

論文 フレッシュコンクリートの流動による粗骨材分離に関する実験的考察

張 文博*1・李 柱国*2・稲井 栄一*3

要旨: フレッシュコンクリートは、ポンプ圧送や充填流動過程において粗骨材分離が発生すると、圧送管の閉塞や充填不良などの施工上の問題が生じ、硬化コンクリートの性能が低下する。本研究では、ガンマ線密度計とU型充填試験器を用いた非破壊試験に基づいて、フレッシュコンクリートの流動による粗骨材分離の評価試験法を提案した。また、提案した方法によってフレッシュコンクリートの流動充填後に発生した粗骨材分離挙動を考察し、粗骨材の分離程度に与えるコンクリートの調合、流動性および荷重状態などの要因の影響を検討した。

キーワード: フレッシュコンクリート, 充填流動, 粗骨材分離, 評価試験法, 密度計, 影響要因

1. はじめに

フレッシュコンクリートがポンプ圧送や打設によって流動する時に、粗骨材の沈降分離やモルタルの先送りが発生すると、圧送管閉塞や型枠内の充填不良を招き、硬化後の性能が低下することが知られている¹⁾。従って、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性は、その硬化前の施工性および硬化後の力学的性能、耐久性、水密性などを確保するための重要な性能項目である。

現在、高い流動性を持ったフレッシュコンクリートの材料分離抵抗性の定量的評価試験法は、推定試験法と直接試験法に分けられる。前者として、リングや円筒貫入試験、付着試験、VやOロート試験などが挙げられる。それらの試験結果は、マトリクスモルタルの粘性に大きく依存するため、粗骨材の粒度、形状などの影響も受ける粗骨材分離の難易を説明しにくいと考えられる。一方、後者は、主にスランプフロー試験（またはJリングを付加したスランプフロー試験）やLフロー試験の後、洗い試験によって流動の先頭と後部の試料における粗骨材量の差を測定することによるものである²⁾。後者の方法は、流動による粗骨材分離の程度を定量的に評価できるが、洗い試験（ここに、材料の“破壊試験”と称する）に手間が多くかかる。従って、フレッシュコンクリートの分離抵抗性の定量的・簡便な評価方法を摸索しているのが現状である³⁾。また、分離抵抗性の影響要因に関する研究は多く報告されているが、流動過程に発生した分離の影響要因が明らかになっているとは言えず、その定量的考察がまだ必要であると思われる。

本研究では、ガンマ線密度計とU型充填試験器を用いたフレッシュコンクリートの流動による粗骨材分離の評価試験法を提案する。また、この試験方法によって、フ

レッシュコンクリートの充填流動実験を行い、充填流動過程における粗骨材の沈降分離を評価し、コンクリートのフレッシュ時の流動性、荷重状態および調合などの要因が分離程度に及ぼす影響を考察する。

2. 粗骨材分離の評価試験法の提案

2.1 実験装置

この実験に用いられた装置は、図-1

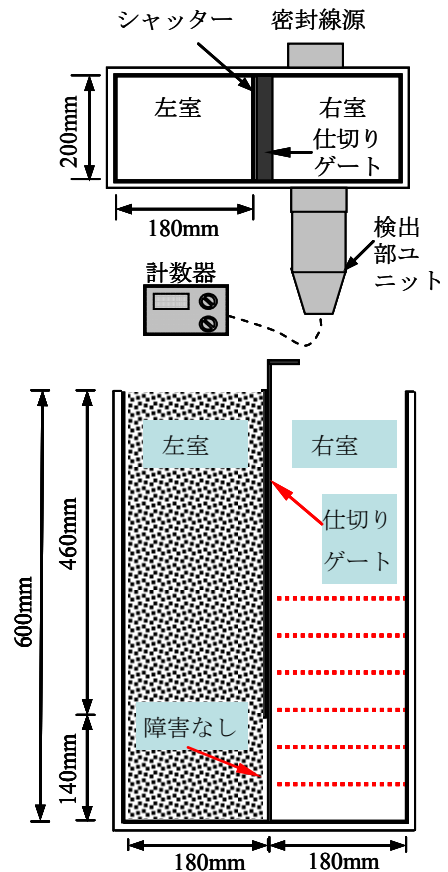


図-1 粗骨材分離の評価実験装置

に示すように高流動コンクリートの充填性と間隙通過性の評価試験に良く使われるU型充填試験器であるが、流動障害は設置されない。U型充填試験器の右室の外側にガンマ線密度計を設置した。その仕様を表-1に示す。用いたガンマ線密度計は、線源ユニット、検出部ユニットおよび計数器などから構成される。検出部ユニットと

