



# フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性および振動 打設後の分離程度の評価方法に関する研究

李 柱国\*1・時枝 健太\*2・吉村 貢\*3

## 1. はじめに

コンクリート構造物の高性能化や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。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由による性能の異方性が増大する。一方、粗骨材の分離が生じると、フレッシュコンクリートの充填性が低下し、鉄筋間やポンプ配管内においては閉塞が発生し、粗骨材が少ない部分のヤング係数が小さくなり、乾燥収縮が増大することが懸念される<sup>1,2,3</sup>。自己充填コンクリートの場合に、粗骨材の分離が発生すると、フレッシュコンクリートの間隙通過性が低くなり、自己充填ができなくなる。そこで、構造物の形状、寸法、配筋状況、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。

フレッシュコンクリートの材料分離は、静置状態では自重による静的分離と、打込み時の外力（例えば、振動、ポンプ圧送、落下、境界面摩擦など）に起因する動的分離に分けられる<sup>4</sup>。現在、材料分離抵抗性の評価は、水の分離抵抗性（ブリーディング）と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日本ではJIS A 1123に規定された試験方法に準じている。しかし、骨材の分離抵抗性の評価は、スランブ試験時にスランピングした試料の粗骨材分布を目視観察することによって定性的に行う。近年、高流動コンクリートの実用化につれて、粗骨材の分離抵抗性の評価は重要視され、鉄筋障害付きLフロー試験<sup>5,6</sup>および加振BARフロー試験<sup>7</sup>などの評価試験法が提案されている。これらの試験法は、粗骨材の洗い試験が必要であるため、手間がかかり、試験者による個人差が生じる。また、試験後に試料が残らないため、同一の試料で硬化後のコンクリートの性能が評価できない。したがって、水の上昇分離（ブリーディング）と骨材分離を共に評価する統合・非破壊型分離抵抗性試験法の開発は急務な課題である。

一方、振動打設したコンクリートの分離程度は、コンクリートの固有の材料分離抵抗性だけではなく、部材の鉄筋量、締固め方法および振動時間などに依存する

と考えられる。部材の構造と施工条件を考慮して振動打設したコンクリートの分離程度を評価する技術の開発が望まれている。

上記の背景を踏まえて、本研究では、硬練りから高流動までの広範囲のフレッシュコンクリートに適用できる材料分離抵抗性の統合的・非破壊型評価試験法を提案し、振動打設したコンクリートの分離程度の評価手法を開発する。

表1  $\gamma$ 線密度計の仕様

|      |                           |
|------|---------------------------|
| 品名   | 特殊RI密度計                   |
| 型式   | SRD-SC                    |
| 検出器  | Nal(Tl)シンチレーションカウンター      |
| 放射線源 | $^{60}\text{Co}$ 3.7MBq×3 |
| 検出窓  | 高さ20mm×幅50mm              |

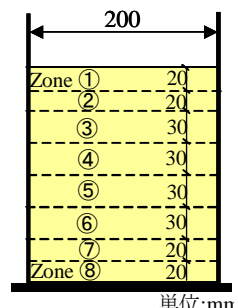
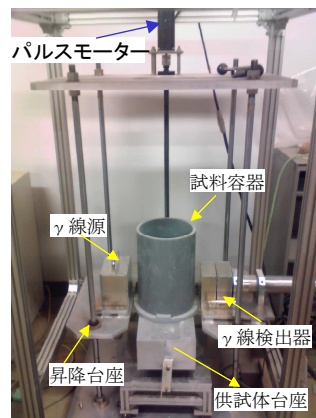


図1 分離程度の評価試験装置 図2 試料層の分け方

\*1 山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系専攻 准教授, 博士(工学)

\*2 山口大学工学部 感性デザイン工学科

\*3 ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 技術部

## 2. フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性の試験方法

### 2.1 原理と実験装置

図1に、材料分離抵抗性評価試験装置を示す。この装置は、試料容器(塩化ビニル製円筒)、 $\gamma$ 線密度計、密度計の昇降台、パルスモーター、モーター制御システムおよびパソコンによって構成されている。用いた $\gamma$ 線密度計の仕様を表1に示す。

昇降台座に固定された密度計をパルスモーターによって昇降させる。

密度計の昇降とガンマ線の検出と記

録はプログラム化され、パソコンで行われる。容器に詰めたフレッシュコンクリート試料に水の上昇と骨材の沈下が発生すると、試料の密度は上下部

位で同じではなくなる。密度の大きい部位は $\gamma$ 線を多く吸収するため、粗骨材が多い下部では $\gamma$ 線検出量が少なくなる。この原理を利用して、各層を通過した $\gamma$ 線量を検出し、試料分離後の密度の不均一性を把握することによって、分離抵抗性を定量的に評価する。材料分離抵抗性試験に使われる試料円筒の寸法は、内径20cm×深さ30cmであるが、試料の高さは20cmとした。試料を図2に示すように8層に分けて各層の密度を推定する。密度の変動係数を材料分離抵抗性とし、材料分離抵抗性指数と呼ぶことにした。材料分離抵抗性指数の計算式を式(1)に示す。材料分離抵抗性指数が大きいほど、試料の分離程度は大きく、材料分離抵抗性は低い。

$$SRI = \frac{1}{\rho_m} \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\rho_i - \rho_m)^2} \times 100\% \quad (1)$$

