

論文 フレッシュコンクリートの振動締固めによる粗骨材沈下に関する研究

森田 篤史*1・飯坂 武男*2・梅原 秀哲*3・稲熊 唯史*4

要旨: 振動締固めによるフレッシュコンクリートの材料分離に及ぼす影響を定量的に明らかとするため、フレッシュコンクリートの特性値としてマトリックスモルタルのレオロジー特性、粗骨材粒度、単位粗骨材容積を因子として設定し、振動締固め試験を行い粗骨材の沈下の程度を画像処理によって定量的に評価した。その結果、振動締固めによる粗骨材の沈下の有無や、その程度はマトリックスモルタルの降伏値によって依存し、粗骨材粒径が大きくなり、単位粗骨材容積が少ないコンクリートほど粗骨材は沈下しやすいことが明らかとなった。

キーワード: 2相材料, マトリックスモルタル, 降伏値, 粗骨材粒度, 単位粗骨材容積

1. はじめに

従来、コンクリート打設では型枠内への密実な充填を目的として振動締固めが行われている。振動を与えたフレッシュコンクリートのコンシステンシーは、性状を大きく変化させ見掛け上スランプが大きくなるコンクリートとなる。この効果によって比較的小さいスランプのコンクリートであっても間隙の少ない鉄筋配筋や複雑な形状の断面の打設を可能としている。振動による締固め効果は振動力が過大になるとコンクリートは材料分離を起してしまうが振動による骨材の沈下現象は目視によって観察する事が出来ない。

本研究は、フレッシュコンクリートの材料分離の中で外部振動によるマトリックスモルタルと粗骨材の分離を取り上げ、フレッシュコンクリートに与える振動と粗骨材分離の関係について、振動締固め試験と画像処理によって定量的に評価した。また、マトリックスモルタルのレオロジー特性、粗骨材粒度分布、単位粗骨材容積が粗骨材沈下に与える影響を明らかとすることを目的とした。

2. 使用材料および配合設計

2.1 使用材料

本研究に使用した材料の緒元を表-1に示す。

実験の主旨よりマトリックスモルタル中の粗骨

表-1 使用材料

材料区分	記号	種類・銘柄・品質・特徴
セメント	C	ホワイトセメント
		密度3.05g/cm ³ 比表面積3700cm ² /g
混和材	SF	シリカフェーム 密度2.20g/cm ³ 比表面積200000cm ² /g
細骨材	S	三重県産川砂, 表乾比重2.62 FM2.94, 実積率66.3%
粗骨材	G	三重県産碎石, 表乾比重2.64 FM6.35, 実積率61.9%
混和剤	HP	高性能減水剤
	SP	ポリカルボン酸系
	AQ	水中不分離性混和剤 遅延型, セルロース系

表-2 粗骨材の種類

種類	mm 粒径	mm 最大寸法	F.M
G	2.5~15	15	6.35
G ₁	2.5~5	5	5.00
G ₂	5~10	10	6.00
G ₃	10~15	15	7.03

*1 名城大学大学院生 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 名城大学助教授 理工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

*4 東海コンクリート工業 (株) 技術開発部 (正会員)

材の分布を明確にするため、セメントはホワイトセメントを使用した。また、混和材料はシリカフューム、水中不分散性混和剤、高性能減水剤、細骨材は三重県産川砂、粗骨材は三重県産碎石をふるい分けし3水準の単一粒度分布(G_1, G_2, G_3)と連続粒度分布のGを使用した。4水準の粗骨材の物性を表-2に示す。

2.2 実験概要およびマトリックスモルタルの配合

本研究はフレッシュコンクリートをマトリックスモルタルと粗骨材の2相材料と仮定し、外部振動による粗骨材の分離の要因としてマトリックスモルタルのレオロジー特性、粗骨材の粒度、単位粗骨材容積の3因子を取り上げ、この3因子を各シリーズにおいて変動させた実験を行った。Series Iにおいては粗骨材を1種類、単位粗骨材容積を $0.16\text{m}^3/\text{m}^3$ と一定としてマトリックスモルタルのレオロジー特性を7水準、Series IIにおいてはマトリックスモルタルのレオロジー特性、単位粗骨材容積を一定として、使用する粗骨材を4水準、Series IIIについてはマトリックスモルタルのレオロジー特性、粗骨材を1種類として単位粗骨材容積を3水準変動させたフレッシュコンクリートをサンプルとして振動締め試験を行った。各シリーズの実験概要を表-3、マトリックスモルタルの配合を表-4に示す。

