

【土木学会論文集 第378号/V-6 1987年2月】

# 研究展望

## フレッシュコンクリートの挙動に関する研究

### STUDIES ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF FRESH CONCRETE

村田二郎\*

By Jiro MURATA

#### 1. 緒 言

コンクリート施工作業の省力化の気運は、経済性だけでなく、高齢化社会への移行や高学歴化に伴う現場作業員の不足見込みからも急速に高まっている。電子工学や制御工学の進歩は他分野においてはすでに随所で作業の無人化を実現しており、コンクリートの分野の立遅れが目立っている。

従来、コンクリート施工は経験に基づいて行われていることが多い、経験則は局所的には有用であるが、一般性に欠け、作業のシステム化やロボット化の実現のために必ずしも十分ではない。

施工作業時におけるフレッシュコンクリートの挙動は自重、圧力、振動等の種々の外力による流動と変形の組合せを考えることができるから、コンクリート作業のシステム化、ロボット化の達成のためには、理論に基づきフレッシュコンクリートの挙動の予測技術を確立することが最も重要であり、また目的達成のための近道もある。

フレッシュコンクリートの挙動の解析的研究はレオロジーを基盤とし、欧州では1950年代にはすでに相当の水準に達しているが、その後の発展は比較的緩やかである。わが国においては、1970年以降急速な進歩を遂げ、現在国際的にもかなり高い水準に達している。しかし、学問それ自体がまだ若く、複雑な実施工のシミュレーションを可能とするまでには至っていない。

施工中のフレッシュコンクリートの挙動は、練りませ時の挙動、運搬、打込み時の流動および変形、振動締固め時の動的挙動等に大別される。以下、これらの各挙動について、その解析方法、実施工への適用等、現在までに明らかにされている点を述べ、将来の発展のための資料としたい。

#### 2. フレッシュコンクリートの変形

フレッシュコンクリートの変形予測は、打込んだコンクリートが型枠の隅々や、鉄筋の間隙にゆきわたり、硬化後断面欠損や付着不良を起こさないかどうかのいわゆる造形問題の基礎理論として重要である。

フレッシュコンクリートは場所打ち用の軟練りから工場製品用の硬練りまで広範囲にわたり、1種類のレオロジーモデルで表現することは難しい。これはコンシンシナーの変化が配合変化（組成変化）の結果であって、チョコレートやバターの温度による軟度変化とは根本的に相違するからである。

施工順序からすれば造形問題については、練りませ、運搬の後に述べるのが適当であるが、変形解析ではモデル選定の重要性が特に強調されるので、この問題を最初に取り上げることとした。

まず、幾何学的に規則性を有する単純形状としてスランプコーンを例にとり、自重による変形の予測方法を述べる。

##### (1) 軟練りコンクリートの場合<sup>1)</sup>

フレッシュコンクリートを塑性流体と仮定し、ビンガムモデルを適用する。したがって、物性値は塑性粘度および降伏値となる。

図-1を参照して、コーンの任意の水平断面に作用す

\* 正会員 工博 東京都立大学教授  
(〒158 世田谷区深沢2-1-1)

Keywords : fresh concrete, rheology, flow and deformation, vibration

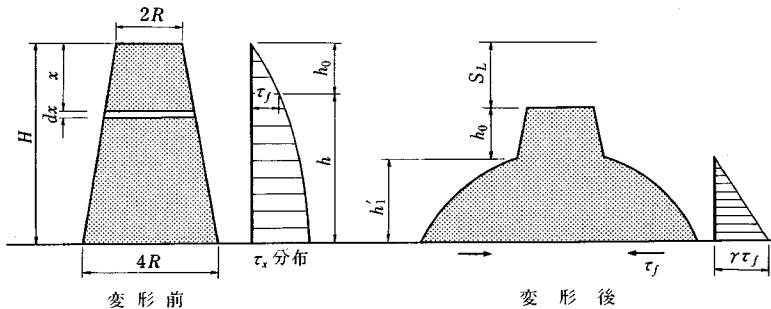


図-1 スランプコーンの変形

る最大せん断応力は、慣性の影響を無視すれば、

$$\tau_x = \frac{1}{2} \frac{W_x}{\pi r_x^2} = w \frac{(H+x)^3 - H^3}{6(H+x)^2} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_x$ ：最大せん断応力 ( $gf/cm^2$ )、 $W_x$ ：断面に働く自重 ( $gf$ )、 $r_x$ ：断面の半径 (cm)、 $w$ ：コンクリートの単位重量 ( $gf/cm^3$ )、 $H$ ：スランプコーンの全高 (cm)

