# 論文 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

#### 張 文博<sup>\*1</sup>·李 柱国<sup>\*2</sup>

要旨:振動締固めによるフレッシュコンクリートの充填性に及ぼす材料分離の影響を定量的に把握するため, 振動打設したコンクリートの充填性を調べ,分離程度を RI 密度計で評価した上,それらに及ぼす試料流動性 と分離抵抗性,障害鉄筋の間隔などの影響を検討した。また,分離抵抗性が振動打設した試料の充填性に与 える影響を定量的に考察した。その結果,振動打設した材料の分離程度は,その流動性,分離抵抗性および 鉄筋の間隔に依存した。また,鉄筋の間隔,スランプやスランプフローが大きいほど,振動による充填性が大 きかった。なお,振動打設による分離程度がある限界に達すると,充填性は急激に悪くなった。 キーワード:フレッシュコンクリート,振動締固め,RI密度計,充填性,密度分布,分離程度

#### 1. はじめに

締固めが必要なコンクリートを打設する時に、コンク リートの品質に悪影響、すなわち材料分離を生じさせな いように、適度な振動締固めを加えなければいけない。 しかし、現状では施工指針に振動時間の目安は示されて いるものの<sup>1)</sup>、振動締固めの程度は作業員の経験によっ て決められるのがほとんどである。普通コンクリートの 振動による充填を実現しながら、過度な材料分離を生じ させないために、フレッシュコンクリートに適切な分離 抵抗性が求められる。また、振動打設したコンクリート の硬化後の性質を評価・予測するために、振動打設によ るコンクリートの分離程度を把握する必要がある。

高流動コンクリートの自己充填性およびそれに及ぼ す分離抵抗性の影響に関する研究は多く報告されている <sup>2,3,4)</sup>が,普通コンクリートの振動打設による分離程度と 充填性の影響要因についての研究は少なく,コンクリー トの分離抵抗性がその振動打設による充填性と分離程度 に与える影響が明らかになっていない。

上記の背景を踏まえて、本研究では、U型ボックスに 振動打設する過程におけるコンクリートの分離程度と充 填高さに着目し、それらに与える障害鉄筋の間隔、流動 性、分離抵抗性、振動時間および粗骨材の最大寸法など の影響を考察する。また、振動締固めによって充填した コンクリートの分離程度と充填高さの関係を検討する。

#### 2. 実験概要

## 2.1 振動打設したコンクリートの分離程度の評価方法

### (1) 実験装置

振動締固めによって、U型ボックスに充填したコンク リートの分離程度は、スキャニング式 RI 密度計を用い て、流動側にあるコンクリートの垂直方向に沿って密度 の分布を測定し、密度分布の標準偏差(SD)によって評価 した。用いた実験装置を図-1 に示す。U型ボックス充



図-1 実験装置の写真

填試験器,バイブレーターと制御システム,RI密度計(線 源,検出ユニート,計数器),密度計の台座と昇降制御シ ステム(モータ,モータコントローラ)およびパソコン により構成される。図-2に用いたU型ボックスおよび その障害部の詳細を示す。このU型ボックスは,高流動 コンクリートの自己充填性の評価によく使われるもので ある。鉄筋の間隔を変えて3種類の障害を実験に使った。 また,U型ボックスの流動側に挿入したバイブレーター の先端は,試料底部から50mm位置とした。用いたバイ ブレーターの振動数と振幅はそれぞれ200Hzと1.5mmで あり,振動部の長さが230mm,直径が28mmである。ガ

\*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 大学院生 工修(正会員) \*2 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)(正会員)





図-3 分離抵抗性が異なる試料のスランプ試験の様子<sup>7)</sup>

ンマ線のRI密度計はU型ボックスの流動側に設置した。 鉛直方向における各区域のコンクリートを透過したガン マ線の減衰量によって各区域の試料の密度を推定した。 用いた RI 密度計の仕様を表-1に示す。

