

論文

[1059] 振動を受けるビンガム流体のコンシステンシーに関するレオロジー的考察

寺西 浩司\*1・谷川 恭雄\*2・森 博嗣\*3・渡辺 健治\*4

1.まえがき

振動締固めは、コンクリート打設において必要不可欠な工程であり、締固めの良否が構造物の品質に大きな影響を及ぼす。しかし、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実状であり、JASS 5 においても締固めの決定要因となる振動機の挿入間隔、時間等については曖昧な記述に留まっている。このような状況は、締固め手法を整備するための根拠となる理論が確立されていないためである。また、最近では、高流動コンクリート等通常のコンクリートとは異なった性状を持つコンクリートも実用化されて、振動がフレッシュコンクリートに与える影響も複雑化しており、すべてのコンクリートについて適切な締固め方法を一義的に規定することは困難となっている。

コンクリートの振動締固めに関する研究は数多く行われており、その大部分は、振動の伝播特性の研究と振動を受けるコンクリートの挙動に関する研究に大別される。前者については理論的な研究も行われているが[1]、後者について理論的な考察を行ったものは少ない[2]。本研究では、振動を受けるフレッシュコンクリートの挙動に関する理論的な予測手法を構築することを目的として、振動下のビンガム流体の挙動についてレオロジーの立場から力学的な考察を行うとともに、モルタルを試料とした振動下の球引き上げ試験を実施した。

2.ビンガム流体の振動挙動の考察

本研究は、高流動コンクリートや高強度コンクリートを対象としたものであり、フレッシュコンクリートに振動を与えたときに生じる材料分離などの性状変化については考慮していない。

2.1 振動時のコンシステンシー曲線

振動による正負繰り返しの応力が降伏値を越え、強制変位が生じ、ひずみ速度が $-\dot{\gamma}_v$ から $\dot{\gamma}_v$ の範囲で変動するビンガム流体(図-1(a)参照)を考える。この流体に外力による一定ひずみ速度 $\dot{\gamma}_t$

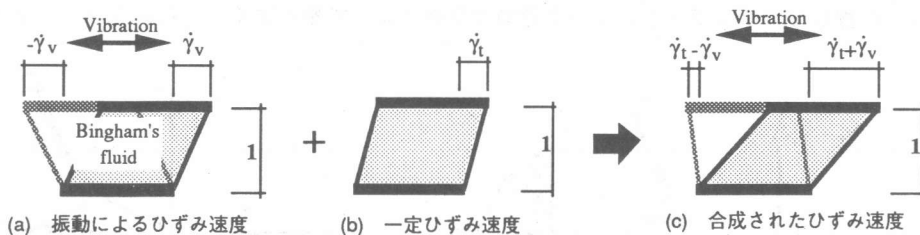


図-1 振動時のせん断モデル

\*1 前田建設工業(株)技術研究所建築材料施工研究室(名古屋大学大学院)、工修(正会員)  
 \*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)  
 \*3 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)  
 \*4 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修(正会員)

が生じた場合（図-1(b)参照）、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の変動範囲は、図-1(c)に示すようになる。

$$\dot{\gamma}_t - \dot{\gamma}_v \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_t + \dot{\gamma}_v \quad (1)$$

式(1)の範囲で変動するひずみ速度に対応して、せん断応力も変化するが、振動の1周期あたりの平均的なせん断応力を $\tau_t$ とする。この運動をコンシステンシー座標で考えるために、ビンガムモデルの負領域を定義すると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} |\tau| \geq \tau_y \text{の時} \quad \tau &= \eta \dot{\gamma} \pm \tau_y \\ |\tau| < \tau_y \text{の時} \quad \dot{\gamma} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $\eta$ ：塑性粘度(Pa·s)

振動の入力波形が正弦波として与えられる場合、 $-\dot{\gamma}_v \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_v$ の範囲における $\dot{\gamma}$ の時間に対する分布の無次元量Nは、ひずみ速度の微分、すなわち加速度曲線を描き、次式で表される。

$$N = \left( \int_{-\dot{\gamma}_v}^{\dot{\gamma}_v} \arccos \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_v} \right| d\dot{\gamma} \right)^{-1} \arccos \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_v} \right| = \frac{1}{2\dot{\gamma}_v} \arccos \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_v} \right| \quad (3)$$