ここに、SRI:材料分離抵抗性指数、 $\rho_i$ :各層の推定密度( $i=1, 2, \dots, 8$ ),

$\rho_m$ :8層の平均密度

### 2.2 試料密度の推定式

$\gamma$ 線検出ユニットが収集した $\gamma$ 線数は、透過した試料と容器壁の材質に依存する。また、 $\gamma$ 線は試料の上表面から逸脱し、周辺の床、壁および設備に反射されるため、同じ容器と試料であっても測定部位によって $\gamma$ 線カウントは異なる。そのため、水および4枚の鉄板(寸法:厚さ9×幅191×高さ200mm)の4種類の材料組合で較正試験を行った。層ごとにその中間位置で120秒間通過した $\gamma$ 線量を測定した後に、1秒間に各層の試料を透過した $\gamma$ 線量の平均値を計算して、各層試料の密度推定式を表2に示すように求めた。

### 2.3 密度の推定精度

密度が1.10g/cm<sup>3</sup>の塩水の8層を通過した $\gamma$ 線量を測定し、前述した密度の推定式によって各層の密度を推定した。密度の推定値と実際値の差を図3に示す。同図により、密度の推定誤差は、3.0%以内である。

表2 各層試料密度の推定式(円筒容器の場合)

| 試料層の範囲(mm) | 密度推定式                               | 決定係数(R <sup>2</sup> ) |
|------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 1: 180~200 | $\rho_1=(\ln R_\rho-1.865)/-0.5745$ | 0.9986                |
| 2: 160~180 | $\rho_2=(\ln R_\rho-1.956)/-0.6209$ | 0.9983                |
| 3: 130~160 | $\rho_3=(\ln R_\rho-1.985)/-0.6112$ | 0.997                 |
| 4: 100~130 | $\rho_4=(\ln R_\rho-1.983)/-0.6039$ | 0.9968                |
| 5: 70~100  | $\rho_5=(\ln R_\rho-1.991)/-0.6085$ | 0.998                 |
| 6: 40~70   | $\rho_6=(\ln R_\rho-1.983)/-0.6009$ | 0.9972                |
| 7: 20~40   | $\rho_7=(\ln R_\rho-1.981)/-0.5989$ | 0.9969                |
| 8: 0~20    | $\rho_8=(\ln R_\rho-1.904)/-0.542$  | 0.9977                |

注)  $R_\rho=(\text{検出した}\gamma\text{線量}-\text{バックグラウンド}\gamma\text{線量})/\text{標準}\gamma\text{線カウント}$

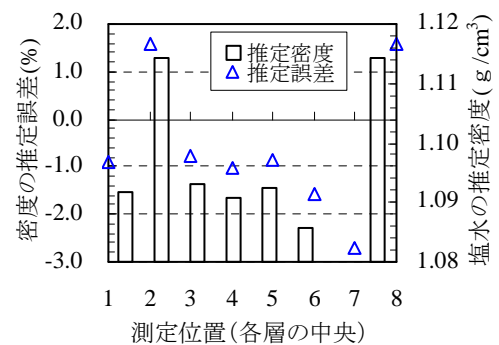


図3 塩水密度の推定誤差

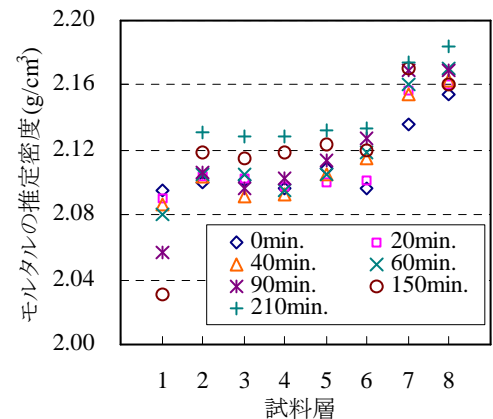


図4 モルタルの各層の密度の経時変化

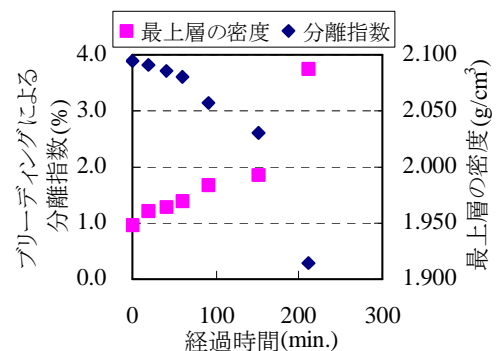


図5 ブリーディングによるモルタルの最上層の密度

また、この材料分離抵抗性評価試験法は、ブリーディングによる分離を評価できるかどうかを検証するために、フレッシュモルタル(配合は表3参照)の静置状態における各層の密度を推定した。推定密度の経時変化を図4に示す。同図によれば、1層目の密度は時間に伴って小さくなったが、7層目と8層目の密度は時間と共に増加する傾向が見られた。これは、ブリーディングが発生して、上部の単位水量が増加する一方、下部の水量が減少したためである。

ブリーディングによるモルタルの分離指数および最上層(1層目)の密度の経時変化を図5に示す。静置時間の増加に伴って、最上層の密度が減少し、分離指数は増大した。

既報<sup>8)</sup>では、提案した材料分離抵抗性評価試験法を用いて、フレッシュモルタルとコンクリートにそれぞれ0s, 10s, 30s間の振動を加えた後、静置状態におけるブリーディングによる分離程度をそれぞれ考察した。ブリーディング量が $0.03\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上であれば、ブリーディング量の増加に伴って、フレッシュモルタルとコンクリートの分離程度の評価値(密度分布の標準偏差)は大きくなる結果が得られた。これによって、本研究で提案した材料分離抵抗性評価試験法は、ブリーディングを反映することができ、ブリーディングも骨材分離も共に評価できる統合型試験法であると考えられる。