#### (2) 密度の推定式

本研究では、流動側の底部から 280mm の範囲におけるコンクリートを振動後の分離程度の評価対象とした。 高さが 280mm のコンクリートを 7 つの区域に分け、区域ごとの高さは 40mm であった。

周辺設備や試料容器の材質と寸法の変動などがガン マ線の検出数に影響するため、同じ容器と試料であって も、測定部位によって検出したガンマ線のカウントが異 なる<sup>5)</sup>。そこで、本研究では、バックグラウンド数を区 域ごとに計測・キャリブレーションした上で、標準砂、 乾燥海砂、分離が生じないモルタルとコンクリートを用 いて、各試料・区域ごとにガンマ線検出数を測定した。 ガンマ線検出数を計測した際に、区域ごとの測定時間は 30 秒であった。検出した 30 個のカウント数を移動平均

表-1 RI密度計の仕様

| 型 式   | SRD-2SC                 |
|-------|-------------------------|
| 検 出 器 | Nal シンチレーション検出器         |
| 放射線源  | <sup>60</sup> Co 3.7MBq |
| 検出窓   | 高さ 5mm×幅 50mm           |
| 検出高さ  | 約 20mm                  |

後に単純平均にして、平均ガンマ線検出数を得た。さらに、それと標準カウント数(10秒間計測の場合、117000である)との比を計数率 R として求めた。

得られた計数率 R と試料の密度  $\rho$  との関係について 回帰分析を行い,各区域の密度推定式は,式(1)のように 得られた。

$$\rho = B \ln(R / A) \tag{1}$$

式(1)および予備試験で求めた係数 A と B の値を予め パソコンに組み入れて,コンクリート試料の各区域の密 度および密度分布の標準偏差(SD)を自動的に算出する。 2.2 フレッシュコンクリートの分離抵抗性の評価方法

フレッシュコンクリートの分離抵抗性の評価試験法が 多く提案された<sup>3,6</sup>が,高流動コンクリートに適用しうる ものがほとんどであり,普通コンクリートの分離抵抗性 の試験法が確立されていない。普通コンクリートのスラ ンプ試験した後の形状は,図-3に示すように,大略 3 つのタイプに分類される<sup>7)</sup>。

分離抵抗性と流動性のバランスが良い試料の場合に は、形状は図-3のAに示すようである。分離抵抗性が 大きい試料のスランプ試験した後の形状を図-3のBに 示す。スランプは大きいが、スランプフローは相対的に 小さい。また、分離抵抗性が小さいと、スランプする際 に粗骨材は試料の中心に滞留して、スランプ試験した後 の形状は図-3のCのようになり、スランプフローが相 対的に大きい。

したがって、スランプに対するスランプフローの比 (SRA)は、普通コンクリートの分離抵抗性を反映でき、 SRA が大きいほど、試料の分離抵抗性が大きいと考えら れる<sup>8)</sup>。本研究では、SRA 値を用いてコンクリートの分

| 3/11- | W/C  | s/a  | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |                   | フレッシュ時の性質   |                            |             |             |       |                                |
|-------|------|------|-------------------------|-----|-----|-------------------|-------------|----------------------------|-------------|-------------|-------|--------------------------------|
| ブリー ( | (%)  | (%)  | W                       | С   | S   | G                 | Sp<br>(C×%) | <i>t</i> <sub>50</sub> (s) | Sf.<br>(cm) | Sl.<br>(cm) | SRA   | 単位容積質量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| LC1   | 40.0 | 40.0 | 165.0                   | 413 | 704 | 1060              | 0.2*        | -                          | 23.0        | 13.5        | 0.587 | 2471                           |
| LC2   | 45.6 | 43.6 | 172.4                   | 378 | 770 | 1000              | 0.4*        | -                          | 28.5        | 17.0        | 0.596 | 2363                           |
| LC3   | 55.0 | 43.0 | 174.0                   | 316 | 788 | 1029              | 0.4*        | -                          | 34.0        | 20.0        | 0.588 | 2330                           |
| LC4   | 35.0 | 35.0 | 170.0                   | 486 | 587 | 1094              | 0.7**       | -                          | 46.0        | 22.5        | 0.613 | 2289                           |
| LC5   | 40.8 | 45.0 | 161.0                   | 395 | 795 | 961               | 1.5**       | 2.87                       | 61.4        | 25.5        | 0.415 | 2286                           |
| LAC   | 45.6 | 43.6 | 172.4                   | 378 | 770 | $1000^{	riangle}$ | 0.4*        | -                          | 41.5        | 21.0        | 0.505 | 2441                           |