図-2に外力による平均ひずみ速度 $\dot{\gamma}_t$ が生じたビンガム流体に振動が加わった場合のコンシステンシー座標上の振動範囲と分布を示す。式(1)の範囲における平均せん断応力 $\tau_t$ は、以下のようになる。

$$\tau_t = \int_{\dot{\gamma}_t - \dot{\gamma}_v}^{\dot{\gamma}_t + \dot{\gamma}_v} \frac{1}{2\dot{\gamma}_v} (\eta \dot{\gamma} + \tau_y) \arccos \left| \frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_t}{\dot{\gamma}_v} \right| d\dot{\gamma} \quad (4)$$

式(4)を計算して、コンシステンシー座標の全領域について整理すると、振動下のコンシステ

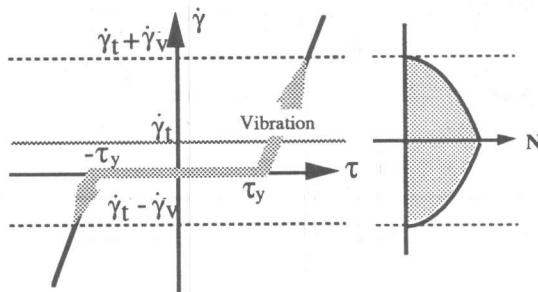


図-2 コンシステンシー座標上の振動範囲とひずみ速度に対する時間分布

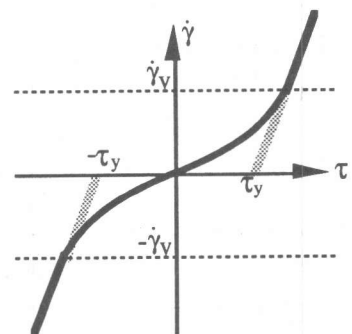


図-3 ビンガム流体の振動コンシステンシー曲線

ンシー曲線は、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 |\dot{\gamma}| > \dot{\gamma}_v \text{ の時} \quad \tau &= \eta \dot{\gamma} \pm \tau_y \\
 |\dot{\gamma}| \leq \dot{\gamma}_v \text{ の時} \quad \tau &= \eta \dot{\gamma} \pm \tau_y \left( 1 + \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_v} \right| \arccos \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_v} \right| - \sqrt{1 - \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_v} \right)^2} \right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

図-3に式(5)によるコンシステンシー曲線を図示する。ビンガム流体の振動下のコンシステンシー曲線（以下、振動コンシステンシー曲線という）は、降伏値はなく  $-\dot{\gamma}_v \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_v$  の範囲（以下、振動範囲という）において原点を通る緩やかな曲線となる。

以上の結果に基づいて、コンクリートが振動を受けて流動化する現象を説明できる。また、これらの結果は、既往の実験結果[3]とも一致する。なお、式(5)から明らかなように、降伏値をもたないニュートン流体に対しては、振動は影響を及ぼさないことになる。

## 2.2 レオロジー定数の影響

図-4は、降伏値が大きく、塑性粘度が小さい場合（普通強度コンクリートを想定）と、降伏値が小さく、塑性粘度が大きい場合（高強度コンクリートを想定）について、それぞれの振動コンシステンシー曲線を示したものである。同図から明らかなように、降伏値が小さいほど、また、塑性粘度が大きいほど、振動によるレオロジー性質の変化が小さくなる。このことは、与える振動が同程度の場合、普通強度コンクリートに比べて高強度コンクリートが流動化しにくい現象と一致する。

## 2.3 振動力の影響

振動によるひずみ速度の最大値  $\dot{\gamma}_v$  が変化した場合の振動コンシステンシー曲線を図-5に示す。 $\dot{\gamma}_v$  が大きくなるにつれて振動範囲は大きくなり、振動コンシステンシー曲線の勾配も大きくなるので、同じせん断応力で大きなひずみ速度を得ることになる。また、 $\dot{\gamma}_v$  は振動波の変位速度の最大値  $V_{max}$  によって決まる値であり、 $V_{max}$  がビンガム流体の振動時のコンシステンシーに直接的な影響を与える。