*1 山口大学大学院理工学研究科 大学院生 工修 (正会員)

*2 山口大学大学院理工学研究科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 山口大学大学院理工学研究科 教授 工博 (正会員)

放射線源ユニットは、上下可動の台座に固定されるため、鉛直方向における各区間の試料の密度を非破壊試験法で迅速に測定できる。測定原理として、試料の密度によって、それを透過したガンマ線の量が異なる。

検出部ユニット接收されたガンマ粒子数は、試料を透過した粒子数だけではなく、実験装置の周囲に存在している台座、床面および他の機器の影響も受けると考えられている。そのため、実験の前に、試験装置を設置した場所の影響について予め検討した。この検討に使用した材料は、乾燥砂および分離が生じないフレッシュコンクリートである。これらの材料をそれぞれU型充填試験器の右室に入れて、底部から5cmの範囲ごとに、7区域を透過したガンマ線のカウント数を計測した。1区域において10秒ごとに5回の測定を行った。得られた結果に特殊な傾向が見られなかったため、床、台座、壁、周囲設備などからの反射の影響はないことを確認した。

また、上述した方法で、三つの試料を使って較正実験を行った。得られた実験結果は表-2に示す。計数率比と試料の密度との関係(図-2参照)について、回帰分析を行い、式(1)のようにガンマ線密度計の較正式を求めた。

$$\rho_t = \frac{\ln R - 0.6293}{-0.6435} \quad (1)$$

ここに、 R : 計数率比

平均カウント数を用いて計数率比 R を求めれば、式(1)より試料の密度を算出できる⁴⁾。

2.2 実験方法

まず、U型充填試験器の仕切りゲートを閉め、3分間で練り混ぜた直後のコンクリートをU型充填試験器の左室に600mmの高さまで入れる。

次に、仕切りゲートを引き上げて、コンクリートが右室に流れる。粗骨材とマトリックスモルタルはこの流動過程に分離する場合、右室中のコンクリート試料の上下部において単位容積質量の差が生じ、上部に行くほど、単位容積質量が小さくなる。この場合に、試料の重心位置は、下部へシフトするはずである。

さらに、鉛直方向に沿って右側のコンクリート試料の密度を5cmの範囲ごとにガンマ線密度計により計測して、試料の重心位置を計算する。

密度の計測方法として、所定の測定位置において10秒の間隔で5回のカウント数を取り、平均カウントと計数率比を計算して、式(1)によって密度の計算を行う。

重心位置の計算方法として、U型充填試験器の右室の横断面積を S 、測定した各層試料の高さを h_i 、密度を ρ_i とすれば、第 i 層試料の質量は $M_i = \rho_i \times S \times h_i$ で表される。また、第 i 層試料の幾何中心点から全体試料の幾何中心までの距離を y_i とすると、右室に流れた試料の鉛直方向の重心座標 y は、式(2)によって求められる。

表-1 コア密度計の仕様

品名	特殊 RI 密度計
型式	SRD-2SC
計測センサー	NaI シンチレーションカウンター
放射線源	^{60}Co 2.6Mbq(特殊金属カプセル密封)
測定範囲	1.3~2.5 g/cm ³ (校正実績保証)
検出窓	高さ 5mm×幅 50mm
検出高さ(測定幅)	約 20mm

表-2 較正実験に用いられた材料と実験結果

較正用材料	材料の状態	供試体の密度 ρ_t (g/cm ³)	コア密度計測定結果	
			平均カウント N	計数率比 R (注1)
砂	乾燥	1.308	6307.4	0.8133
砂	湿潤	1.612	5110.5	0.6590
フレッシュコンクリート	—	2.217	3494.0	0.4505