## 2.4 試験方法

材料分離抵抗性を評価する実験の手順は、以下の通りである。

- 1) 練り混ぜた直後のコンクリートの空気量、スランブおよび単位容積質量を測定する。
- 2) 円筒容器に200mmの高さまで充填するのに必要な試料の質量を計算して、締固めをせずに、円筒容器に充填する。
- 3) 試料を円筒容器に充填した後、試料に振動棒(振動数:220~270Hz, 出力280W, 振動部の長さ475mm, 直径28mm)を差し込んで振動を10秒間加える。
- 4) 円筒容器と試料を図1に示す評価試験装置上に置く。 $\gamma$ 線密度計を図2に示す各試料層の中間位置に60秒間停め、各試料層を通過した $\gamma$ 線カウントを測定する。
- 5) 60秒間で通過した $\gamma$ 線カウントより、1秒間に通過した $\gamma$ 線数の平均値を求め、表2に示す密度推定式を用いて、各試料層の密度を推定する。
- 6) 8層の試料の密度の変動係数の百分数を式(1)によって計算して、材料分離抵抗性指数とする。

## 2.5 材料分離抵抗性の評価例

上記の評価試験法を利用して、表4に示すシリーズC1~C9のコンクリートの材料分離抵抗性を評価した。普通ポルトランドセメントと高性能AE減水剤以外に、表5に示す海砂1と砕石2をC1~C9に使用した。

シリーズC1~C9のコンクリートの密度の測定値と推定値を図6に示す。両者はかなり一致しており、誤差は3%以内である。

また、図7は、9シリーズのコンクリート試料の平均密度に対する最上層(1層目)試料の密度の低下率と材料分離抵抗性指数(SRI)と

表4 コンクリートの配合およびフレッシュ時の性能

| シリーズ | W/C  | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |        |        |                      | フレッシュ時の性能 |         |                             |
|------|------|---------|-------------------------|-----|--------|--------|----------------------|-----------|---------|-----------------------------|
|      |      |         | W                       | C   | S (絶乾) | G (絶乾) | S <sub>p</sub> (C×%) | Sl (cm)   | Air (%) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
| C1   | 0.40 | 0.38    | 180                     | 450 | 611    | 1070   | 1.00                 | 24.0      | 7.20    | 2282                        |
| C2   | 0.45 | 0.40    | 175                     | 389 | 674    | 1070   | 0.75                 | 21.0      | 5.80    | 2348                        |
| C3   | 0.55 | 0.42    | 171                     | 311 | 748    | 1070   | 0.30                 | 13.0      | 3.70    | 2403                        |
| C4   | 0.60 | 0.43    | 173                     | 288 | 761    | 1070   | 0.60                 | 14.0      | 2.09    | 2354                        |
| C5   | 0.55 | 0.42    | 165                     | 300 | 757    | 1086   | 0.40                 | 2.0       | 3.60    | 2419                        |
| C6   | 0.55 | 0.47    | 177                     | 322 | 816    | 972    | 1.50                 | 23.5      | 8.70    | 2266                        |
| C7   | 0.55 | 0.49    | 175                     | 318 | 855    | 940    | 0.75                 | 19.5      | 7.80    | 2299                        |
| C8   | 0.55 | 0.53    | 177                     | 322 | 924    | 859    | 1.00                 | 20.5      | 7.30    | 2205                        |
| C9   | 0.52 | 0.41    | 176                     | 338 | 713    | 1070   | 0.30                 | 19.0      | 2.60    | 2423                        |

注) W/C: 水セメント比, W: 水, C: セメント, S: 海砂 s/a: 細骨材率, G: 砕石, S<sub>p</sub>: 高性能AE減水剤, Sl: スランブ, Air: 空気量,  $\rho$ : 単位容積質量, t: L型ボックス充填時の振動時間

表5 骨材の物理性質

| 骨材  | 種類  | 最大寸法(mm) | 実積率(%) | 粗粒率  | 表乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率(%) | 単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----|-----|----------|--------|------|--------------------------|--------|----------------------------|
| 粗骨材 | 砕石1 | 20       | 59.8   | 6.56 | 2.73                     | 0.47   | 1620                       |
|     | 砕石2 | 20       | 59.2   | 6.68 | 2.72                     | 0.84   | 1537                       |
| 細骨材 | 海砂1 | 5        | 64.6   | 2.61 | 2.60                     | 1.04   | 1660                       |
|     | 海砂2 | 5        | 66.7   | 2.90 | 2.57                     | 1.36   | 1700                       |

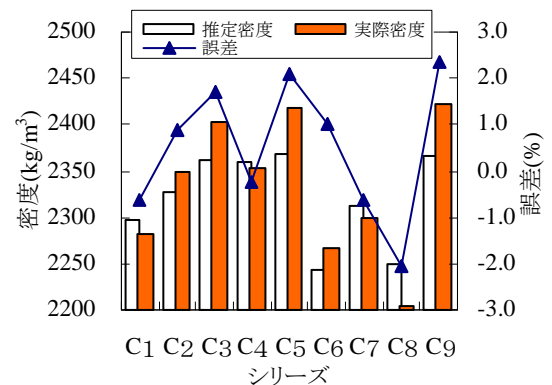


図6 コンクリート密度の推定値と実際値の比較

の関係を示したものである。最上層試料の密度低下率が0.86%である場合のSRIは約1.5%である。つまり、試料があまり分離しなくても、測定誤差としてSRIの試験値は1.5%である。SRIの計測値が1.5%以上であれば、SRIが大きいほど、分離程度は大きく、材料分離抵抗性は低い。

