

# 論文 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

森田 篤史\*1・飯坂 武男\*2・稲熊 唯史\*3

**要旨:** 振動を受けたフレッシュコンクリート挙動の変化を明らかにするため、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材の2相材料として考え、モルタル部分のレオロジー特性と混入される粗骨材量を因子として設定し、高周波振動を与えレオロジー特性の変化について実験的に検討した。その結果、高周波振動を与えると塑性粘度には大きな変化はないが降伏値は減少し、モルタル部分の降伏値が大きいほど、その減少量が大きい。また、同一のレオロジー特性を持つモルタルにおいても、単位粗骨材量の増加に伴って振動によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数の変化量も増加するなどのことが明らかとなった。

**キーワード:** 2相材料, 単位粗骨材容積, 高周波振動, レオロジー特性, ツーポイントテスト

## 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かけ上スランプが大きな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が、その施工は経験的なノウハウに頼って行われているのが現実である。

そこで本研究は、振動を受けたフレッシュコンクリート挙動の変化を明らかにすることを目的として、コンクリートの流動性において支配的な影響を及ぼす構成をモルタルと粗骨材の2相材料として考え、モルタルのレオロジー特性とモルタルに混入される粗骨材量を変動因子に設定した。そしてツーポイントテストによりフレッシュコンクリートのレオロジー特性を把握し、次にフレッシュコンクリートに高周波振動を与え、その挙動の変化をレオロジー定数によって定量的に評価した。

## 2. 使用材料および配合

実験に使用した材料の諸元を表-1に示す。

配合は構成する材料(セメント, 水, 細骨材)の比率を変化させない目的で、水中不分離性混和剤と高性能減水剤の添加量のみを変化させて、異なったレオロジー特性を持つ3種類の基本モルタル

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	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積3290cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	三重県産川砂, 表乾比重2.61g/cm <sup>3</sup> FM2.74, 実積率61.4%
粗骨材	G	三重県産碎石, 表乾比重2.61g/cm <sup>3</sup> FM6.37, 実積率61.0%
混和剤	HP	高性能減水剤 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 基本モルタルの配合

種別	混和剤添加量(Cx%)		単位質量比		
	AQ	HP	W	C	S
I-00	0.37	0			
II-00	0.57	0.1	1	2	3.7
III-00	0.75	0.5			

\*1 名城大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 名城大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

\*3 (株) 東海コンクリート工業 技術部 (正会員)

を設定した。水中不分離性混和剤と高性能減水剤は予め予備実験において、レオロジー定数がほぼ等間隔で変化する特性となるよう添加量を設定した。そして、基本モルタルに対して粗骨材の単位容量が 0, 0.13, 0.23, 0.35, 0.46m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>となるようにコンクリート配合に展開した。

基本モルタルの配合を表-2 に、3 種類の基本配合をもとに設定した 3 シリーズのコンクリートの配合を表-3 に示す。

### 3. 実験概要

練混ぜは、容量 100 リットルの一軸強制練りミキサーを使い、セメント、細骨材、水中不分離性混和剤を投入し 30 秒空練りを行い均一に混ざったことを確認の上、水、高性能減水剤を加え 1 分間、粗骨材を加え 30 秒練り混ぜ、練り上がり温度は 20℃とした。練り混ぜ後、フレッシュコンクリートを投入したコンクリートパンを振動台上に設置して、高周波パイプレーターにより振動を加えてフレッシュコンクリートのレオロジー試験を実施した。今回使用した実験装置の概要を図-1 に示す。

#### 3.1 レオロジー定数測定

ツーポイントテストは G.H.Tattersall<sup>1)</sup>によって提案された試験方法で、回転翼を回転させ、トルクと回転数の関係を測定するが、得られたトルク

と回転数の関係から理論的にフレッシュコンクリートの降伏値及び塑性粘度に換算することは不可能であり試験によって得られたレオロジー定数は見かけの降伏値及び塑性粘度と呼ばれる。