注1) 標準カウント(10秒間計測の場合:7755.3)に対する計測カウントの比

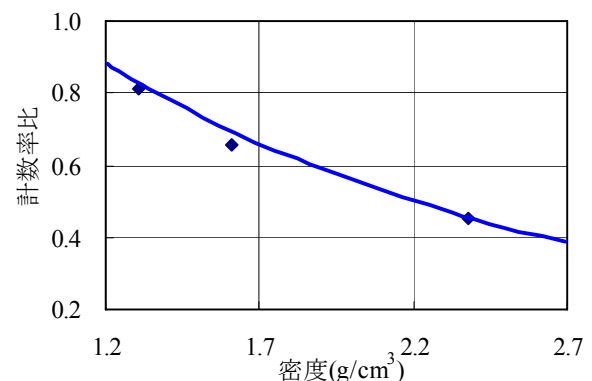


図-2 密度と計数率比の関係

$$y = \frac{\sum M_i y_i}{\sum M_i} \quad (2)$$

本研究では、得られた試料の重心位置に基づいて、式(3)に示すように試料の重心偏差率 S_a を求めることによって、粗骨材の分離程度を評価する。

$$S_a = \frac{y - y_0}{H_r/2} \times 100 (\%) \quad (3)$$

ここに、

H_r : U型充填試験器の右室に流れた試料の高さ

y_0 : 分離が生じない場合の鉛直方向の重心座標の計測値

フレッシュコンクリート試料に分離が生じない場合、その重心と幾何中心は同一の位置にあり、 y_0 はゼロになる。しかし、一部のガンマ線が試料の底部と上表面から逸脱するため、検出したガンマ線が少なく、底部と最上

部にある試料の密度の測定値は過大になる。このため、試料が分離しなくても、計測した重心座標は、その幾何中心座標と異なり、 y_0 はゼロではない。したがって、ガンマ線の逸脱が重心位置の計測結果に与えるこの影響を無くすために、重心偏差率は、式(3)に示すように、分離が生じる時と生じない時の重心位置の差($y-y_0$)と試料の高さの半分との比とされている。分離が生じない時の重心位置 y_0 は、右室に流れたコンクリートの高さと同じである標準砂を使って計測された。

3. 流動による分離の影響要因に関する実験的考察

3.1 コンクリート用材料と調査

この実験に用いたコンクリートの調査およびフレッシュ時の性状を表-3 に示す。せん断応力と垂直応力の影響を考察する実験に、シリーズ C1 の試料を使った。また、細骨材率と粗骨材の粗粒率の影響を考察する実験に、それぞれシリーズ C2~C4 の試料およびシリーズ C5~C7 の試料を用いた。

コンクリートの製造に使用した材料は、普通ポルトランドセメント（比重が 3.16g/cm^3 ）、海砂（表乾密度： 2.62g/cm^3 、粗粒率：1.79、吸水率：0.75%）、砕石 R_{20} （粒径：5~20mm、表乾密度： 2.73g/cm^3 、粗粒率：6.66）、砕石 R_{40} （粒径：20~40mm、表乾密度： 2.73g/cm^3 、粗粒率：8.0）および高性能 AE 減水剤である。

3.2 実験結果及び考察

(1) 応力の影響

せん断応力と垂直応力が流動過程中的の試料の分離程度に与える影響を考察したために、試料の上表面に異なる重りを加えることによって、実験を行った。せん断応力の影響を考察した場合には、重りを左室の試料の上表面に加える。せん断応力が重りと試料の自重によるものであるため、試料が右室に流れるにつれて、せん断応力が小さくなる。試料に作用するせん断力の平均値は、式

(4) によって計算される。

$$\tau = \frac{F_l}{2S} + \frac{1}{4} \rho g [(H_0 - 0.07) + (H_l - H_r)] \quad (4)$$

ここに、

τ : せん断応力 (Pa)

F_l : 左室の試料の上に置いた重りの重量 (N)

ρ : 試料の単位体積質量 (kg/m^3) であり、左右室にある試料の密度の差を無視して初期値とされている

g : 重力加速度 ($=9.8\text{mm/s}^2$)

H_0, H_l : 流動前、後に左室の試料の高さ (m)

H_r : 流動後に右室の試料の高さ (m)

S : 左、右室の断面積 ($0.20 \times 0.18 = 0.036\text{m}^2$)

一方、試料のせん断流動面に作用する垂直応力の影響を考察する実験では、せん断応力の条件を一定にするために、両側試料の上表面に重りを共に加え、垂直応力の大きさを調節するとき、両側の重りを同等に増減してその差を一定とした。右室のコンクリート試料に重り（発泡スチロール板を使う）を加える時期は、右室の試料の高さが仕切りゲートの開口部を超えるときである。試料のせん断流動面に作用する垂直応力の平均値は、式(5)によって求められる。

$$\sigma_v = \frac{F_s}{S} + \frac{1}{2} \rho g (H_l + H_r - 0.14) \quad (5)$$

ここに、

σ_v : 垂直応力 (Pa)