$\tau_x \leq \tau_f$  (降伏値) の区間  $h_0$  は不变形領域となる。変形領域  $h$  において、体積不变の法則を適用すれば、変形後の高さは、

$$h_1 = \int_{h_0}^H \frac{r_x^2}{r_x^2} dx = \int_{h_0}^H \frac{\tau_f}{\tau_x} dx = \frac{2 \tau_f}{w} \ln \frac{7 H^3}{(H+h_0)^3 - H^3} \quad (2)$$

ここに、 $h_1$ ：変形領域の変形後の高さ (cm)、 $\tau_f$ ：降伏値 ( $gf/cm^2$ )

底面における摩擦抵抗力を適切に考慮して  $h_1$  を修正し、 $h'_1$  とすれば、スランプ値は次式となる。

$$S_L = H - (h_0 + h'_1) \quad (3)$$

ここに、 $S_L$ ：スランプ (cm)、 $h'_1$ ：変形領域の変形後の修正高さ (cm)

底面摩擦の影響については、摩擦抵抗力は降伏値以上にならないものとし、変形領域 ( $h'_1$ ) の区間の側面に摩擦力と等価の水平拘束力が作用するものとし、その分布が直線状であるとして求めてよい (図-1 参照)。

このように、スランプのような最終変形量には降伏値だけが関係し、塑性粘度は関係しない。塑性粘度は変形の速度に関係する。

図-2 は降伏値とスランプの実測値および計算値との関係を示したもので、スランプ 15 cm 程度以上では実測値と計算値とがよく一致している。

## (2) 硬練りコンクリートの場合

図-2 に示したように、スランプ 15 cm 程度以下になると、フレッシュコンクリートの組成変化により、しだいに粒状体効果が現われ、塑性流体として取り扱うことには無理が生じる。この場合には湿った砂のような粘塑性体と仮定し、物性値として内部摩擦角および粘着力を用いるのが適切である。

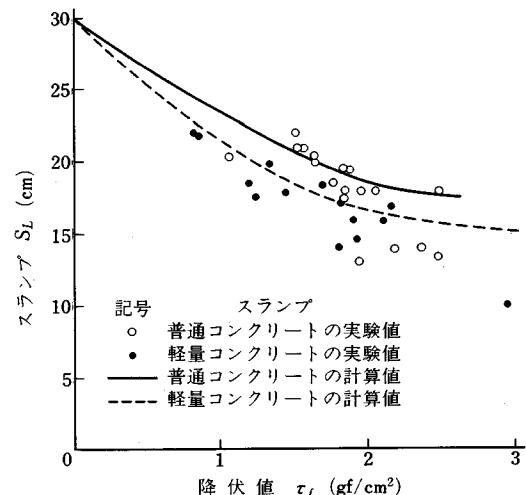


図-2 降伏値とスランプとの関係

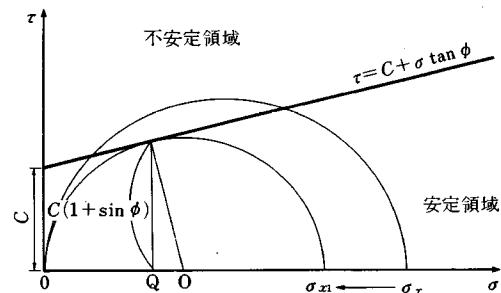


図-3 モールの応力円

下山の提案した解析方法<sup>2)</sup>は次のとおりである。

スランプコーンの水平断面に作用する鉛直応力  $\sigma_x$  は、

$$\sigma_x = \frac{W_x}{\pi r_x^2} = w \frac{(H+x)^3 - H^3}{3(H+x)^2} \quad (4)$$

