 割弱であった。

(2) 充填不良の境界条件の検討結果

二層のコンクリートを対象とした締固め性試験の結果を図 7 に示す。下層にポーラス状態のコンクリートがあるとき、充填に必要な締固めエネルギーは、健全なコンクリートを単独で充填する場合と比較して顕著に大きく

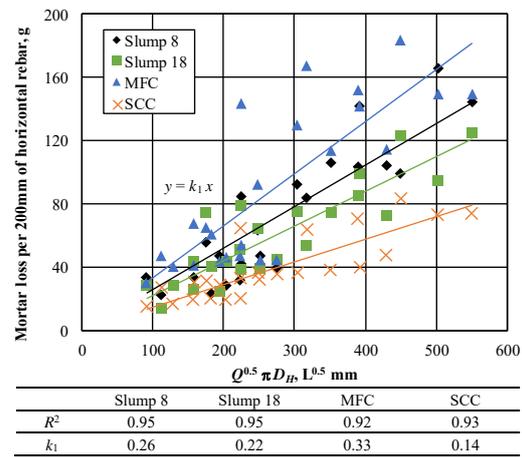


図 2 横筋による逸失モルタル量

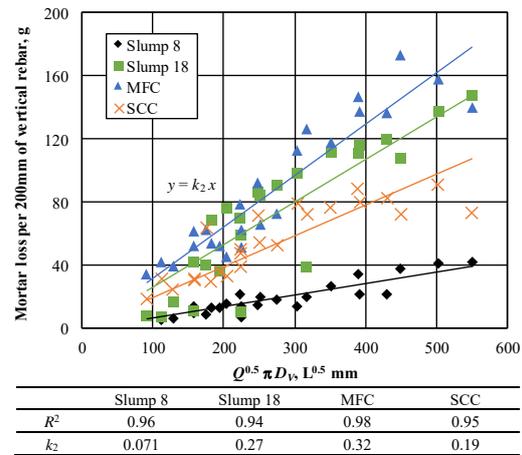


図 3 縦筋による逸失モルタル量

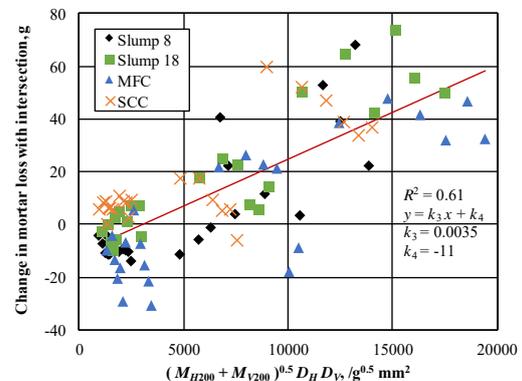


図 4 鉄筋の交差部による逸失モルタル量の変化

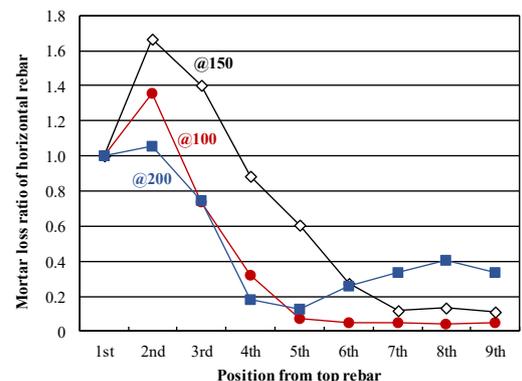


図 5 横筋の位置・間隔が逸失モルタル量に与える影響

なった。充填に必要な締固めエネルギーは、下層のポーラス状態のコンクリートの高さが大きいほど増加する傾向にあった。実施工で投入可能な締固めエネルギーを鑑みると、ポーラス状態が一旦できてしまった場合、振動締固めによって解消することが困難であることが示唆される。一方、コンクリートの調合が、充填に必要な締固めエネルギーに与える影響は認められなかった。一般に高流動コンクリートは、充填不良を起こしにくいとされている。その理由は、今回の実験結果から、高流動コンクリートは鉄筋による逸失モルタル量が比較的少なく、調合上モルタル成分が多く含まれるためであり、一旦ポーラス状態となった場合、振動締固めによって充填不良を解消することは、高流動コンクリートであっても普通コンクリートと同様に困難であると考えられる。