F_s : 両側の試料の上に加えた重りによる圧力の和 (N)

実験結果として、図-3 に右室の試料の重心偏差率と平均せん断応力の関係を示す。実験結果がばらつきで、重心偏差率と平均せん断応力の相関が見られなかった。これは、計算した平均せん断応力が試料のすべり抵抗によって実際のせん断応力と不一致したためであると考えている。

表-3 試験に用いたコンクリートの調査およびフレッシュ時の性質

シリーズ	調査			単位量(kg/m^3)					フレッシュ時の性状		
	W/C (%)	S/a (%)	単位粗骨材量 (m^3/m^3)	W	C	S	G	SP (C×%)	t_{50} (s)	Sf. (mm)	Sl. (cm)
C1	46.6	44	0.357	185	398	788	976	1	0.13	560	26.5
C2	46.6	41	0.381	185	398	732	1025	0	0.12	580	26.5
C3	46.6	38	0.399	185	398	667	1090	0	1.48	480	25.2
C4	46.6	36	0.432	185	398	637	1181	0	2.38	500	25.5
C5	46.6	42	0.381	185	398	732	205*+820**	0	0.92	555	25.8
C6	46.6	42	0.381	185	398	732	512*+513**	0	1.21	550	26.3
C7	46.6	42	0.381	185	398	732	820*+205**	0	0.75	510	24.5

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, * : 砕石 R_{20} , ** : 砕石 R_{40} , SP : 高性能 AE 減水剤, t_{50} : 50cm フロー時間, Sf. : スランプフロー, Sl. : スランプ