3. 実験方法

3.1 振動締め試験

振動締め試験(図-1)は、フレッシュコンクリートに外部振動を与えることよりマトリックスモルタルと粗骨材を強制的に分離させる試験方法である。

練混ぜ後、フレッシュコンクリートを圧縮強度試験用型枠 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ に3相に分けて打ち込み(各層突き棒で15回突く)、振動台に型枠ごと固定し一定の振動を0,120秒間の2水準与え、材令3日において脱型しコンクリートカッターで供試体を図-1の位置 h で6個に切断する。切断後、各切断面における粗骨材の面積 S_g を画像処理

PCによって測定する。

画像処理の過程を図-2に示す。切断した供試体の断面をデジタルカメラによって撮影し、画像処理PCによって2値化処理(白:ペースト,黒:骨材)、ノイズ(細骨材)の消去処理を行い、黒色部分(粗骨材)の面積を測定し、底面から h の位置の粗骨材面積率 S_h を式(1)によって算出する。

$$S_h = \frac{S_g}{S_t} \quad (1)$$

ここに S_h :粗骨材面積率, S_g :粗骨材(黒色)の面積, S_t :全断面積

3.2 マトリックスモルタルのレオロジー試験

マトリックスモルタルのレオロジー一定数はツープイントテスト(図-3)によって測定を行う。

練混ぜ後、試料を三層に分け、各層を20回ずつ

表-3 実験概要

Series	変動因子	マトリックスモルタル	粗骨材	単位粗骨材容積 (m^3/m^3)
Series I	マトリックスモルタル	M-1, 2, 3, 4, 5, 6	G	0.16
Series II	粗骨材粒度	M-6	G, G_1, G_2, G_3	0.16
Series III	単位粗骨材容積	M-6	G	0.16, 0.26, 0.36

表-4 マトリックスモルタルの配合

No.	kg/m^3						
	W	C	SF	S	SP	HP	AQ
M-1	259	997	38	1035	11.4	0.0	0.0
M-2	316	791	0	1108	0.0	7.9	2.4
M-3	298	746	0	1193	0.0	7.5	2.0
M-4	364	1198	0	636	0.0	0.0	0.0
M-5	298	746	0	1193	0.0	0.0	0.0
M-6	363	1199	0	636	0.0	12.0	2.0

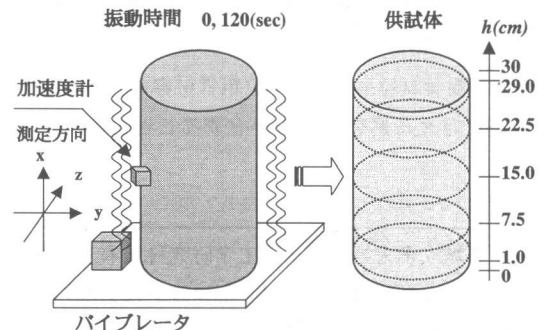


図-1 振動締め試験の概要

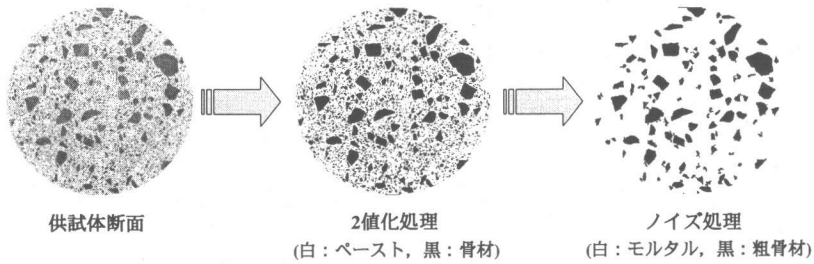


図-2 画像処理の過程

突き固めながらコンクリートパンに詰め、回転数を 5rev/min ピッチで 0~50rev/min まで回転数を変化させ、各回転数段階毎に反力トルクを計 40 回測定し、その平均をトルク値とした。トルク値と回転数の関係より直線式(2)を求め h 、 g を算出する。