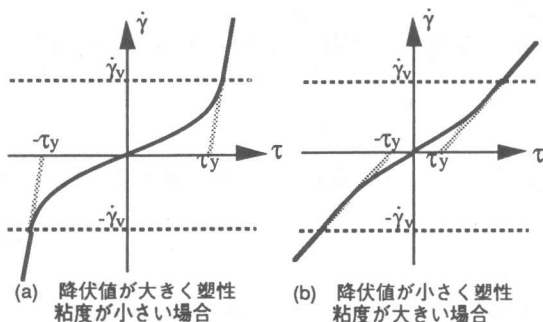


図-4 振動コンシステンシー曲線に及ぼすレオロジー定数の影響

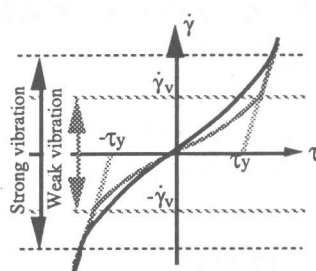


図-5 振動コンシステンシー曲線に及ぼす振動力の影響

### 3. 振動時の球引き上げ試験の考察

振動を受けるビンガム流体に対して球引き上げ試験を行った場合の考察を行う。

まず、振動によるひずみ速度の最大値 $\dot{\gamma}_v$ は、流体中の球に対する運動であるから、変位速度の最大値を $V_{max}$ 、球の半径を $r$ とすると、Ansleyの式より、以下のようになる。

$$\dot{\gamma}_v = \frac{V_{max}}{2r} \quad (6)$$

球引き上げ試験では、通常球を引き上げるためにワイヤーを用いるが、引き上げ方向にひずみ速度が生じた時にワイヤーがたわむため、負領域のせん断力は測定できない。したがって、測定される振動範囲のひずみ速度分布は図-6に示すようになり、この分布における振動コンシステンシー曲線は図-7のようになる。この場合、コンシステンシー曲線は次式に示す見かけの降伏値 $\tau'_y$ をもつ。

$$\tau'_y = \frac{\pi}{16} \eta \dot{\gamma}_v \pm \frac{1}{2} \tau_y \quad (7)$$

式(7)によると、無振動時の $\tau_y, \eta$  および $\dot{\gamma}_v$ が以下の関係にある場合、見かけの $\tau'_y$ が無振動時の降伏値よりも大きく測定されることになる。

$$\frac{\tau_y}{\eta \dot{\gamma}_v} < \frac{\pi}{8} \quad (8)$$

実際の振動台上球引き上げ試験では、少ない測定点を用いてレオロジー定数を求めるため、一般にばらつきも大きい $\tau_y, \eta$  および $\dot{\gamma}_v$ の関係が式(8)の範囲にない場合は、測定結果をビンガムモデルの直線分布とみなして求められる降伏値は小さく、塑性粘度は大きくなる。

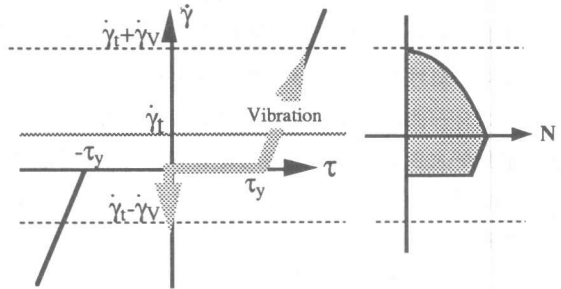


図-6 球引き上げ試験における振動範囲と分布

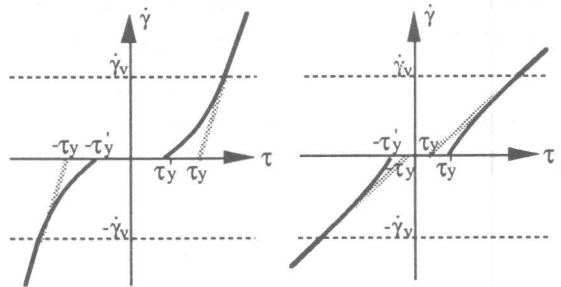


図-7 球引き上げ試験時の振動コンシステンシー曲線

### 4. モルタルの振動球引き上げ試験

振動を受けるビンガム流体の挙動を調べるため、モルタルを試料とした振動台上球引き上げ試験を実施した。

#### 4.1 実験概要

表-1に実験に使用したモルタルの調合を示す。水セメント比は35,40および50%の3水準とし、それぞれの水セメント比についてHard（流動性の低い試料）とSoft（流動性の高い試料）の2種類の試料を用意した。試料の流動性は、高水セメント比では砂セメント比により、また、低水セメ