見かけの降伏値及び塑性粘度は、トルク値と回転数の関係より直線式(1)を求め  $h, g$  を算出する。

$$T = g + hN \quad (1)$$

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、

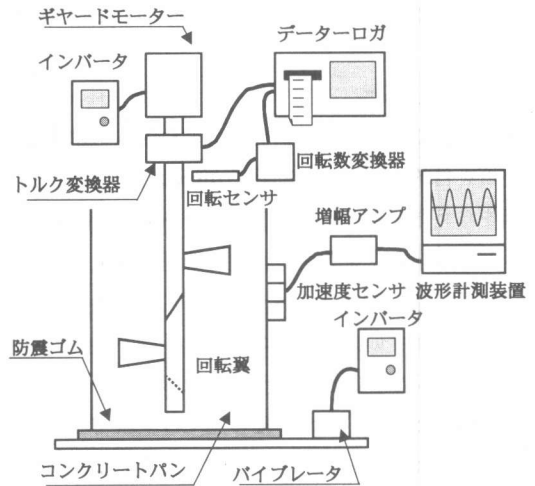


図-1 実験装置

表-3 コンクリート配合

Series	種別	%			単位粗骨材容積 V <sub>G</sub> /V <sub>C</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W/C	AQ	HP		W	C	S	G
Series I	I-00	0.37	0	0	0.00	313.4	626.9	1156.7	0.0
	I-12				0.12	275.0	550.0	1014.8	305.8
	I-23				0.23	237.2	474.4	875.3	606.4
	I-35				0.35	200.0	400.0	738.1	902.1
	I-46				0.46	163.4	326.9	603.1	1192.9
Series II	II-00	50	0.57	0.1	0.00	313.4	626.9	1156.7	0.0
	II-12				0.12	275.0	550.0	1014.8	305.8
	II-23				0.23	237.2	474.4	875.3	606.4
	II-35				0.35	200.0	400.0	738.1	902.1
	II-46				0.46	163.4	326.9	603.1	1192.9
Series III	III-00	0.75	0.5	0	0.00	313.4	626.9	1156.7	0.0
	III-12				0.12	275.0	550.0	1014.8	305.8
	III-23				0.23	237.2	474.4	875.3	606.4
	III-35				0.35	200.0	400.0	738.1	902.1
	III-46				0.46	163.4	326.9	603.1	1192.9

目標空気量4.5%

計測されたトルク値と回転翼の回転数の関係により見掛けのレオロジー定数を求め、式(2)、(3)により装置定数を乗じてレオロジー定数を算出する<sup>2)</sup>。

$$\eta = K_{\eta} \times h \quad (2)$$

$$\tau = K_{\tau} \times g \quad (3)$$

ここに  $\eta$  : 塑性粘度(Pa・sec),  $\tau$  : 降伏値(Pa),  $K_{\eta}$  : 塑性粘度の換算係数,  $K_{\tau}$  : 降伏値の換算係数 ( $K_{\eta}=1.61, K_{\tau}=7.40$ )

今回のレオロジー測定は、練混ぜ後試料を三層に分け、各層を20回ずつ突き固めながらコンクリートパンに詰め、回転数を10rpmピッチで0～80rpm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20回測定し、その平均をトルク値とした。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。

### 3.2 フレッシュコンクリートの振動測定

フレッシュコンクリートに与えた高周波振動はパイプレーターに設置したインバータの周波数を140～240Hzと変化させることによりコントロールした。また与えられた振動はコンクリートパン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(4)により合成振動波形を算出し、最大加速度をFFT解析により卓越振動数を測定した。振動測定の概要を図-2に示す。