これを図-3 のようにモール円で表わし、クーロンの破壊条件式 (5) と対比する。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

ここに、 $\tau$ ：せん断応力 ( $gf/cm^2$ )、 $C$ ：粘着力 ( $gf/cm^2$ )、

$\phi$ : 内部摩擦角(度),  $\sigma$ : 垂直応力(gf/cm<sup>2</sup>)

モール円が破壊条件式を表わす直線の上側(不安定領域)にある場合は、コンクリートは塑性流動を起こし、コーンの変形に伴って  $\sigma_x$  がしだいに減少し、モール円が直線に接するまで( $\sigma_x$  が  $\sigma_{x1}$  となるまで)変形すると考える。

スランプコーンの不变形領域  $h_0$  は、破壊条件式(5)とモール円の方程式(6)の連立式が重根をもつ条件、すなわち、判別式が0となる条件から定めることができるとする。

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

式(5), (6)の連立式の判別式

$$D = (2C \tan \phi - \sigma_x)^2 - 4(1 + \tan^2 \phi)C^2 = 0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

式(7)より  $\sigma_x$  を求め、これに対応する  $x$  を求めれば  $h_0$  となる。

次に、変形領域  $h$  の変形は、モール円が破壊条件線に接するときの鉛直応力  $\sigma_{x1}$  が図-3より幾何学的に次式で示されるので、

$$\sigma_{x1} = \frac{2C(1 + \sin \phi)}{\cos \phi} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\begin{aligned} h_1 &= \int_{h_0}^H \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_x} dx \\ &= \int_{h_0}^H \left\{ \frac{2C(1 + \sin \phi)}{\cos \phi} \right\} / \left\{ \frac{(H+x)^3 - H^3}{3(H+x)^2} \right\} dx \\ &= \frac{2C(1 + \sin \phi)}{\cos \phi} \ln \frac{7H^3}{(H+x)^3 - H^3} \quad \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

底面摩擦の影響を適当に考慮して  $h_1'$  を求めればよいが、硬練りコンクリートの場合はその影響が比較的小さいので、実用上無視してもよい。

図-4は広い範囲のスランプの実測値と計算値との関係を示したもので、スランプ15cm程度以上のコンクリートはビンガム体と仮定し、12cm程度以下のコンクリートは粘塑性体と仮定するのが適切であることがわかる。このことはフレッシュコンクリートの挙動がコンシステンシーによって相違し、軟練りと硬練りとで数学的には異種物質となることを示している。

### (3) 超硬練りコンクリートの場合

前記の(1)および(2)においては、コンクリートが塑性流動を起こすことを前提としているが、超硬練りコンクリートの場合には、図-5に応力ひずみ曲線の一例を示すように、最大応力の1/2程度まではほぼ直線形となり、途中除荷したとき大部分塑性変形として残留し、塑性が卓越する弾塑性体として取り扱うのが適当である。

川崎<sup>3)</sup>は、超硬練りコンクリートの三軸圧縮試験を行い、自重による変形が処女荷重によることに注目して

	記号	試料
ビンガム体と仮定する場合	○	碎石コンクリート
	△	粗骨材のみ軽量骨材を使用したコンクリート
粘塑性体と仮定する場合	□	軽量骨材コンクリート
	◎	碎石コンクリート
	●	川砂モルタル