表-1 モルタルの調査表

Name	W/C (%)	S/C	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	SP (C*%)
50H	50	2.3	294	588	1352	—
50S		1.8	331	663	1193	—
40H	40	1.8	284	710	1278	—
40S		1.5	309	773	1160	0.1
35H	35	1.5	281	804	1206	0.6
35S		1.3	281	896	1206	2.0

W/C:Water-cement ratio, S/C:Sand-cement ratio,  
W:Water, C:Cement, S:Sand, SP:Super plasticizer

表-2 振動条件

n (Hz)	v <sub>max</sub> (G)	a (mm)	v <sub>max</sub> (cm/s)	γ̇ <sub>v</sub> (1/s)
25	1.56	0.62	9.7	3.8
35	2.91	0.59	13.0	5.1
45	4.26	0.52	14.8	5.8

n:Frequency, v<sub>max</sub>:Max. acceleration, a:Amplitude,  
v<sub>max</sub>:Max. displacement-velocity, γ̇<sub>v</sub>:Strain rate

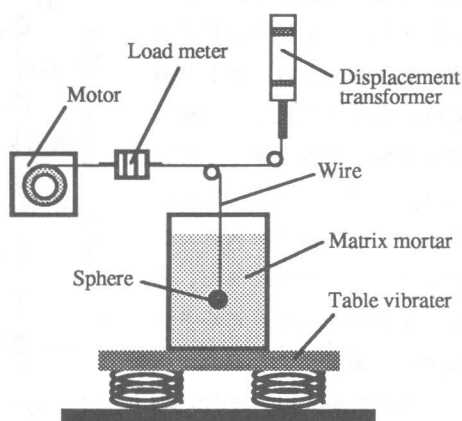


図-8 振動台上球引き上げ試験装置

ント比では高性能A E 減水剤の添加量により調整している。

振動条件としては、振動テーブルの振動数を0（無振動）、25,35および45Hzの4水準に変化させた。表-2に振動数および最大加速度（振動テーブル表面で測定）から算出した計算値を示す。

図-8に振動台上球引き上げ試験装置を示す。それぞれの試料および振動数に対して異なる速度で各3回球を引き上げた。

## 4.2 実験結果および考察

図-9に測定結果の一例(40Hシリーズ)を示す。図中の点線は、式(6)を用いて算出した振動によるひずみ速度の最大値 $\dot{\gamma}_v$ を、また、破線は、球引き上げ試験で得られる振動コンシステンシー曲線の理論値を示したものである（図-7参照）。各条件が式(8)の範囲にないため見かけの降伏値は無振動時の降伏値より小さくなる。また、実線は、測定点が直線上に分布するとみなして直線帰したものである。振動によるひずみ速度の最大値 $\dot{\gamma}_v$ が測定したひずみ速度 $\dot{\gamma}_t$ に比べて小さく、先に示した振動コンシステンシー曲線を確認することは困難であるが、振動が加わるにつれて、小さなひずみ速度領域ではせん断応力が小さくなる傾向が認められる。全シリーズについて、図-9に示す方法によって、見かけの降伏値と塑性粘度を算出した。図-10に、この降伏値および塑性