(3) 充填不良予測のケーススタディ結果

配筋された壁型枠内に打ち込まれたコンクリートの逸失モルタル量を、式 (2) を用いて推定した。

$$M = \sum \frac{M_{H200}L_H}{200} \gamma_{Hi} + \sum \frac{M_{V200}L_V}{200} \gamma_{Vi} + \sum M_I \quad (2)$$

ここに、 M : 逸失モルタル量の総量 (g)、 M_{H200} : 横筋 200mm あたりの逸失モルタル量 (g)、 γ_{Hi} : 同補正係数、 L_H : 横筋の長さ (mm)、 M_{V200} : 縦筋 200mm あたりの逸失モルタル量 (g)、 γ_{Vi} : 同補正係数、 L_V : 縦筋の長さ (mm)、 M_I : 交差部による逸失モルタル量の変動 (g)。

第 1 節の実験結果から、 M_{H200} 、 M_{V200} および M_I は、式 (3) ~ (5) を用いて導出した。

$$M_{H200} = k_1 \sqrt{Q} \pi D_H \quad (3)$$

$$M_{V200} = k_2 \sqrt{Q} \pi D_V \quad (4)$$

$$M_I = k_3 \sqrt{M_{H200} \gamma_{Hi} + M_{V200} \gamma_{Vi}} D_H D_V + k_4 \quad (5)$$

ここに、 Q : コンクリートの流量 (L)、 D_H : 横筋の直径 (mm)、 D_V : 縦筋の直径 (mm)、 k_1 、 k_2 : 定数 (g/L^{0.5}mm)、 k_3 : 定数 (g^{0.5}/mm²)、 k_4 : 定数 (g)。

γ_{Hi} には表 1 の値を、 γ_{Vi} には上端から 0-200mm の距離で 1.00、上端から 200mm 以上の距離で 0.38 を、 $k_1 \sim k_4$ には図 2~4 中の値を代入した。

型枠底部に到達するコンクリートの単位粗骨材かさ容積 G_{BV} (m³/m³) を、推定された逸失モルタル量 M (g) および式 (6) を用いて導出した。

$$G_{BV} = \frac{G_V + \frac{\Delta M}{\Delta Q} \frac{1}{\rho}}{G_{lim}} * 10^{-3} \quad (6)$$

ここに、 G_V : 健全なコンクリートにおける粗骨材の絶対容積 (L/m³)、 ρ : モルタル成分の密度 (kg/L)、 G_{lim} : 粗骨材の実積率 (m³/m³)。

モルタル成分が付着する鉄筋の水平距離は 200mm と仮定した。型枠底部に到達した成分の

安息角には、充填不良が懸念される箇所が流動性を失っていると考えられることから、碎石の値 (45°) を用いた。単位粗骨材かさ容積が限界値 (0.76m³/m³) を超過したとき、充填不良のリスク有と判断した。

算定結果を図 8 示す。充填不良のリスクは、密な配筋の方が、上層まで生じることが推定された。この結果には、縦筋の間隔を 2 倍にすることで、縦筋による逸失モルタル量が約半分になったことが大きく影響した。一方、横筋の間隔が 2 倍になっても横筋による逸失モルタル量は殆ど変化しなかった。このこと