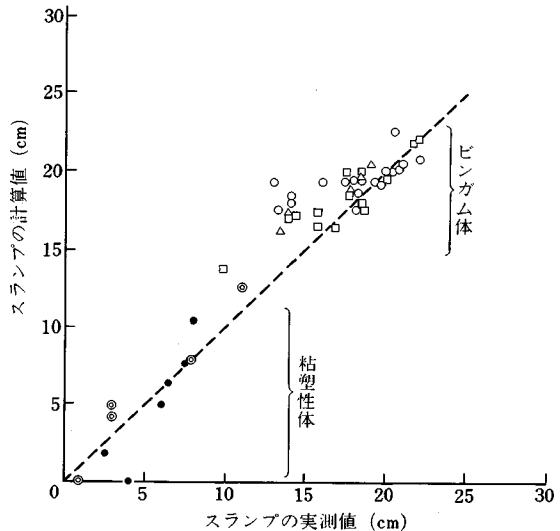


図-4 スランプの実測値と計算値との関係

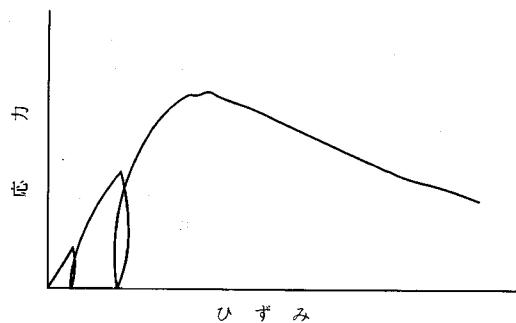


図-5 超硬練りコンクリートのフレッシュ時の応力・ひずみ曲線

フック則による式(10)の関係を利用し、変形係数およびボアソン比を決定し、FEM解析を行っている。

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - 2\mu\sigma_r) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $\varepsilon_z$ : 垂直ひずみ、 $\sigma_z$ : 垂直応力(gf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_r$ : 水平応力(gf/cm<sup>2</sup>)、 $E$ : 変形係数(gf/cm<sup>2</sup>)、 $\mu$ : ボアソン比

$\phi 20 \times 40$ cm型枠に超硬練りコンクリート(碎石2005, W/C=47%, s/a=54%, W=134kg/m<sup>3</sup>, スランプ0cm)を振動詰めしたのち(空隙率6.3%), ただちに脱型(即時脱型といふ)したときの最大鉛直変形量は上端面の中心部で約10mm, 最大半径方向変形量

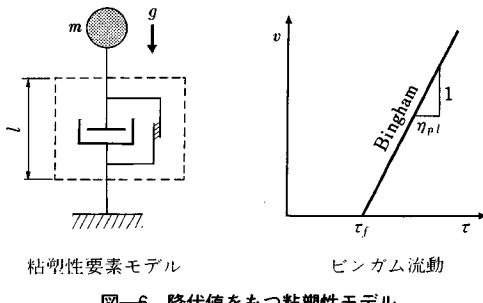


図-6 降伏値をもつ粘塑性モデル

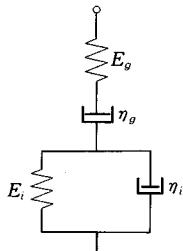


図-7 粘弾性4要素モデル

は底面から上方約7cmの位置で1.6mmとなり、底面の半径7.5cm以内の部分が自由度をもたないとして計算したFEM解析結果とよく一致している。この手法は、即時脱型方式で製造する工場製品の脱型後の変形予測に用いられる。脱型後の自重による変形量は硬化後製品の寸法誤差となって表われるので、即脱製品の製造上重要となるのである。

このほか、谷川<sup>4)</sup>は降伏値をもつ粘塑性モデル(図-6参照)により有限要素法による硬練りから軟練りまでのコンクリートの変形解析を行っており、また、岡本<sup>5)</sup>は、スライディングフォーム工法を対象として、ごく若材令コンクリートが持続的荷重を受け、クリープの影響を考慮する場合の変形解析には4要素モデル(図-7参照)がよく適合することを示している。

### 3. フレッシュコンクリートの流動

フレッシュコンクリートの流動は主としてコンクリートの運搬や打込み過程の解析のための基礎理論として重要な、これに関する従来の研究は円管内の流れと自由表面をもつ流れに大別される。