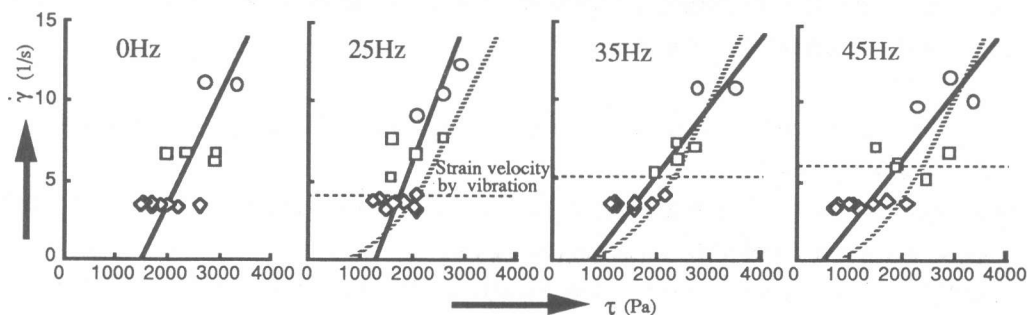


図-9 測定結果の一例（40Hシリーズ）

粘度と振動変位速度の関係を示す。図-11は、降伏値と塑性粘度の関係を示したものである。無振動時の降伏値が大きく、塑性粘度の小さい試料になるほど、振動の変化にともなって見かけの降伏値の低下割合が大きくなる傾向が認められる。また、降伏値と塑性粘度がともに小さい試料では、振動による変化が小さい。この傾向は式(7)および式(8)の結果と一致している。

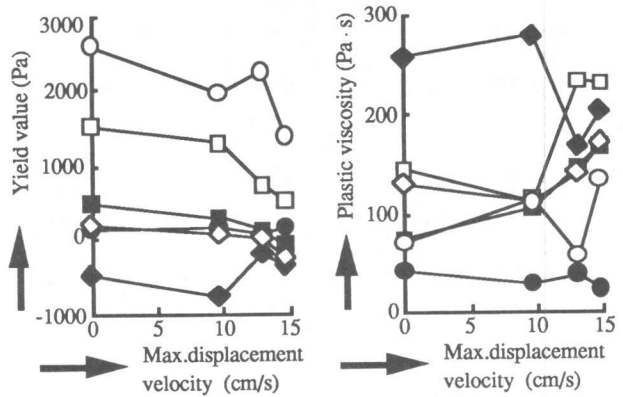


図-10 降伏値および塑性粘度と振動変位速度の関係

### 5.まとめ

本研究では、振動を受けるビンガム流体の挙動について理論的考察を行い、モルタルを試料とした振動時の球引き上げ試験による実験結果と比較した。本研究によって新たに得られた知見は、以下のとおりである。

1)振動時のビンガム流体のコンシステンシー曲線は、図-3および式(5)に示す原点を通る曲線を描く。

2)振動時の球引き上げ試験で測定される見かけのコンシステンシーに関する理論モデルは図-7で表される。

### 謝辞

本研究費の一部は、文部省科学研究費・一般研究(B)および奨励研究(A)によった。本研究の実施にあたり、江口清氏（前田建設工業技術研究所）および森堅太郎君（名古屋大学卒論生）の御協力を得た。関係各位に対して謝意を表す。

### 参考文献

- 1)岩崎訓明・坂本信義：コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性，土木学会論文集，Vol.10, pp.87-96, 1989.
- 2)水口裕之・田中淳一・田中伸幸：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，セメント技術大会論文集，Vol.46, pp.388-393, 1992.
- 3)角田忍：フレッシュコンクリートの振動時における性質，フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集，pp.13-18, 1989.

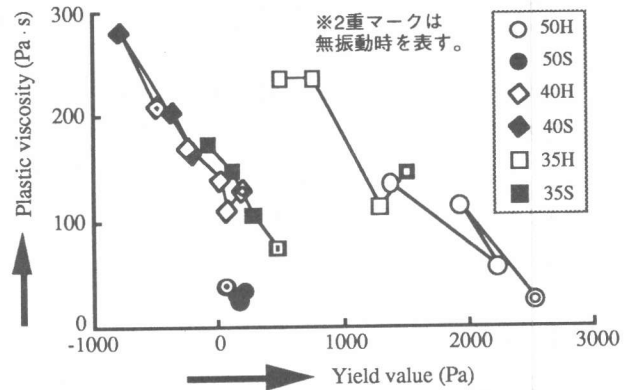


図-11 振動による降伏値および塑性粘度の変化