$$T = g + hN \quad (2)$$

ここに T :トルク値(N・m), N :回転数(rev/sec),
 h : 見掛けの塑性粘度, g : 見掛けの降伏値

使用した回転翼は、予めキャリブレーションにより見掛けのレオロジー定数を物理量であるレオロジー定数に換算できる装置定数を求めており、計測された見掛けのレオロジー定数を式(3)、(4)に代入することによってレオロジー定数を算出する¹⁾。

$$\eta_{pl} = K_{\eta} \times h \quad (3)$$

$$\tau_f = K_{\tau} \times g \quad (4)$$

ここに η_{pl} :塑性粘度(Pa・sec), τ_f :降伏値(Pa),
 K_{η} : 塑性粘度の換算係数, K_{τ} : 降伏値の換算係数 ($K_{\eta}=3.25$, $K_{\tau}=61.1$)

なお 1 回の実験に要した時間は試料をコンクリートパンに詰め始めてから測定終了まで約 5 分程度であり、試験中の流動性の変化の影響が極力少なくなるよう配慮した。

3.3 振動加速度および周波数の測定

フレッシュコンクリートに与えた振動は供試体型枠に設置した加速度センサー(振動台からの距離 15cm)により各 3 方向の時刻歴振動波形を測定し、式(5)により合成振動波形を算出し、最大加速度を FFT 解析により卓越周波数を測定した。

$$F(t) = f_x(t) + f_y(t) + f_z(t) \quad (5)$$

ここに $F(t)$:合成振動波形, $f_x(t)$: x 方向の振動

波形, $f_y(t)$: y 方向の振動波形, $f_z(t)$: z 方向の振動波形

振動測定結果を図-4 に示す。よって振動締め試験においてフレッシュコンクリートに与えた最大加速度は 2.13G, 振動周波数は 117Hz である。本実験で用いた振動機は、プレキャストコンクリート製品の製造において、型枠パイプレータとし