図8にシリーズC1~C9のコンクリートの流動性と材料分離抵抗性指数(SRI)の関係を示す。同図を見ると、スランブの増加に伴って、材料分離抵抗性指数が増大する傾向が見られた。スランブが20cmを超えると、SRIは急激に大きくなった。

### 3. 振動打設したコンクリートの分離程度の評価方法

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、コンクリート固有の材料分離抵抗性だけではなく、部材の寸法・形状・配筋密度、加振時間、水平流動距離などに依存する。したがって、実際に振動打設したコンクリート構造体の分離程度の予測は容易ではない。筆者らは、別報で円柱と角柱供試体の力学性能と耐久性の材料分離による低下率や不均一性と分離程度(5層の密度の変動係数)の関係を定量的に検討し、コンクリートの材料分離限界を提案した。本研究では、振動打設したコンクリートの分離程度が分離限界を超えないかどうかを照査することを目的として、モデル振動打設実験による分離程度の評価方法を開発した。

#### 3.1 実験装置および試験方法

本研究では、図9(a)に示すL型充填ボックスを用いて、モデル振動打設実験を行った。鉄筋コンクリート中の鉄筋配置の模擬として、L型ボックスの流動充填部(B室)に塩化ビニル棒を配置する。塩ビ棒の配置は、模擬される鉄筋コンクリート部材の配筋数量と直径に応じて行う。今回の実験では、図9(b)に示すように直径が16mmの塩ビ棒を15本配置した。塩ビ棒表面間隔は60mmである。

振動部(A室)の上に補助枠をつけて、練り混ぜた直後のコンクリートを24リットル装入した。試料の単位容積質量より装入体積を装入質量質量に換算した。その後、棒状パイプレーターをボックスの底に接触しないようにA室に挿入して、B室の流動先端部が21cmの高さになるまで振動を加えた。

次に、図9(c)に示すように、コンクリートを振動充填したL型充填ボックスを密度測定装置に載せ、ブリーディングと骨材沈降を生じさせるために60分間静置した後に、図10に示すように水平方向に3つの位置、鉛直方向に5箇所、計15箇所のγ線通過量を測定した。γ線通過量より各測点の試料の密度を推定し、水平方向の3位置の密度変動係数、鉛直方向の5箇所の密度変動係数を式(2)と式(3)によってそれぞれ算出した。前者の計算値を水平方向の分離指数、後者を鉛直方向の分離指数とした。

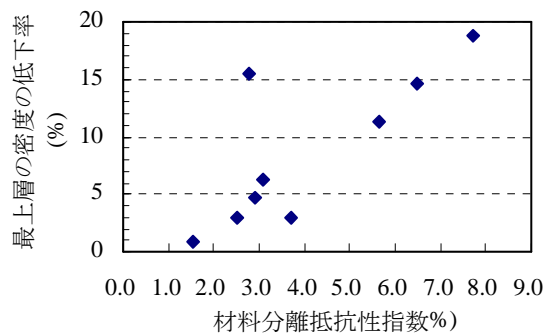


図7 コンクリートの分離程度とSRIの関係

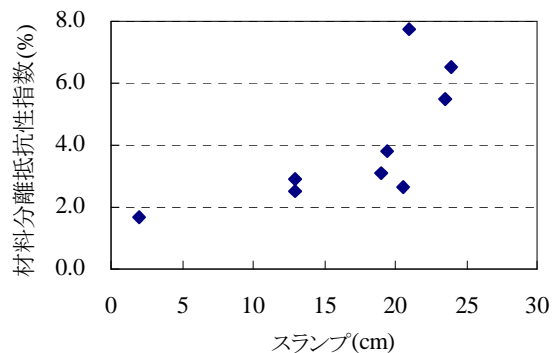


図8 シリーズC1~C9のSRIと流動性の関係

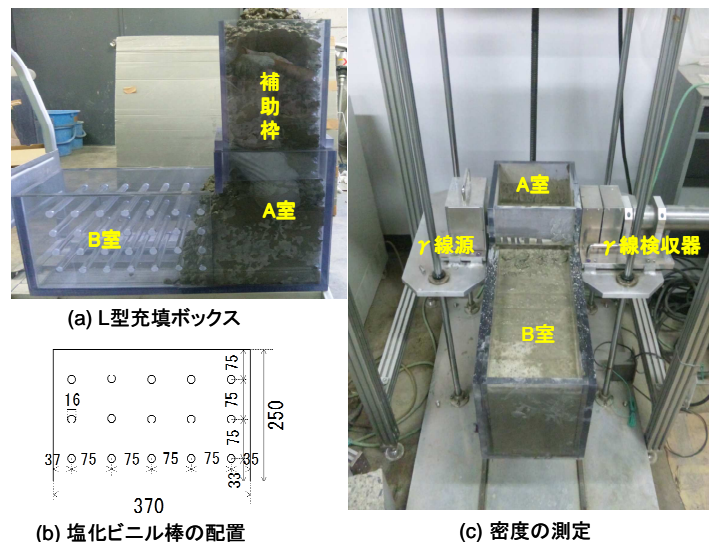


図9 L型充填ボックスおよび充填後の密度の測定



$$SI_h = \frac{1}{\rho_m} \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\rho_{mi} - \rho_m)^2} \times 100\% \quad (2)$$