#### (1) 円管内のグラウトおよびコンクリートの流れ

圧力を伴ってグラウトまたはコンクリートが円管内を流動する場合の流速分布は図-8に示す3通りとなる。

図-8(A)は降伏値をもつ粘性液体の流速分布であって、試料と管壁間の付着力がせん断応力より大きい場合である。Pロート流下時間が20秒程度以下のグラウト(たとえばプレパックドコンクリート用グラウト、PC用グラウト等)の場合、一般にこの流れとなる。

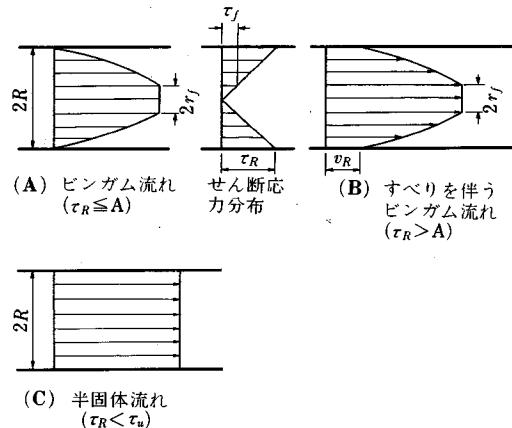


図-8 円管内の流速分布

図-8(B)は試料と管壁間に働くせん断応力が付着力を超え、すべりを生じる場合であって、すべりを伴うビンガム流れという。やや硬めのグラウトや一般的のコンクリートの場合、また流動性の大きいグラウトでも圧力勾配がかなり大きい場合にこの流れとなる。

図-8(C)は不飽和の半固体(粘塑性体)の流動を示し、試料のせん断強度がせん断応力より大きい場合であって、試料は管壁に沿ってトコロテンのように押し出される。硬練りコンクリートの場合この流れとなり、半固体流れといいう。

図-8(A)および(B)の流れは水力学的法則に従い、管軸方向の圧力分布は線形となる。これに対し、図-8(C)の場合は指數関数的に変化し、また管軸方向圧力と半径方向圧力は相違する。

約30年以前にEde<sup>6)</sup>はすでにこれらの点に着目し、コンクリートのポンプ圧送を対象として、管内流動の実験および解析を詳細に行っていることは注目に値する。

#### a) ビンガム流れ<sup>7)</sup>

流量は次のBuckinghamの塑性流動式で与えられる。

$$Q_B = \frac{\pi R^4}{8 \eta_{pl}} \frac{\Delta P}{l} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{r_f}{R} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $Q_B$ : ビンガム流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $R$ : 管の半径(cm)、 $l$ : 管の長さ(cm)、 $\eta_{pl}$ : 塑性粘度( $\text{gf}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ )、 $r_f$ : 案内半径(cm)

ただし、試料と管壁との付着力は管の材質にかかわらず、Pロート流下時間16~20秒のグラウトモルタルの場合 $0.5 \sim 0.65 \text{ gf/cm}^2$ 、Jロート流下時間6~12秒のPC用グラウトの場合 $0.4 \sim 0.55 \text{ gf/cm}^2$ であって、式

(11)を適用できるのはせん断応力がこれらの値を超えない場合に限られる。グラウト工事現場の調査結果によれば、大部分の場合にせん断応力は上記の付着力より小さく、ビンガム流れとなっている。



合条件について言及している。閉塞機構は粗骨材粒がしだいに近接し、ついにアーチング作用を起こすことに起因するとしているが、閉塞過程の丹念な観察はきわめて重要であって、閉塞の理論化の手掛りを与えるものである。粗骨材間の接合要素が時間とともにしだいに強化されるとの考え方方はその鍵となるかもしれない。

## (2) 自由表面をもつコンクリートの流動

コンクリートの運搬、打込み時には一般にコンクリートは自由表面をもつ。この場合の流動解析は管内流動のように単純ではないが、流動シミュレーションを行って現場の実施工に反映させるためには解析手法の開発研究がきわめて重要である。

小谷ら<sup>11)</sup>は Navier-Stokes の方程式および連続の式を適用し、二次元問題として解析している。

### Navier-Stokes の式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial u v}{\partial y} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + r \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial v u}{\partial y} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + r \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