$$F(t) = f_x(t) + f_y(t) + f_z(t) \quad (4)$$

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

## 4. 実験結果及び考察

フレッシュコンクリートの練混ぜ状況はいずれの配合においても、材料分離は認められず良好な状態であった。

### 4.1 レオロジー定数の範囲

ツーポイントテストによるフレッシュコンクリ

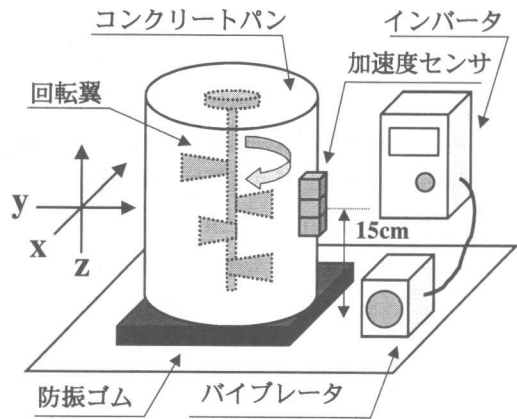


図-2 振動装置と振動方向

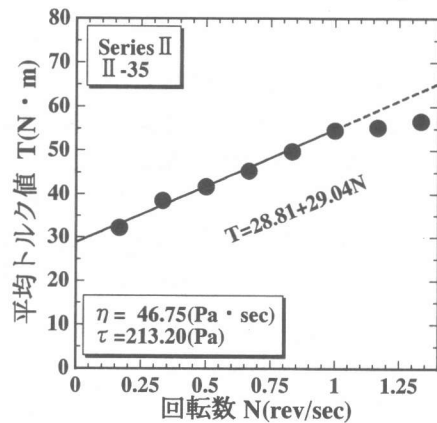


図-3 レオロジー定数測定例

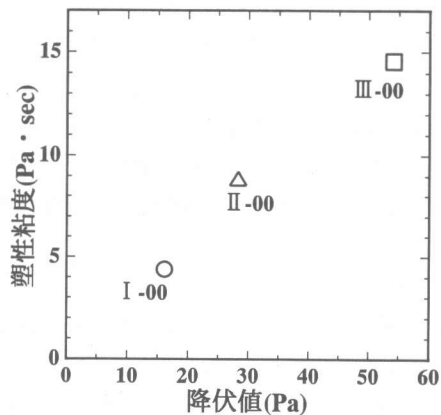


図-4 基本モルタルのレオロジー定数

ートのレオロジー定数測定例を図-3に示す。回転数が1rev/sec以上になるとどの配合においても塑性粘度が下がる現象(チクソトロピー)が確認されたことから、直線近似は回転数が0~1rev/secの区間で解析した<sup>3)</sup>。なお、単位粗骨材容積が $0.46\text{m}^3/\text{m}^3$ のコンクリート配合(I-46, II-46, III-46)は、いずれのシリーズにおいても本実験で使用したツープイントテストでは信頼性の得られる測定は不可能であった。これは、単位粗骨材容量が非常に多いことからフレッシュコンクリートがビンガム体としての挙動から大きく逸脱したためであると考えられる。

無振動時での基本モルタルのレオロジー定数である降伏値をx軸、塑性粘度をy軸にプロットしたものを図-4、同じくコンクリートのレオロジー定数をプロットしたものを図-5に示す。

基本モルタルのレオロジー定数はI-00, II-00, III-00の順で降伏値及び塑性粘度ともに大きくなっている。基本モルタルを含め、実験で使用したコンクリート試料は、降伏値が16~364Pa、塑性粘度が4.3~56.0Pa・secの範囲であり、比較的粘性の高い領域で且つ非常に広範囲の性状のフレッシュコンクリートを対象とした。

#### 4.2 無振動時におけるレオロジー特性

単位粗骨材容積と降伏値、塑性粘度の関係を図-6、図-7に示す。

いずれのシリーズにおいても、単位粗骨材容積が増加するに従って降伏値、塑性粘度ともに増加している。レオロジー定数の変化は、塑性粘度が緩やかに変化していることに対して、降伏値は基本モルタルのレオロジー性質に関わらず、単位粗骨材容積 $0.23\sim 0.35\text{m}^3/\text{m}^3$ の範囲で降伏値の変化が急変する。

#### 4.3 フレッシュコンクリートに与えた振動

振動測定によって得られた各方向の波形、また合成後の波形の一例(インバータ電力周波数180Hz)を図-8、図-9に示す。振動方向により波形が異なっており、これらの波形を式(4)により時刻