表-2 試験に用いたコンクリートの調合およびフレッシュ時の性質

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 R<sub>20</sub>, G<sup>△</sup>:砕石 R<sub>13</sub>, Sp\*:標準 AE 減水剤, Sp\*\*:遅延型高性能 AE 減水剤, t<sub>50</sub>: 50cm フロー時間, Sf.:スランプフロー, Sl.:スランプ, SRA: スランプとスランプフローの比



図-4 振動締固めの時間に伴う密度分布の標準偏差(SD)の変化

| 衣一3 試料の床さ万円の密度分布 |       |       |       |       |  |  |  |  |  |  |
|------------------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|--|--|--|
| 測定位置(mm)         | LC1   | LC3   | LC2   | LC4   |  |  |  |  |  |  |
| 260              | 2.376 | 2.417 | 2.406 | 2.399 |  |  |  |  |  |  |
| 220              | 2.408 | 2.458 | 2.428 | 2.419 |  |  |  |  |  |  |
| 180              | 2.413 | 2.489 | 2.459 | 2.420 |  |  |  |  |  |  |
| 140              | 2.500 | 2.502 | 2.467 | 2.455 |  |  |  |  |  |  |
| 100              | 2.500 | 2.499 | 2.479 | 2.455 |  |  |  |  |  |  |
| 60               | 2.500 | 2.506 | 2.463 | 2.454 |  |  |  |  |  |  |
| 20               | 2.526 | 2.511 | 2.490 | 2.463 |  |  |  |  |  |  |
| 標準偏差 SD          | 0.055 | 0.031 | 0.027 | 0.023 |  |  |  |  |  |  |
|                  |       |       |       |       |  |  |  |  |  |  |

注: 測定位置の基準点(0mm)は流動側の底面である。

離抵抗性を評価することにした。

#### 2.3 コンクリートの調合

表-2 に、実験に用いたコンクリートの調合およびフ レッシュ時の性質を示す。これらの流動性と分離抵抗性 が異なる6シリーズの試料を用いて、振動打設による充 填性と分離程度に与える各影響要因を検討した。

コンクリートの練混ぜとしては、砂とセメントをミキ サに投入して 30 秒間攪拌してから水と混和剤を加えて 60 秒間練り混ぜた。さらに砕石を投入して 90 秒間攪拌 した。普通ポルトランドセメント,海砂(表乾密度: 2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.60%), 砕石 R<sub>20</sub> (粒径: 5~20mm, 表乾密度: 2.73g/cm<sup>3</sup>)または砕石 R<sub>13</sub> (粒径: 5~13mm, 表乾密度: 2.73g/cm<sup>3</sup>)および高性能 AE 減水剤を用いた。 2.4 実験方法

U型ボックスに振動打設したコンクリートの分離程度 および充填性の実験手順は以下の通りであった。

(1) U型ボックスの仕切り板を閉め、練り混ぜた直後の コンクリート試料を流動側に 680mm まで充填した。 流動側の鉛直方向に沿った 0~280mm の範囲にお ける7区域の密度を RI 密度計により計測し, 密度 分布の標準偏差 SD を求めた。なお,各区域を計測 する際に,密度を 1s ごとに計測して,一つの区域