### 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

ここに、 $u, v : x$  および  $y$  方向の速度 (cm/s),  $P$  : 圧力 (gf/cm<sup>2</sup>),  $F_x, F_y$  :  $x$  および  $y$  方向の質量力 (gf),  $\rho$  : 密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $r$  : 動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/s)

Navier-Stokes 式の解は差分法による。すなわち、空間を直交メッシュで有限個に分割し、各セルの中心に圧力を、セルの左右辺の中点に  $x$  方向流速を、上下辺の中点に  $y$  方向流速を設定し、時刻  $n$  における ( $u, v, P$ ) を用い、各セルの流速成分を逐次計算する。自由表面は流体部分のセルに質量をもたない粒子を配置しておき、これにより決定する。

ここでは、モルタルまたはコンクリートを降伏値をもたない非ニュートン体とみなし、実測したコンシステンシー曲線を入力データとする非定常解析プログラムを作成している。そして、これを用い、スランプコーンの変形過程、トレミー管から流出したコンクリートの流れ等の計算例を示している。

次に、アプローチの手法は全く異なるが、岩崎<sup>12)</sup>は、プレパックドコンクリートにおける粗骨材隙間のグラウトの流動が Darcy 則に従うとみなせることに着目し、粗骨材充填層内に仮想した微小直方体内にグラウトが貯留されることによる圧力増加を高さに変換し、グラウトの液面形状を予測する方法を提案している。これはグラウトの特性、注入管の数および間隔等の施工条件からグラウトの注入状況（液面形状）を推定し、注入作業の合

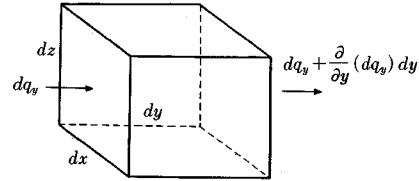


図-10 仮想直方体

理化をはかる目的としたものである。

粗骨材層に辺長  $dx, dy, dz$  の直方体を仮想する（図-10 参照）。非定常流として直方体の一面からの流入量と対面からの流出量は相違し、グラウトは貯留される。たとえば、 $xz$  面について、

$$y \text{ 方向の流入量 } dq_y = -\frac{k}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} (dxdz)dt$$

$$y \text{ 方向の流出量 } dq_y + \frac{\partial}{\partial y} (dq_y) dy$$

ここに、 $k$  : グラウトの透過係数 (cm/s)

直方体内に貯留されるグラウトの量

$$dQ_y = \frac{k}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} (dxdydz)dt$$

$$\text{全貯留量 } Q = dQ_x + dQ_y + dQ_z$$

$$= \frac{k}{\rho} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) (dxdydz)dt \quad (25)$$

圧力の単位量を高めるための単位体積当たりのグラウト量を  $q_0$  とする。

$$q_0 (dxdydz)dp = \frac{k}{\rho} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) (dxdydz)dt \quad (26)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{q_0 \rho} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right)$$

この圧力増加をグラウトの高さに変換するには、単位底面積をもち、空隙率が  $\epsilon$  の柱状骨材層を考え、 $q_0$  によるグラウト高さを  $h_0$  とすれば、

$$h_0 = q_0 / \epsilon, \text{ また } 1 = \rho h_0 = \rho q_0 / \epsilon. \therefore q_0 = \epsilon / \rho \quad (27)$$

グラウト液面の高さは二次元問題として、

$$h = \frac{P}{\rho} = \left( \frac{q_0}{\epsilon} \right) P = \frac{q_0}{\epsilon} \iint G \cdot f \cdot dx' dy' \quad (28)$$

ここに、 $h$  : グラウト液面の高さ (cm),  $G$  : グリーン関数,  $f$  : 境界条件

上記の 2 例はいずれもコンクリートまたはグラウトの降伏値を無視し、非ニュートン体またはニュートン体として取り扱っている。プレパックドコンクリート用グラウトの降伏値は一般に 0.3 gf/cm<sup>2</sup> 程度以下と小さいので問題はないが、コンクリートの場合はこの点について今後さらに検討が進められよう。グラウトの場合でも注入後グラウトが静止したのちの液面勾配は降伏値の影響