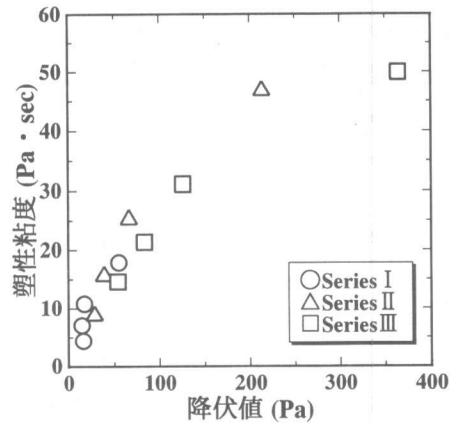


図-5 コンクリートのレオロジー範囲

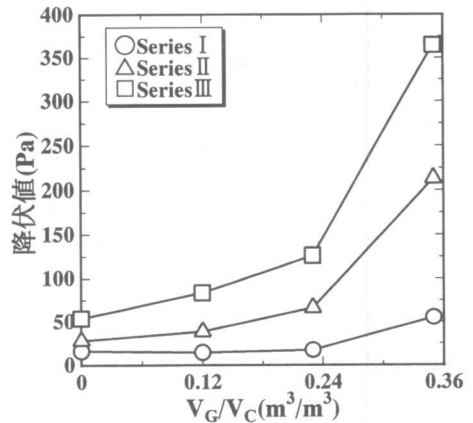


図-6 単位粗骨材容積と降伏値

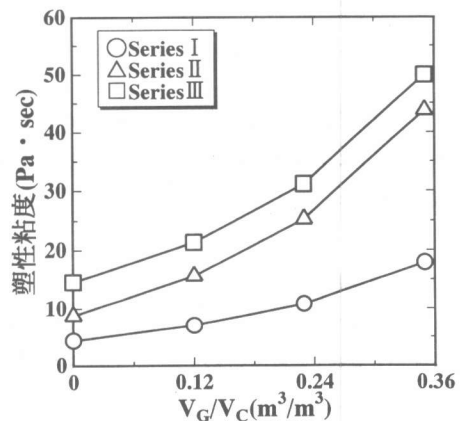


図-7 単位粗骨材容積と塑性粘度

歴で合成し、その最大合成加速度を代表値とした。解析結果を表-4に示す。一般に加速度は、振動数と振幅から求められ振動エネルギー全体を表すと考えられており、本研究においても既往の研究と同様に振動パラメータとして加速度を採用し、最大加速度を1.25~2.85Gの範囲で高周波振動をフレッシュコンクリートに与えた<sup>4)</sup>。

#### 4.4 高周波振動下におけるレオロジー特性

各シリーズにおける高周波振動による降伏値及び塑性粘度の変化を図-10に示す。

##### (1) 高周波振動による塑性粘度の変化

シリーズI, IIでは、高周波振動の有無及び振動加速度の変化によるフレッシュコンクリートの塑性粘度の変化はほとんど無い。またシリーズIIIの基本モルタル(III-00)及びIII-12でも、同様に塑性粘度の変化はないが、単位粗骨材容積が比較的多いIII-23においては、加速度が約1.7Gまでは、塑性粘度の変化はないがそれ以上の加速度を与え

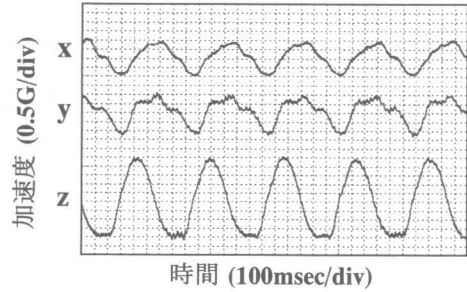


図-8 各方向の振動波形

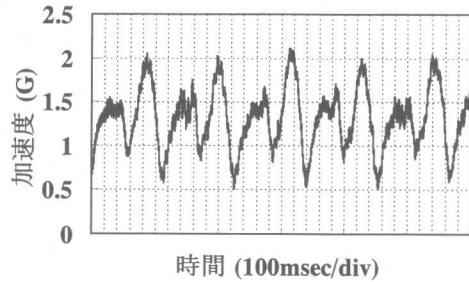


図-9 合成波形

表-4 コンクリートパンの振動

インバータ	電力周波数	Hz	140	160	180	200	220	240
コンクリートパン	振動周波数	Hz	68	78	88	98	107	115
	最大合成加速度	G	1.25	1.78	2.11	2.28	2.58	2.85