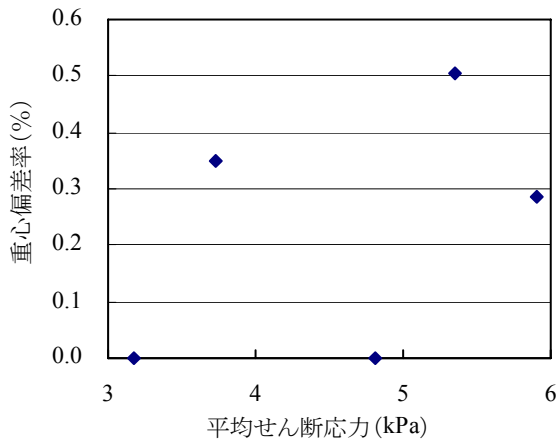


図-3 フレッシュコンクリートの流動後の重心偏差率に与えるせん断応力の影響

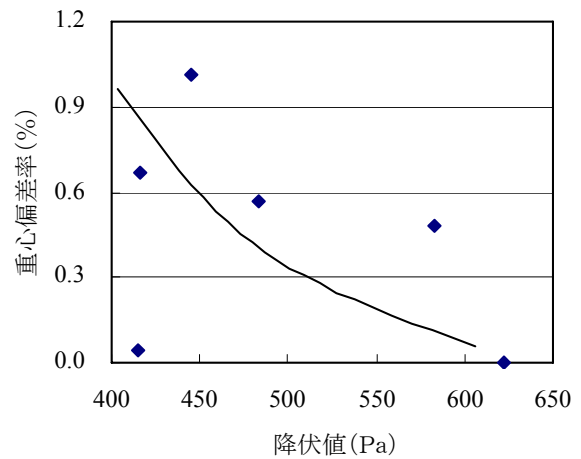


図-5 分離程度に及ぼす降伏値の影響

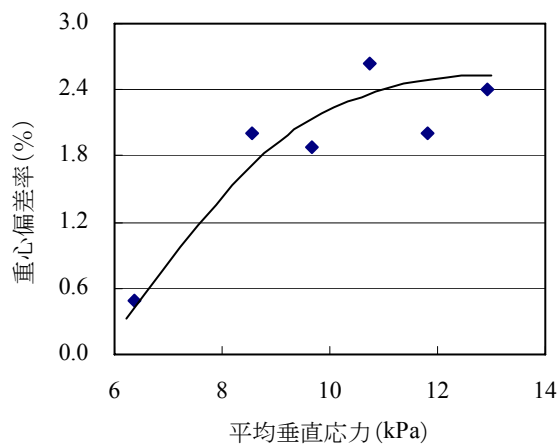


図-4 フレッシュコンクリートの流動後の重心偏差率に与える垂直応力の影響

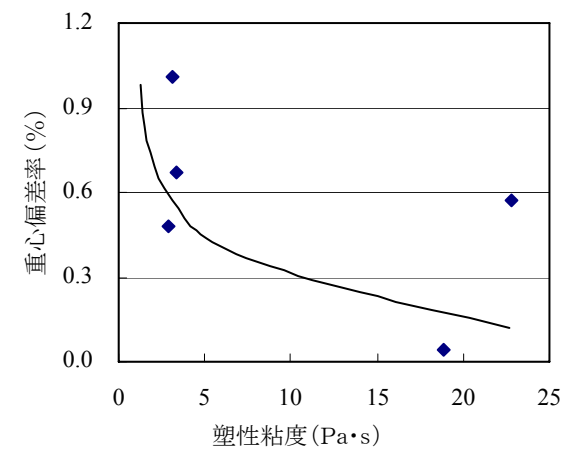


図-6 分離程度に及ぼす塑性粘度の影響

また、平均せん断応力が同じ (3.6 kPa) である場合のせん断面上の垂直応力と試料の重心偏差率の関係を図-4 に示す。同図によれば、試料の重心偏差率は垂直応力の増加に伴って大きくなるが、ある垂直応力 (この実験では、約 10kPa) に達すると、あまり増加しない傾向が見られた。垂直応力の増加に伴い、ブリーディング水が上昇し、粗骨材の沈降分離が発生して、試料の重心位置が下降する。しかし、垂直応力をさらに増加すると、試料への拘束が増大するため、内部摩擦抵抗が大きくなり、粗骨材の沈降分離が発生しにくく、試料の重心位置はあまり変化していない。

(2) 流動性の影響

フレッシュコンクリートのスランプとスランプフローおよび 50cm フロー時間の測定結果によって、小村ら⁵⁾は提案したコンクリートのビンガム定数の算定式(式(6)、式(7)を参照)を用いて、各試料の降伏値と塑性粘度を求めた。

$$\tau_y = \frac{4\rho GV}{\sqrt{3\pi Sf^2}} \quad (6)$$

$$\eta_{pl} = 125.3 \left(1 - \frac{4 \times 10^4}{Sf^2} \right) \left(1 - \frac{25 \times 10^4}{Sf^2} \right) t_{500} \quad (7)$$

ここに、

τ_y : 降伏値 (Pa)

Sf : スランプフロー (mm)

ρ : 単位容積質量 (g/mm³)

G : 重力加速度 (mm/s²)

V : 試料の体積 (mm³)

η_{pl} : 塑性粘度 (Pa·s)

t_{500} : スランプフローが 500mm 到達するまでの所要時間 (s)

図-5 と図-6 に、得られたビンガム定数と重心偏差率の関係を示す。これらの図によれば、フレッシュコンクリートの流動後の重心偏差率は、その降伏値と塑性粘度の増加に伴って小さくなることが分かった。即ち、降伏値または塑性粘度が大きくなると、内部摩擦とモルタルの連行力が增大するため、粗骨材の沈降分離しにくいと思われる。