ここに、 $SI_h$ ：水平方向の分離指数、 $\rho_{mi}$ ：それぞれ位置1,2,3の鉛直方向における5層試料の密度の平均値 ( $i=1,2,3$ )、 $\rho_m$ ：水平方向における三つの位置の密度 ( $\rho_{m1}, \rho_{m2}, \rho_{m3}$ ) の平均値

$$SI_{vi} = \frac{1}{\rho_{mi}} \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 (\rho_{ij} - \rho_{mi})^2} \times 100\% \quad (3)$$

ここに、 $SI_{vi}$ ：水平方向における三つの位置のそれぞれの分離指数 ( $i=1,2,3$ )、 $\rho_{mi}$ ：それぞれ位置1,2,3の鉛直方向に5層試料の密度の平均値、 $\rho_{ij}$ ：各位置の鉛直方向における各層試料の密度 ( $j=1,2,\dots,5$ )

塩ビ棒の直径、本数および配置位置によって、密度の推定式は異なる。

図9(b)に示す塩ビ棒の配置の場合においては各位置の鉛直方向における各試料層の密度の推定式を表6に示す。これらの式は、異なる厚さを有する鉄板と水を使った較正試験によって得られたものである。

### 3.2 用いたコンクリートの配合と使用材料

コンクリートに普通ポルトランドセメント、高性能 AE 減水剤および表5に示す海砂2と砕石2を使用した。コンクリートの配合(シリーズa~e)およびスランプ、空気量、単位容積質量、材料分離抵抗性指数(SRI)の測定値を表7に示す。

### 3.3 実験結果及び考察

コンクリートをL型ボックスに充填するための振動時間とコンクリートの調査、スランプおよび材料分離抵抗性指数との関係を図11に示す。スランプがほとんど同じであった5シリーズのコンクリートの振動時間は、水セメント比の増加に伴って減少する傾向が見られた。水セメント比が同じであったシリーズdとeでは、単位水量が大きいシリーズeのほうが振動時間は短かった。

図11(2)に示すように、スランプの増加に伴って、振動時間は短くなるが、同じスランプの場合には振動時間は異なった。これは、材料分離抵抗性の影響が共に存在したためと考えられる。図11(3)によって、材料分離抵抗性指数(SRI)が大きいほど、振動時間が短いことが認められた。これは、SRIが大きいほど、粘性が低くなり、流動速度が大きくなるためである。

図12は、振動充填したコンクリートの水平方向の分離程度を示したものである。同図に示すように、コンクリートの材料分離抵抗性指数(SRI)は小さく、材料分離抵抗性は高いシリーズのコンクリートでも、水平方向の分離程度が大きくなる傾向が見られた。図13に、水平方

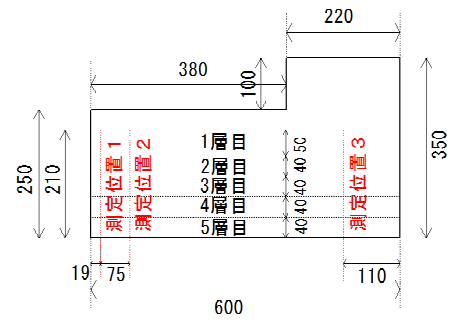


図10 密度の測定位置 (単位:mm)

表6(a) 試料密度の推定式(充填ボックスの位置1)

| 試料層の範囲 (mm) | 密度推定式  | 決定係数(R <sup>2</sup> ) |
|-------------|--|-----------------------|
| 1: 160~210  | $\rho_1 = (\ln R_\rho - 1.756) / -5.168E-04$ | 0.9986                |
| 2: 120~160  | $\rho_2 = (\ln R_\rho - 1.833) / -5.485E-04$ | 0.9993                |
| 3: 80~120   | $\rho_3 = (\ln R_\rho - 1.820) / -5.263E-04$ | 0.9996                |
| 4: 40~80    | $\rho_4 = (\ln R_\rho - 1.850) / -5.381E-04$ | 0.9996                |
| 5: 0~40     | $\rho_5 = (\ln R_\rho - 1.786) / -4.771E-04$ | 0.9997                |

表6(b) 試料密度の推定式(充填ボックスの位置2)

| 試料層の範囲 (mm) | 密度推定式  | 決定係数(R <sup>2</sup> ) |
|-------------|--|-----------------------|
| 1: 160~210  | $\rho_1 = (\ln R_\rho - 1.952) / -5.987E-04$ | 0.9999                |
| 2: 120~160  | $\rho_2 = (\ln R_\rho - 2.013) / -6.128E-04$ | 0.9999                |
| 3: 80~120   | $\rho_3 = (\ln R_\rho - 2.036) / -6.133E-04$ | 0.9999                |
| 4: 40~80    | $\rho_4 = (\ln R_\rho - 2.041) / -6.086E-04$ | 0.9999                |
| 5: 0~40     | $\rho_5 = (\ln R_\rho - 2.014) / -5.753E-04$ | 0.9999                |

表6(c) 試料密度の推定式(充填ボックスの位置3)

| 試料層の範囲 (mm) | 密度推定式  | 決定係数(R <sup>2</sup> ) |
|-------------|--|-----------------------|
| 1: 160~210  | $\rho_1 = (\ln R_\rho - 2.069) / -6.764E-04$ | 0.9999                |
| 2: 120~160  | $\rho_2 = (\ln R_\rho - 2.096) / -6.876E-04$ | 0.9996                |
| 3: 80~120   | $\rho_3 = (\ln R_\rho - 2.088) / -6.754E-04$ | 0.9995                |
| 4: 40~80    | $\rho_4 = (\ln R_\rho - 2.075) / -6.609E-04$ | 0.9998                |
| 5: 0~40     | $\rho_5 = (\ln R_\rho - 2.019) / -6.087E-04$ | 0.9986                |