あたりの計測時間を 30s とした。

- (2) 仕切り板を引き上げ,充填側に流動した試料の高 さをボックス側壁の透明アクリル板から観察して 計測した。
- (3) ある時間に(予想した分離の容易さによって予め 決定した)振動させ、試料が安定になると、密度 分布の標準偏差を算出する。充填側の試料高さが 300mmになるまで、この「振動-計測」操作を繰り 返しする。

自己充填コンクリートの充填性の基準を参考に して(JSCE-F 511), 充填側の充填高さが 300mm に なると、充填性が確保できるとした。そこで、そこ まで振動を加え,流動側の密度分布の標準偏差およ び充填側の充填高さを繰り返して測定した。

(4) 障害程度が異なる鉄筋の付いた板を変えて、同じ 試料に対して,上述した実験を繰り返した。

#### 実験結果および考察

## 3.1 振動打設したコンクリートの分離程度及び影響要因 (1) 試料の深さ方向の密度分布

表-3 に, 充填側の試料高さが 300mm になるとき, 試 料 LC1~LC4 の深さ方向の密度分布を示す。この結果に よると、振動によってコンクリート材料分離が発生する と、試料の密度が圧密により大きくなり、その値も深さ の増加に伴う大きくなることが分かった。また、各層の 密度差と密度の標準偏差の変化傾向が同じであるため, 密度の標準偏差を用いて試料の深さ方向の密度分布を表 すことにした。

#### (2) 分離程度と振動時間の関係

図-4 に,鉄筋間隔と粗骨材最大寸法との比(e)が 2.25 と一定とした場合について加振時間に伴う各試料の密度 (ρ)分布の標準偏差の経時変化を示す。この図によると, いずれの試料に対しても、振動時間が長くなるほど、各



図-5 300mm まで充填した時の SD に与える e 値の影響





試料の密度の標準偏差は大きくなることが分かった。こ れは、フレッシュコンクリートが振動を受けると、粗骨 材の沈降およびブリーディングが発生して、上下試料区 域の密度が異なるためである。また、粗骨材の実績率お よびブリーディングの限界があることにより、振動時間 がある限界以上になると、試料の SD 値はやや横這いと なることが見られた。即ち、測定した分離程度の上限値 が存在すると思われる。

図-4(a) に示す SD 値に与えるスランプの影響に注目 すると, 普通コンクリート試料 (LC1-LC4) の SD とス ランプは、ほとんど無関係である。振動による分離程度 とスランプの間に一義的な関係がないのは, 分離抵抗性 の影響のためであると推測している。しかし, 増粘剤や 粉体材料を使用しない高流動コンクリート試料 LC5 の SD 値は, いずれの普通コンクリート試料の SD 値よりも 大きかった。

また,図-4(b)に,SD と振動時間の関係に与えるス ランプとスランプフローの比(SRA)の影響を示す。同 図によれば,SRA 値が小さいほど,ρの標準偏差 SD が 大きいことが認められた。前に述べたように,SRA 値が



図-6 300mm まで充填した時の SD と SRA の関係



図-8 SD 限界に与えるスランプの影響

小さいほど,コンクリートの分離抵抗性が低い。したが って,振動時間が同じであれば,SRA 値が小さい試料の 分離程度は大きく,SD 値は大きい。

#### (3) 密度分布の標準偏差の影響要因

図-5に、充填高さが 300mm である時の SD と鉄筋間 隔と粗骨材最大粒径の比(e)の関係を示す。同図を見ると、 e 値の増大に伴い、いずれの試料の SD も小さくなる傾向 が見られた。e 値が大きいほど、鉄筋間隙が粗骨材の最 大寸法に比べて相対的に大きく、コンクリートが鉄筋障 害を通過しやすくなるため、300mm まで充填するための 振動時間が短く、振動締固めによる分離の程度は小さい ものと考えられる。

e値が 2.25 である場合,300mmまで充填した時の SD に与える SRA の影響を図-6 に示す。この図により,充 填高さを 300mm としたとき,普通コンクリート LC1-LC4 の場合,SRA が大きいほど,SD が小さい。すなわち, 振動打設した後の分離程度が小さかった。しかし,高流 動コンクリート LC5 の SRA が小さく,振動による分離 程度は大きいはずであるが,流動性が高いため,300mm の充填高さまでの振動時間が極めて短く,測定した SD,