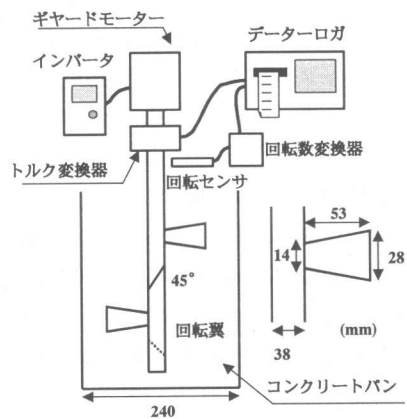


図-3 ツーポイントテスト

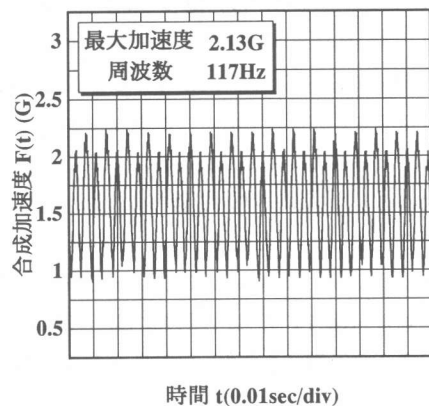


図-4 合成波形

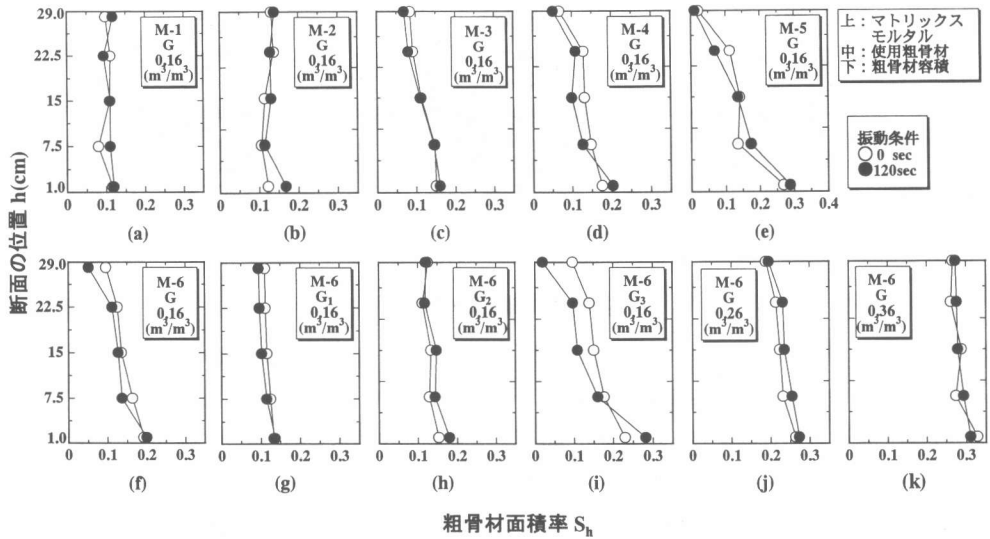


図-5 各断面位置の粗骨材面積率

て使用されている機材のうち比較的小型の振動機を用いており、試験装置の重量と合わせると通常のプレキャストコンクリート製造時に与える振動と同等か若干上回っている程度である。

4. 実験結果および考察

すべての供試体の切断位置 h における粗骨材面積率 S_h の関係を図-5 に示す。ここでの凡例の上段はコンクリートを構成するマトリックスモルタルの種類、中段は使用した粗骨材の種類、下段は単位粗骨材容積を示している。

4.1 マトリックスモルタルのレオロジー特性と粗骨材沈下 (Series I)

Series I での実験結果は、図-5 の(a)~(f)を示しており、コンクリートを構成するマトリックスモルタル部分のみを変動させた場合での鉛直方向の粗骨材分布を示している。ここでツーポイントテストによって測定された6種のマトリックスモルタルのレオロジー特性を図-6 に示す。

筆者等はフレッシュモルタルに振動を与えると降伏値が見掛け上減少することを実験的に確認しており(図-7)²⁾、この効果によって粗骨材が沈下すると予測できるが、マトリックスモルタルがM-1, 2からなるフレッシュコンクリートについては粗骨材率が切断位置に関係なく直線分