表7 振動充填実験に用いたコンクリートの配合および性能

| シリーズ | W/C  | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |        |        |                      | フレッシュ時の性能 |          |                        |         | t (s) |
|------|------|---------|-------------------------|-----|--------|--------|----------------------|-----------|----------|------------------------|---------|-------|
|      |      |         | W                       | C   | S (絶乾) | G (絶乾) | S <sub>p</sub> (C×%) | Sl. (cm)  | Air. (%) | ρ (kg/m <sup>3</sup> ) | SRI (%) |       |
| a    | 47.1 | 46.3    | 165                     | 350 | 802    | 986    | 0.50                 | 18.0      | 4.0      | 2298                   | 0.63    | 97    |
| b    | 50.0 | 45.5    | 175                     | 350 | 777    | 986    | 0.50                 | 19.5      | 4.0      | 2283                   | 1.11    | 80    |
| c    | 52.8 | 44.7    | 185                     | 350 | 751    | 986    | 0.50                 | 19.5      | 3.5      | 2267                   | 2.11    | 54    |
| d    | 55.0 | 46.9    | 170                     | 309 | 823    | 986    | 1.00                 | 19.5      | 4.0      | 2283                   | 1.38    | 45    |
| e    | 55.0 | 45.7    | 180                     | 327 | 782    | 986    | 0.50                 | 20.0      | 3.5      | 2270                   | 2.06    | 25    |

注) SRI：材料分離抵抗性指数、t：L型ボックス充填時の振動時間

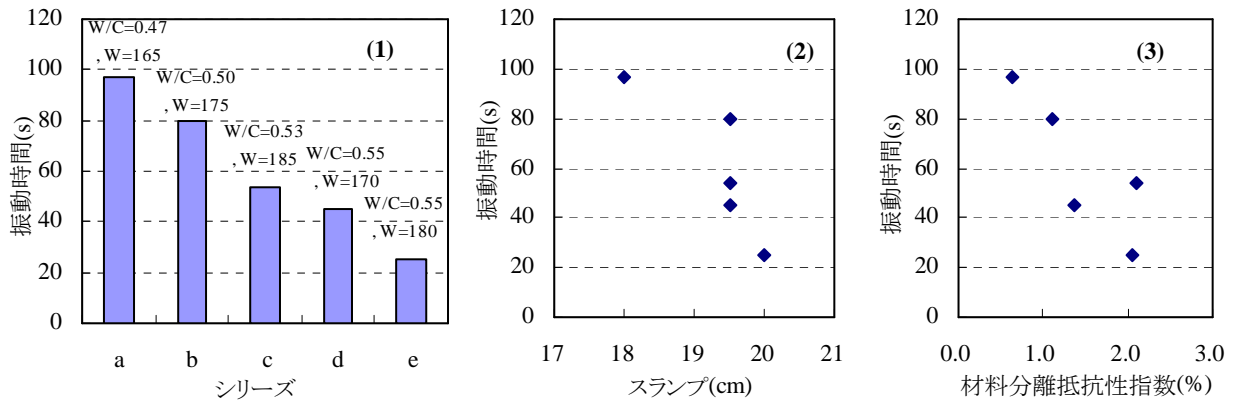


図 11 振動時間とコンクリートの配合，スランプおよび材料分離抵抗性指数の関係

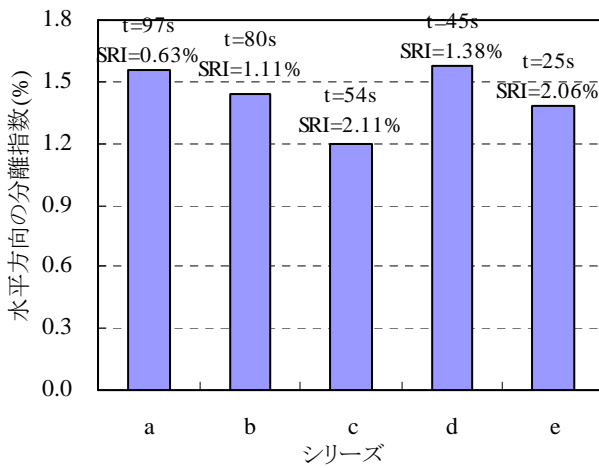


図 12 振動充填したコンクリートの水平方向の分離程度

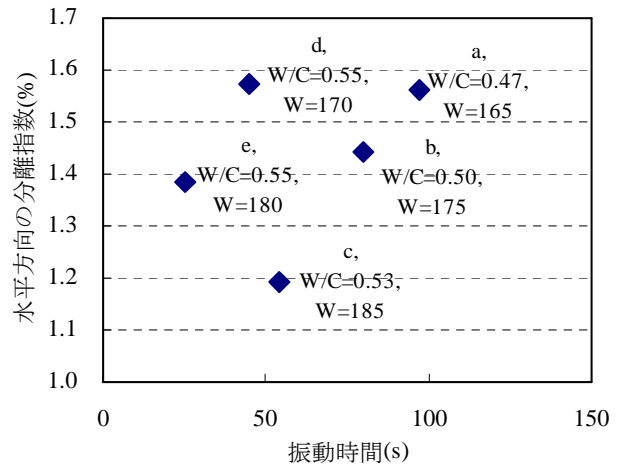


図 13 水平方向の分離程度と振動時間の関係

向の分離程度と振動時間の関係を示す。水セメント比が異なるシリーズ a~c では、振動時間が長いほど、水平方向の流動分離の程度が大きくなることが認められた。水セメント比が同じであるが、単位水量が異なるシリーズ c と d でも、同様の傾向が見られた。これらの結果によって、振動打設したコンクリートの分離程度は、振動時間に大きく依存することがわかった。特に、今回の振動充填実験では、振動時間が長いので、コンクリートの充填後の分離程度は振動時間に左右された。