図-7～図-9 に、試料のスランプ、スランプフロー及

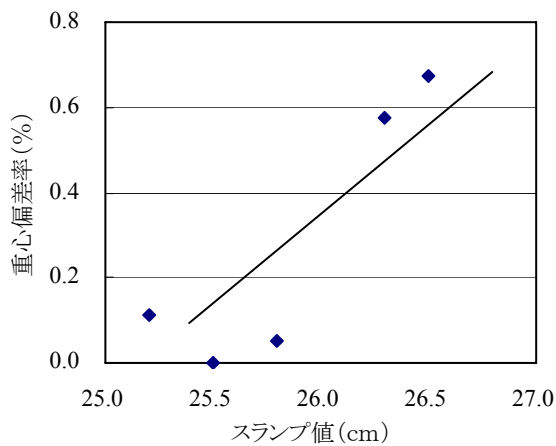


図-7 分離程度に及ぼすスランプの影響

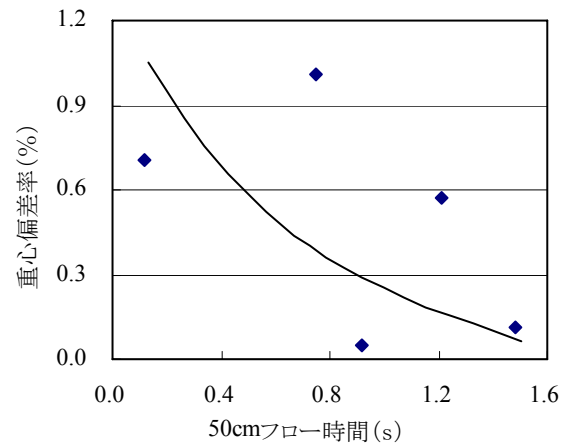


図-9 分離程度に及ぼす50cmフロー時間の影響

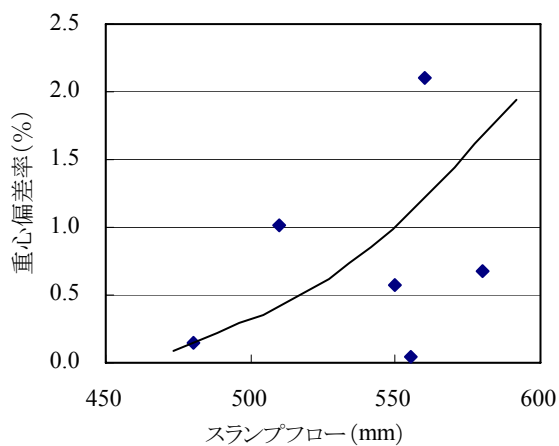


図-8 分離程度に及ぼすスランプフローの影響

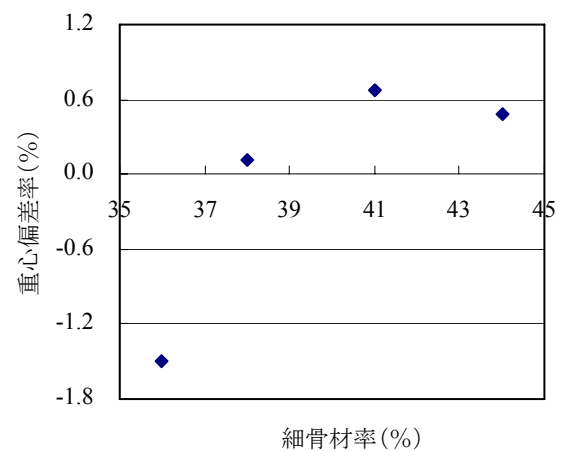


図-10 重心偏差率と細骨材率の関係

び50cmフロー時間と重心偏差率の関係を示す。これらの図から、流動過程中に発生するフレッシュコンクリートの粗骨材分離の程度は、コンクリートのスランプまたはスランプフローの増加に伴って大きくなるが、50cmフロー時間の増加に伴って減少する傾向が見られた。これは、試料のスランプ及びスランプフローが大きいと、内部摩擦抵抗およびマトリックスモルタルと粗骨材間の付着力が小さいため、粗骨材がマトリックスモルタルから分離しやすくなるためと考えられる。一方、50cmフロー時間が長い場合、コンクリートの粘性が高く、モルタルと粗骨材間の付着力が大きくなるため、材料の分離が生じにくくなる。

図-7～図-9に示す重心偏差率(分離程度)と流動性との関係の傾向は一般の知見と一致しており、提案した評価試験法の可能性が示された。

(3) 調合の影響

図-10は、細骨材率と試料の重心偏差率の関係を示すものである。この実験の細骨材率の範囲(36%~44%)では、試料の重心偏差率、すなわち、試料の粗骨材の分離程度は、細骨材率の増加に伴って一定の変化傾向を示

していない。表-3に示すように、図-10中の各細骨材率をもつコンクリートの流動性(スランプフロー)が異なる。細骨材率が41%であるシリーズC2のスランプフローが最も大きいのは、細骨材の表面水率の変動や測定誤差に起因したことでありと考えている。また、細骨材率が44%であるシリーズC1に高性能AE減水剤を使ったため、そのスランプフローが大きい。図-8に示すように、フレッシュコンクリートの流動後の重心偏差率は、そのスランプフローに大きく依存する。スランプフローが大きいほど、分離しやすい。したがって、本研究では重心偏差率への細骨材率の影響が見られなかったのは、材料の計量誤差および細骨材表面水率の変動などの影響に覆い隠されたためでありと考えている。