図-9 単位振動エネルギーあたりの充填高さと振動時間の関係

図-10 単位振動エネルギーあたりの充填 高さと SD の関係に与える e の影響



図-11 単位振動エネルギーあたりの充填高さと密度分布の標準偏差 SD の関係に及ぼす流動性の影響

つまり分離程度はそれほど大きくなかった。

図-7 に、充填高さの増加に伴うコンクリートの密度 分布の標準偏差 SD の変化を示す。充填高さの増加に伴 って、SD 値、つまり振動による分離程度は大きくなっ たが、ある分離程度に達すると、充填高さの増加速度が 急激に減少することが見られた。したがって、図-7 に 示す方法によって、300mmの充填高さを確保するための 密度分布の標準偏差値(以下,SD 限界という)を図-8 に示した。図-8 によると、普通コンクリートの SD 限 界は、スランプの増加に伴って小さくなることがわかっ た。したがって、普通コンクリートの場合、振動打設に よる分離程度が各自の限界値になるまでに、分離抵抗性 より流動性のほうが充填性に与える影響は大きい。非自 己充填の普通コンクリートは、充填するための振動によ る分離がある限界を超えないように適切な分離抵抗性を 有しなければならない。

#### 3.2 振動打設による充填性および影響要因

普通コンクリートを充填するための振動時間が異なっ たため、単位振動エネルギーあたりの充填高さを用いて 充填性を評価することにした。振動エネルギーは,式(2) によって計算される<sup>9</sup>。

$$Wv = m(\pi A f)^2 T \tag{2}$$

ここに,

Wv: 振動時間 T であるときの振動エネルギー(J)
m: 振動を受けたコンクリートの質量(kg)
A: バイブレーターの振幅(1.5×10<sup>-3</sup>m)
f: バイブレーターの振動数(200Hz)

図-9に、単位振動エネルギーWvあたりの充填高さ ΔH と振動時間の関係を示す。この図を見ると、単位振動エ ネルギーあたりの充填高さは、振動時間とともに減少し、 最後にゼロに近づく傾向が見られた。振動時間の増加に 伴って、充填側のヘッド圧が増大し、試料の分離程度も 大きくなるため、流動させ充填することが徐々に難しく なるためである。

Δ*H/Wv*と*SD*(標準偏差)の関係に与える*e*(鉄筋間 隔と粗骨材最大粒径の比)の影響を図-10に示す。同図 より,*e*値が大きいほど,同じ*SD*に対応するΔ*H/Wv*が 大きい。即ち,分離程度が同じであっても,鉄筋間隔と



図-12 △H/Wv とスランプの関係

粗骨材最大粒径の比は大きいほど,試料の充填高さは大 きい。

 $\Delta H/Wv \ge \rho$  の標準偏差 SD の関係に与える流動性の影響を図-11 に示す。図-11(a)を見ると、鉄筋間隔と粗骨材最大寸法の比 e が小さい(=2.25)場合、 $\Delta H/Wv$ の値は試料の流動性の増加に伴って大きくなる傾向が見られた。ただし、流動性が近い試料 LC2、LC3 および LC4の $\Delta H/Wv$ 値に大きな違いが見られなかった。

図-11(b)に示すように,鉄筋間隔と粗骨材最大寸法の比 e が大きい(=4.75)場合,流動性は,単位振動エネルギーあたりの充填高さと SD の関係にあまり影響しなかった。鉄筋間隔が粗骨材の最大寸法よりかなり大きければ,試料は,分離が振動によって生じても,鉄筋の間を通過して充填できるため,充填性への分離程度の影響が小さいと考えている。