振動充填したコンクリートの三つの位置における鉛直方向の分離指数を図 14 に示す。シリーズ a, b, c

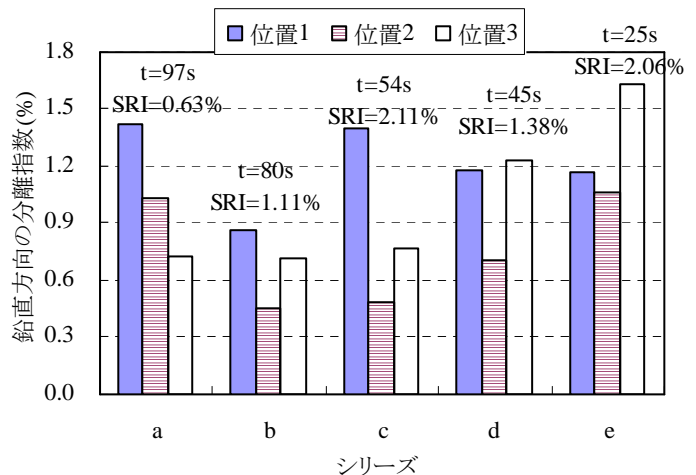


図 14 振動充填したコンクリートの鉛直方向の分離程度

では、シリーズ b の鉛直方向の分離指数がいずれの位置でも最も小さかった。シリーズ a の SRI は小さいが、振動時間が長いので、鉛直方向の分離指数は大きくなった。また、シリーズ c の振動時間はシリーズ b より短いですが、SRI が大きいので、その鉛直方向の分離指数はシリーズ b より大きくなった。一方、水セメント比が同じであったシリーズ d と e では、位置 1 の鉛直方向の

分離指数はほぼ同じである。これは、シリーズ d の SRI は小さいが、加振時間が長いためであろうと考えられる。また、位置 2 と位置 3 の鉛直方向の分離指数では、振動時間は短い、単位水量が大きく、SRI が大きいシリーズ e のほうが大きかった。これは、この二つの位置の分離が振動の影響より材料分離抵抗性の影響を大きく受けたためだろうと思われる。

図 15 と図 16 は、3 位置の鉛直方向の分離指数とスランプ、材料分離抵抗性指数(SRI)との関係をそれぞれ示したものである。3 位置の鉛直方向の分離指数とスランプ、SRI の間には相関性が見られなかった。

一方、図 17 に、3 位置の鉛直方向の分離指数と振動時間の関係を示す。ばらつきがあるが、位置 1 の分離指数は振動時間の増加によってやや増大した。また、位置 2 の分離指数は、振動時間に伴って最初に減少するが、振動時間が 80s を超えると、逆に振動時間と共に大きくなる傾向が見られた。位置 2 の試料を加振することによって材料分離が生じると共に、気泡が排出されて試料の緻密度が増大し、不均一性が減少するためと考えられる。つまり、振動による分離と緻密化の影響が共に存在する。加振の初期に、試料の緻密度が低く、緻密化の影響が顕著で、分離指数が大きくなる。ある緻密度に達すると、緻密化の影響が小さくなり、分離指数は増大する。なお、位置 3 の分離指数は、振動時間に伴って最初に減少するが、振動時間が 80s を超えると、ほぼ一定になる傾向が見られた。位置 3 は、振動棒の挿入位置で、骨材の沈降分離が激しい。振動によって、密度の測定区域以上の試料から骨材が沈降してきて、測定区域の骨材量は増えて、徐々に均一になり、分離指数は小さくなる。しかし、骨材は、ある程度の量(最大値は実積率の量である)が溜まると、それ以上に増えないため、分離指数は一定値に近づくものと思われる。今回のモデル振動充填実験では、コンクリートは、A、B 室間の開口を通じて流動充填したため、振動時間が長く、試料の分離程度は振動時間に左右された。

また、図 17 によって、振動時間が 30s 以内の場合に、位置 3 の分離指数が最も大きかったが、振動時間が 30s を超えると、位置 1 の分離指数が最大になった。

#### 4. まとめ

本研究では、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性の評価試験法を提案した。γ線密度計を利用して 10 秒間振動された試料の鉛直方向における 8 層の密度を推定し、密度分布の変動係数を計算することによって、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性を評価する。粗骨材の洗い試験が不要であるため、この方法は非破壊試験法と位置づけられる。また、ブリーディング量が  $0.03\text{cm}^3/\text{cm}^2$  以上であれば、この方法はブリーディングと骨材の沈降分離を同時に評価でき、材料分離の統合型評価方法で