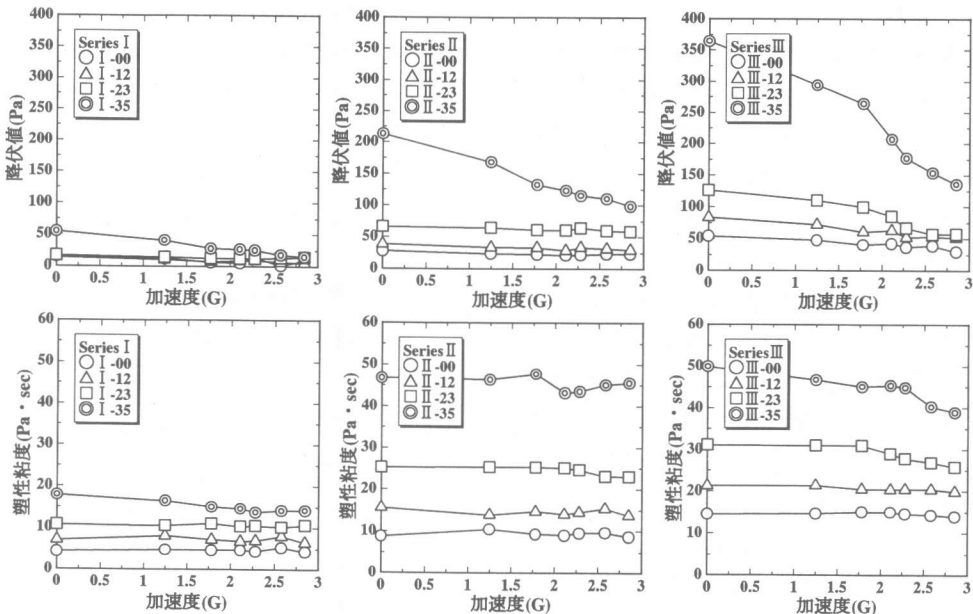


図-10 加速度とレオロジー定数の関係

ると塑性粘度が減少し、Ⅲ-35 においては、与えられた加速度に反比例して全体的に緩やかに減少している。どちらの配合においても、わずかではあるが振動加速度の増加に伴い塑性粘度が減少していることがわかる。

## (2) 高周波振動による降伏値の変化

高周波振動によるフレッシュコンクリートの降伏値の変化に注目すると、シリーズⅠでは、基本モルタル(Ⅰ-00)及びⅠ-12、Ⅰ-23 において降伏値の減少はみられないが、Ⅰ-35 においては緩やかであるが減少している。シリーズⅡにおいても同様に基本モルタル及びⅡ-12、Ⅱ-23 での降伏値の減少はみられないが、Ⅱ-35 においては、減少しその変化量はⅠ-35 に比べ大きいことが確認できる。シリーズⅢでは、すべての配合において降伏値が減少し、粗骨材量が多い配合ほどその変化量は大きい。

塑性粘度と同様、与える加速度が大きいほど降伏値の減少量も大きくなっており、振動による降伏値の減少量は、基本モルタルのレオロジー定数が大ききまた、単位粗骨材容積が多いコンクリートほど大きくなることがわかる。

## 5. 結論

水中不分離性混和剤および高性能減水剤の添加量によりレオロジー定数を変化させたフレッシュコンクリートに高周波振動を与えた実験を実施した結果、以下のような結論を得た。

無振動におけるレオロジー特性について

- (1) モルタル部分のレオロジー特性に関わらず、単位粗骨材容積が増加するとコンクリートの塑性粘度、降伏値ともに増加する。
- (2) 降伏値においては、単位粗骨材容積  $0.23 \sim 0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$  の範囲でモルタル部分のレオロジー特性に関わらず、急激に降伏値が増加する。

振動下でのレオロジー特性について

- (3) フレッシュコンクリートに振動を与えることにより降伏値は減少するが、塑性粘度には大きな変化は見られない。
- (4) 振動による影響は、フレッシュコンクリート

を構成するモルタル部分のレオロジー定数により異なり、大きなレオロジー定数をもつモルタルからなるフレッシュコンクリートは、振動によるレオロジー変化が大きい。

- (5) モルタル部分のレオロジー定数が同一の場合、粗骨材量が多いほど振動によるレオロジー特性の変化は大きい。
- (6) 本実験で使用したフレッシュコンクリート及び振動の範囲では、振動によるレオロジー変化が最も大きい配合において、モルタルのレオロジーに関わらず、降伏値が無振動時に対し約 1/2 に減少する。

## 参考文献

- 1) G.H.Tattersall : The Rheology of Fresh concrete, Pitman Advanced Publishing Program, pp.97-100, 1983
- 2) 森田篤史ほか：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, 2000.3
- 3) 菊川浩治：モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究，土木学会論文集，V-12, pp.109-118,1990.2
- 4) 水口裕之ほか：振動がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に与える影響，セメント・コンクリート論文集，No.46, pp.368-373, 1992.12
- 5) 三好征夫ほか：準高流動および高流動コンクリート中におけるモルタルのレオロジー特性に及ぼす振動の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp.499-504, 1999.6