を決定的に受けること<sup>13)</sup>はいうまでもない。

#### 4. 振動の影響

##### (1) 振動作業の分類とフレッシュコンクリートの応答解析

フレッシュコンクリートに振動を与える目的は次の3つに分類される。

a) コンクリートの練りませ、運搬、打込み中に巻き込んだ空気を液状化によって追い出し、緻密化する、いわゆる振動締固めであって、製品コンクリートやローラーコンパクテッドコンクリート (RCC) 等の硬練りコンクリートの場合である。

b) あまり硬練りでない一般の場所打ちコンクリートの場合で、振動によりコンクリートを流動または変形しやすくし、型枠の隅々や鉄筋の間隙に十分ゆきわたらせることに重点があり、締固め効果の比重は小さい場合である。

c) 打込み作業の機械化、省力化のためには必然的に打込み位置をできるだけ限定し、コンクリートとなるべく遠方まで流動させる新工法の確立が要望される。この場合振動の目的はコンクリートの流動の促進となる。

図-11は振動に対するフレッシュコンクリートの応答挙動を模式的に描いたもので、PQは締固め過程、Q以降は定常振動となる。フレッシュコンクリートの振動の取扱いが地震の振動の場合と異なる点は、多くの場合締固め過程（過渡状態）の解析が主題となること、周波数が50～200Hzと高いこと、しかし、波形は一般に正弦波に限られること等である。

前記のa)においては振動締固め、すなわち、しだいに内部気泡が減少し、コンクリートが容積変化を起こす過渡状態の解析であって、コンクリートの物性値が時間とともに変化するとして取り扱わなければならない。振動台上で締固める小型のコンクリート製品の場合は一質点系問題として取り扱えるが、大型製品やRCCの場合には振動の伝播を考える必要がある。

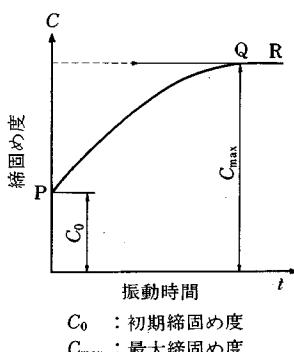


図-11 締固め過程の模式図

b)においては、振動締固め過程はきわめて短く、容積変化も僅少であって、振動の伝播、有効な最小加速度等の解明、振動によるコンクリートの流動または変形解析が主題となる。この場合振動時の物性値の変化は無視してよいであろう。

c)においては、振動によるコンクリートの流れの解析が主題となる。この場合分離限界内の問題として取り扱う必要があるので、分離防止のための混和剤の強力な援助が必要となろう。

なお、すべての場合において、取扱いの便宜上コンクリートを粘弾性体と仮定するのが一般的である。

##### (2) 硬練りコンクリートの振動締固め

###### a) 振動の伝播を考えない場合<sup>14)</sup>

コンクリート積みブロックのような小型製品の場合である。超硬練りコンクリートが用いられるので、モルタルの液状化による振動中の空隙の逸散を考えるが粗骨材の沈降は無視する。

レオロジーモデルは試料コンクリートの質量（型枠を含む）に相当するマスを載せたVoigtモデルとすると（図-12参照）、運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{u} + c(t)\dot{u} + k(t)u = m\ddot{z} \quad \dots\dots\dots(29)$$

ここに、 $m$ ：試料の質量(g)、 $u$ ：試料上面の沈下量(cm)、 $c(t)$ ：減衰係数(gf·s/cm)、 $k$ ：変形係数(gf/cm)、 $z$ ：振動台の振幅(cm)

$$\begin{aligned} c(t) &= A\eta'(t) \\ k(t) &= BE'(t) \end{aligned} \quad | \quad \dots\dots\dots(30)$$