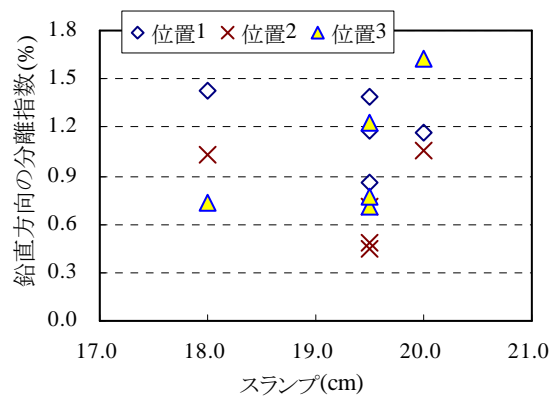


図 15 鉛直方向の分離指数とスランプの関係

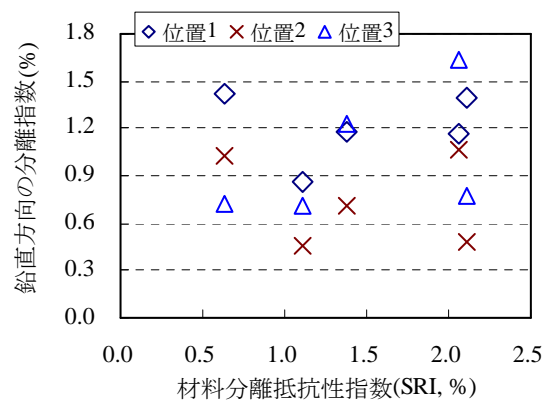


図 16 鉛直方向の分離指数と SRI の関係

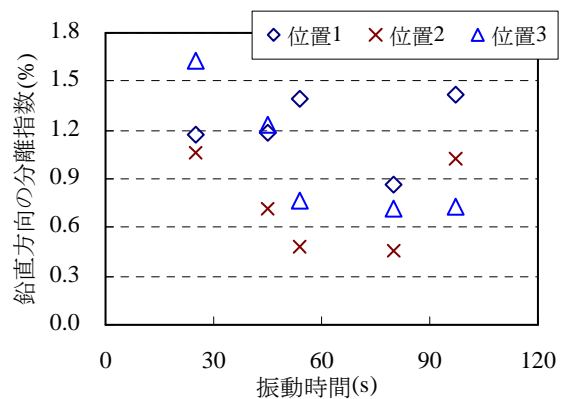


図 17 鉛直方向の分離指数と振動時間の関係

あると考えられる。

また、本研究では、鉄筋コンクリート部材のモデル振動打設実験を行い、 $\gamma$ 線密度計を利用して打ち込んだ後のコンクリートの分離程度を評価した。この評価方法は、水平方向における3位置の密度分布の変動係数および鉛直方向における5層の試料の密度の変動係数を測定することによって、水平方向と鉛直方向の分離程度を定量化するものである。実験結果によって、以下の知見が得られた。(1) 振動打設したコンクリートの分離程度は、材料分離抵抗性だけでなく、振動時間に大きく依存する。(2) 振動時間は、コンクリートの流動性だけでなく、材料分離抵抗性に大きく依存し、材料分離抵抗性が高いほど、振動時間は長い。(3) 流動先端部の鉛直方向の分離程度は、振動時間と共に増大する。しかし、振動棒の挿入部位の鉛直方向の分離程度は振動時間の増加に伴って減少するが、ある振動時間後、一定値に近づく。(4) 振動時間が短い場合には、振動棒の挿入部位の分離程度は流動先端部より大きいですが、振動時間が長くなると、流動先端部の分離程度は振動部より大きくなる。

今後の課題として、(1) 材料分離抵抗性評価試験法の評価精度を詳細に検証し、適用範囲を明らかにする。(2) モデル振動打設実験のボックスの形状と寸法および鉄筋の配置を検討し、合理的な模擬振動打設実験を設計する。(3) 密度の測定装置を改良することによって、振動打設したコンクリートの分離程度の評価位置を合理化し、精度を向上させる。

【謝辞】本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号：22360228、研究代表者：李柱国)によるものである。本研究の実験に際して、山口大学工学部卒論生・森山望君の助力を得ました。また、本論文の取りまとめた際して名古屋大学名誉教授・谷川恭雄先生のご助言をいただきました。付記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 島弘・水口裕之・和田寿夫・河野清：材料分離が流動化コンクリートの硬化後の諸性質に及ぼす影響，第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.5-8, 1984
- 2) 西田朗・斉藤丈士・名和豊春・山崎庸行：構造体における高強度コンクリートの材料分離と各種性状，日本建築学会構造系論文集, No.613, pp.15-22, 2007
- 3) 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, Vol. 34, No.1, pp.472-477, 2012.7
- 4) S. D. Hwang, K. H. Khayat, and O. Bonneau : Performance-based specification of self-concrete used in structural applications, ACI Materials Journal, Vol. 103, No 2, pp.121-129, 2006.3
- 5) 福富和人・谷口裕史・喜多達夫：増粘剤および高性能減水剤を用いた高流動コンクリートの材料分離抵抗性について，土木学会第45回年次学術講演回概要集，第5部, pp.210-211, 1990
- 6) 三浦律彦・小松原徹・宮崎信一・入谷桂史郎：超流動コンクリートの過密配筋構造物への適用に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.95-100, 1992
- 7) 土木学会コンクリート委員会コンシステンシー評価指標小委員会報告書：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題(II)，コンクリート技術シリーズ 54, pp.98-107, 2003.7
- 8) Zhuguo. Li, and Zhijian. Wang: Non-uniformity of fresh concrete resulting from bleeding, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No.1, pp. 1213-1218, 2013.7
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS5 鉄筋コンクリート工事, p.249, 1997.