細骨材率が36%であるときの重心偏差率は負の値になる理由として、コンクリートの細骨材率は非常に小さいとき、コンクリートが分離しやすいため、多くの粗骨材はU型充填試験器の右室の下部にゆるく堆積するが、右室の上部はモルタルによって密率的に充填される。このため、上部試料の密度は下部試料より大きくなり、試料の重心はその幾何中心の上に偏移して、得られる重心偏

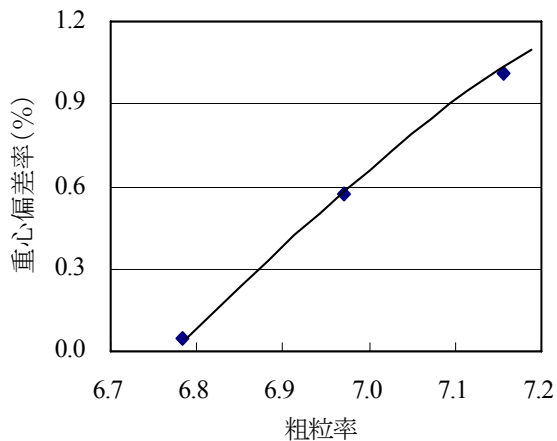


図-11 重心偏差率と粗骨材の粗粒率の関係

差率は負の値になる。

一方、フレッシュコンクリートの流動充填後の重心偏差率と粗骨材の粗粒率との関係を図-11に示す。同図によれば、粗粒率が大きい、即ち、粗骨材が粗いほど、重心偏差率が大きく、フレッシュコンクリートの充填流動による粗骨材の分離程度が大きい。言い換えれば、粗い粗骨材を用いたフレッシュコンクリートの流動に起因する粗骨材の分離に対する抵抗性が小さい。

4. まとめ

本研究では、ガンマ線密度計を用いたフレッシュコンクリートの分離抵抗性の評価試験法を提案した。この方法によって、充填流動したフレッシュコンクリートの粗骨材分離挙動を考察し、分離程度に与える影響要因を検討した。得られた知見が以下のようにまとめられる。

- (1) ガンマ線密度計とU型充填試験器を用いて、試料が流動した後に各試料区間の密度を測定して試料の重心偏差率を算定することによって、フレッシュコンクリートの分離抵抗性を評価することが可能である。
- (2) 打設流動に起因するフレッシュコンクリートの粗骨材分離挙動は、せん断応力とせん断面上の垂直応力に依存する。粗骨材の分離程度は、垂直応力の増加に伴って最初に増大するが、ある垂直応力になるとあまり増加しない。
- (3) フレッシュコンクリートが流動後の粗骨材の分離程度は、その流動性の影響も受ける。スランプとスランプフローが大きい、または50cmフロー時間が小さいほど、粗骨材の分離程度は大きい。
- (4) 粗骨材の粗粒率が大きいほど、フレッシュコンクリートが流動した後の分離程度は大きい。今回の実験では、フレッシュコンクリートの流動充填による分離程度への細骨材率の影響が認められなかった。

本研究は、ガンマ線密度計を用いた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

開発の基礎的段階にあるため、未解明のことがまだ多く残られている。今後、U型充填試験器内に流動充填したフレッシュコンクリートに対して粗骨材の洗い試験を行い、その実験結果とガンマ線密度計を用いた実験の結果を比べて、重心偏差率 S_a の値と粗骨材分離程度との関係、 S_a の粗骨材分離抵抗性評価への適用限界および分離が生じないと判断する S_a 値の上限などを明らかにし、分離程度に与える各要因の影響をより定量的考察する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) M. Mahoutian, I. Yadegaran, N. A. Libre, and M. Shekarchi : Comparison between Different Test Methods Used For Evaluation of Self-Compacting Concrete's Stability, *Proceedings of 5th International RILEM Symposium on Self-Compaction Concrete*, pp. 103-109, 2007.9
- 3) 渡辺健治・後藤和正・早川光敬・黒羽健嗣：コンクリートの分離抵抗性の試験方法、日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.473-474, 1995.8.
- 4) 張 文博・李 柱国・飯高 稔・山本泰彦：フレッシュコンクリートの分離抵抗性の定量的評価方法に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.30, pp.37-40, 2007.3.
- 5) 小村理恵・谷川恭雄・森 博嗣・黒川義幸：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的研究、日本建築学会構造系論文集, No.462, pp.1-10, 1994.8.