3.1(3)に述べた結果に基づいて, e 値が 2.25 であり, 充 填高さが 200mm の場合,  $\Delta H/Wv$  と試料のスランプとの 関係を図-12 に示す。この図によると, 試料のスランプ の増加に伴い,  $\Delta H/Wv$  は大きくなることがわかった。 しかし, 試料 LC2, LC3, LC4 では, 水セメント比と細骨 材率などの違いが大きかった, つまり分離抵抗性が異な ったため,  $\Delta H/Wv$  への流動性の影響があまり見られな かった。

また,各試料(LC5 を除く)の ΔH/Wv とそのスランプ SL, 鉄筋間隔と粗骨材最大粒径の比 e, 振動時間 t および分離 抵抗性指数 SRA の関係について重回帰分析を行い,式(3) が得られた。

$$\Delta H / Wv = 0.010Sl. + 0.130e - 0.029t + 0.692SRA, \quad R = 0.918$$
(3)

式(3)によると, Sl., e, SRA の増加または t の減少に伴い,  $\Delta H/Wv$  は大きくなることがわかった。

#### 4. まとめ

本研究では,U型ボックスに振動打設したコンクリートの分離および充填性を考察した。得られた知見が以下のようにまとめられる。

(1) 非自己充填コンクリートの場合,スランプ,スラン

プとスランプフローの比および鉄筋間隔と粗骨材 最大寸法の比が大きいほど,振動による充填性を確 保するための分離程度が小さい。

- (2) 単位振動エネルギーあたりの充填高さは、鉄筋間隔 と粗骨材最大寸法の比および分離抵抗性の増加に 伴い大きくなる。
- (3) 振動打設したコンクリートは、その分離がある程度 以下であるとき、その流動性がその充填性に決定的 な影響を与えるが、ある分離程度を超えると、分離 が充填性の主影響要因になる。

今後,充填側のコンクリートの品質についても検討し ていく。また,ヘッド圧の影響を無くすために,充填側 の形を変えて検討を行う予定である。

#### 謝辞

この研究を遂行するにあたり,ソイルアンドロックエ ンジニアリング(株)技術開発部吉村貢氏と松浦良信氏 より,装置の設計・製作にご協力をいただきました。こ こに付記し,感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会:コンクリート標準仕 方書 [施工編], pp.121-122, 2007
- 西林新蔵ほか:フレッシュコンクリートの流動性評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.375-380, 1992
- 3) 三浦律彦ほか:ロート流下試験法による超流動コンク リートの品質判定に関する一考察,超流動コンクリー トに関するシンポジウム論文報告集,pp.9-16,1993.5
- N. Roussel: A Theoretical Frame to Study Stability of Fresh Concrete, *Materials and Structures*, Vol.39, pp.81-91, 2006
- 5) 李柱国,張文博,吉村貢:フレッシュコンクリートの分 離抵抗性の定量的評価法に関する研究,日本建築学 会大会学術講演梗概集(東北),A-1, pp.571-572, 2009.8.
- 6) M.Sonebi, M.Rooney and P.J.M.Bartos: Evaluation of the Segregation Resistance of Fresh Self-compacting Concrete Using Different Test Methods, *First International Symposium on Design*, *Performance and Use of Self-compacting Concrete*, pp.301-307, 2005.5
- 7) 田中享二, 三上貴正, 横山裕:新・建築材料 I [構造材 料編], 数理工学社, pp.32-33, 2004.5
- 8) 李柱国ほか:スランプ試験およびフロー試験による 中流動コンクリートの分離抵抗性の評価に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.965-966,2000.9
- 9) (社)日本コンクリート工学協会 フレッシュコンクリートの挙動研究委員会:コンクリートの振動締固めに関する実験報告書, pp.6-7, 1990.3