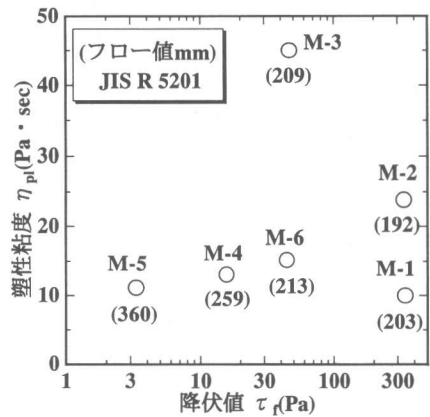


図-6 マトリックスモルタルのレオロジー特性

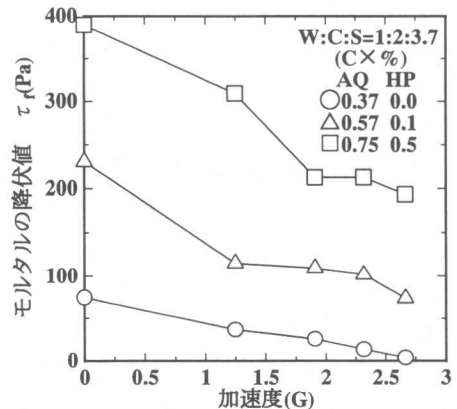


図-7 振動加速度とモルタルの降伏値

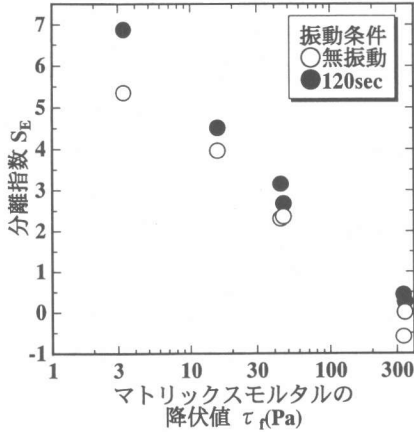


図-8 マトリックスモルタルの降伏値と分離指数

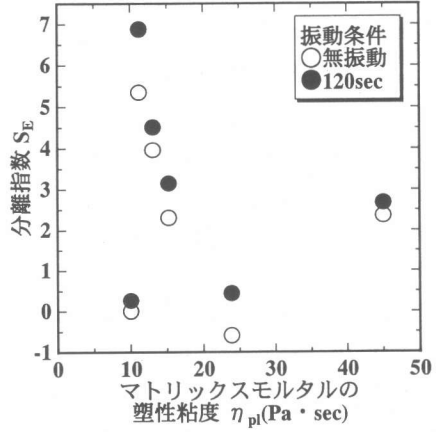


図-9 マトリックスモルタルの塑性粘度と分離指数

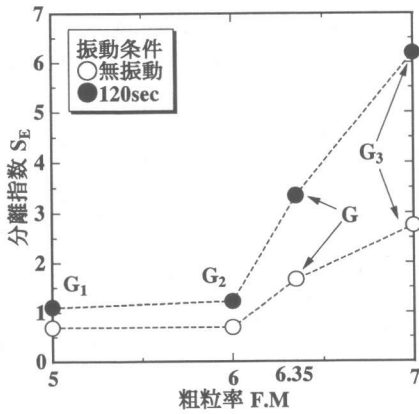


図-10 粗骨材粗粒率と分離指数

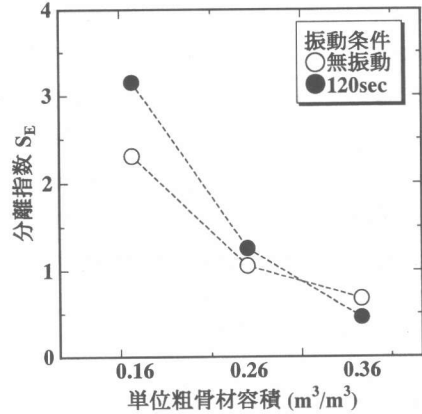


図-11 単位粗骨材容積と分離指数

布を示しており粗骨材の沈下は確認できない。また振動を与えても多くの粗骨材の沈下は見られない。M-3, 4, 5, 6 からなるコンクリートについては無振動の状態でも粗骨材の分離が確認でき、振動を与えるとさらに粗骨材が沈下している。

ここで粗骨材の材料分離の程度を定量的に表す評価値として式(6)で得られる分離指数 S_E を用い、図-8、図-9 にマトリックスモルタルの降伏値、塑性粘度との関係を示す。分離指数 S_E は粗骨材分布の重心の移動距離を示し、分離指数が大きいもの程、粗骨材は沈下していることになる。

$$S_E = 15 - \frac{\sum S_h h}{\sum S_h} \quad (6)$$

ここに S_E : 分離指数, S_h : 底面から h cm の断

面における粗骨材面積率, h : 底面からの距離(cm)

塑性粘度と分離指数については、相関性は見られないが、降伏値と分離指数については降伏値が小さいほど分離指数は大きい。また、同水準の降伏値である M-3, M-6 からなるコンクリートの分離指数を比べると塑性粘度の大きな M-3 からなるコンクリートのほうが分離指数は小さい。

よって振動によるフレッシュコンクリートの粗骨材沈下の有無やその程度は、マトリックスモルタルのレオロジー特性の中でも特に降伏値に依存し、マトリックスモルタルの降伏値が大きなものほど粗骨材沈下に対する抵抗性が改善される。しかし、マトリックスモルタルの降伏値は振動加速度が大きくなるほど減少するため過度の加振は粗骨材の沈下に対する抵抗性を低下させることにな