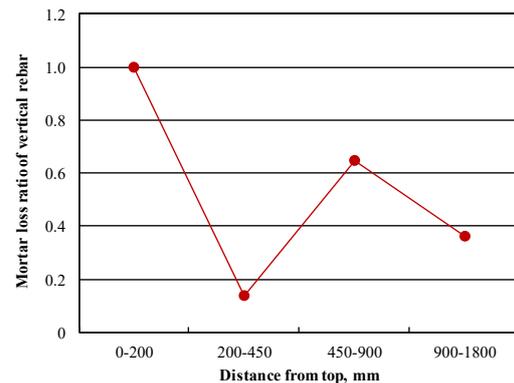


図 6 縦筋の位置が逸失モルタル量に与える影響

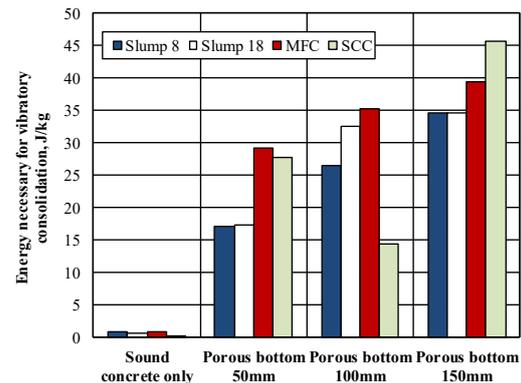


図 7 コンクリートの締固めに必要な振動エネルギー

表 1 補正係数 γ_H

Interval	Position from top rebar				
	1st	2nd	3rd	4th	5th, Under
100mm	1.00	1.35	0.74	0.32	0.05
200mm	1.00	1.05	0.74	0.27	0.27

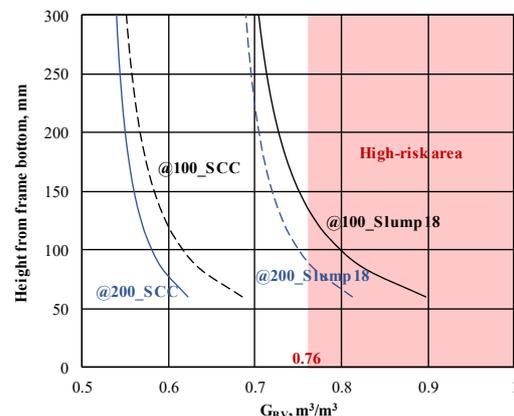


図 8 充填不良リスクのケーススタディ

から、モルタル逸失モデルにおいて充填不良リスクを低減するためには、横筋より縦筋を減らす効果の方が高いことが示唆される。また、高流動コンクリートは、標準スランプのコンクリートと比較して、充填不良が予想される層が下層に留まり、充填不良のリスクが低減されていることが推定された。この結果には、高流動コンクリートの単位粗骨材量が調合上小さかったことが顕著に影響した。充填不良を防ぐためには、単位粗骨材量の制限が重要であると示唆される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① 奥裕照, 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘: コンクリートの充填不良リスクの定量化に関する研究 その3配筋条件が逸失モルタル量に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 査読無, 材料施工, 掲載頁未定, 2018年
- ② 奥裕照, 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘: モルタル逸失モデルに基づくコンクリートの充填不良の予測に関する研究 鉄筋の位置と間隔による影響, 日本建築学会九州支部研究報告, 査読無, 第57号・1〔構造系〕, pp. 21-24, 2018年
- ③ 奥裕照, 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘: コンクリートの充填不良リスクの定量化に関する研究 その2コンクリートの流動性・流量および鉄筋径が逸失モルタル量に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 査読無, 材料施工, pp. 485-486, 2017年
- ④ 豊島健史, 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘: コンクリートの充填不良制御に関する研究 モルタルを逸失した成分の締固めに必要な振動エネルギーの検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 査読無, 第56号・1〔構造系〕, pp. 157-160, 2017年
- ⑤ 豊島健史, 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘: コンクリートの充填不良リスクの定量化に関する研究その1モルタル逸失モデルの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 査読無, 材料施工, pp. 791-792, 2016年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陶山裕樹 (SUYAMA HIROKI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号: 20507876