る。また降伏値が同等の場合は塑性粘度が大きなものほど粗骨材は沈下しない。

4.2 粗骨材粒度と粗骨材沈下 (Series II)

Series II での実験結果は、図-5 の(f)~(i)を示しており、粗骨材の粒径のみ変化させた場合での鉛直方向の粗骨材分布を示している。

マトリックスモルタル M-6、単位粗骨材容積 $0.16\text{m}^3/\text{m}^3$ と一定として粗骨材の粒度を 4 水準変動させた場合の分離指数 S_E と各粗骨材の粗粒率の関係を図-10 に示す。

G_1 は粒径 2.5~5.0mm, G_2 は 5.0~10.0mm, G_3 は 10.0~15.0mm である。粗骨材の粒度によって粗骨材の分布が異なり、 G_1, G_2 においては多くの粗骨材沈下は見られないが、 G_3 においては明らかに粗骨材は分離をしている。これにより粗骨材の粒径によって粗骨材の沈下挙動は異なり、大きな骨材ほど沈下することが確認できる。また、連続粒度分布の G と比べると G_1, G_2 の分離指数は下回っているが G_3 の分離指数は上回っている。これは、連続粒度分布の粗骨材を各粒径の粗骨材に分類して検討すると、連続粒度分布の粗骨材の沈下は、大きな粒径の粗骨材に起こりやすく、比較的小さな粒径の粗骨材については起こりにくいことが確認され、振動により大きな骨材ほど影響を受け、沈下量が増す。

4.3 単位粗骨材容積と粗骨材沈下 (Series III)

Series III での実験結果は、図-5 の(f), (j), (k)を示しており、単位粗骨材容積のみを変化させた場合での鉛直方向の粗骨材分布を示している。

単位粗骨材容積と分離指数 S_E の関係を図-11 に示す。粗骨材容積の多いコンクリートほど粗骨材の分離は少ないことが確認できる。これは単位粗骨材容積の少ない場合については、粗骨材間の距離が長くなり粗骨材同士は接触をしないため粗骨材の沈下が発生しやすいが、粗骨材容積が大きな場合は粗骨材間の距離が短くなり、粗骨材同士が重なり合い沈下方向に力を及ぼし合う相互作用が大きくなったことにより粗骨材の沈下に対する抵抗性が改善されたと思われる。

以上より振動締固めは、フレッシュコンクリー

トを打設する際、見掛け上、降伏値を減少させる有効な手段であるが過大な振動を与えるとマトリックス部分の降伏値が大幅に減少し、大きな粒径の粗骨材から沈下する。また単位粗骨材容積によっても沈下の程度は異なる。

5. 結論

フレッシュコンクリートをマトリックスモルタルと粗骨材の 2 相材料と仮定し、マトリックスモルタルのレオロジー特性・粗骨材粒径・単位粗骨材容積を変動させ外部振動による振動締固め実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 振動によるフレッシュコンクリートの粗骨材沈下の有無やその程度は、マトリックスモルタルのレオロジー特性の中でも特に降伏値に依存し、降伏値が大きなもの程、粗骨材は沈下しない。
- (2) フレッシュコンクリートの振動締固めによる粗骨材の沈下は、マトリックスモルタルの降伏値が見掛け上、減少することが要因である。
- (3) マトリックスモルタルの降伏値が同等の場合は塑性粘度が大きなものからなるコンクリート程、粗骨材は沈下しない。
- (4) マトリックスモルタルのレオロジー特性が同等の場合でも粗骨材の粒径によって沈下挙動が異なり、大きな粒径の粗骨材ほど沈下しやすい。
- (5) 粗骨材容積によっても粗骨材の沈下挙動は異なり、単位粗骨材容積が多いコンクリートほど粗骨材沈下に対する抵抗性は大きくなる。

参考文献

- 1) 森田篤史, 荒木俊行, 飯坂武男, 稲熊唯史: フレッシュモルタルのレオロジー的評価方法に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.297-303, 2000
- 2) 森田篤史, 飯坂武男, 稲熊唯史: 振動下におけるフレッシュコンクリートのレオロジー特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.415-420, 2000