ここに、 $\eta'$ ：動的粘性率(gf·s/cm<sup>2</sup>)、 $E'$ ：動的弾性率(gf/cm<sup>2</sup>)、 $A$ 、 $B$ ：定数

物性値  $\eta'$  および  $E'$  は波動法によって求め、 $A$ 、 $B$  を適切に選定すれば、上面沈下の推移を予測することができる。ただし、動的物性値は周波数特性を有するから(6.(4) 参照)、波動法によってこれらを測定する場合は振動台と同じ周波数を用いる。また、式(29)の解は Newmark  $\beta$  法の線形加速度法によればよい。

###### b) 振動の伝播を考える場合

Petrov<sup>15)</sup>は柱状のコンクリートについて、内部空隙を考慮して振動の伝播過程を検討している。

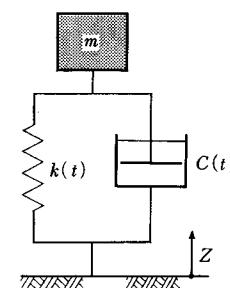


図-12 レオロジーモデル

柱軸方向の振動の伝播(変位速度の場所的時間的变化)は次式で表わされる。

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial l}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad \dots \dots \dots (31)$$

ここに,  $v$ : 変位速度 (cm/s),  $v = \partial l / \partial t$ ,  $c$ : 波速 (cm/s),  $\nu$ : 動粘性係数 (cm<sup>2</sup>/s)

式(31)において、空隙を有するコンクリート中の波速は、

$$c^2 = \frac{1}{\rho} E(x, t) = \frac{1}{\rho_b(1-\omega)} \frac{E_b}{1 + \frac{E_b}{E_a} \omega} = \frac{c_b^2}{(1-\omega) \left[ 1 + \left( \frac{c_b}{c_a} \right)^2 \frac{\rho_b}{\rho_a} \omega \right]} \quad \dots \dots \dots (32)$$

ここに,  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $E$ : コンクリートの密度 (g/cm<sup>3</sup>), 空隙率および動ヤング率 (gf/cm<sup>2</sup>),  $\rho_b$ ,  $E_b$ : 十分締固めたコンクリート(締固め度 0.98)の密度 (g/cm<sup>3</sup>) および動ヤング率 (gf/cm<sup>2</sup>),  $\rho_a$ ,  $E_a$ : 空気の密度 (g/cm<sup>3</sup>) および動ヤング率 (gf/cm<sup>2</sup>),  $c_b$ ,  $c_a$ : 十分締固めたコンクリートおよび空気中の波速 (cm/s)

次に、振動による空隙率の場所的時間的变化は次の拡散型の方程式で表わされるものとする。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -v_n \frac{\partial \omega}{\partial x} + D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad \dots \dots \dots (33)$$

ここに,  $v_n$ : 周波数  $n$  における気泡の上昇速度で Stokes の法則に従うものとする。  $v_n = \frac{d^2}{18 \nu} g$   $d$ : 気泡径,  $D$ : 拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)

式(33)を用い、周波数に応じた空隙率変化を式(33), (32)および(31)の順に計算し、上面沈下量を求めることができる。

また、遠藤<sup>16)</sup>は、RCC の締固め機構の解明を目的としてコンクリートを 4 要素粘弾性体と仮定し(図-7 参照)、その粘弾性定数 ( $E_g$ ,  $\eta_g$ ,  $E_i$ ,  $\eta_i$ ) を数通りに固定して、有限要素法による二次元粘弾性解析を行い、ローラー直下のコンクリートの深さに伴う応答変位の変化を準備的に検討している。

### (3) 場所打ちコンクリートにおける振動の伝播

次の粘弾性体の波動方程式が基本となる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( K + \frac{4}{3} G \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left( \eta_v + \frac{4}{3} \eta \right) \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial x^2} \quad \dots \dots \dots (34)$$

ここに、 $\rho$ : 媒質の密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $u$ : 変位 (cm),  $K$ : 体積弾性係数 (gf/cm<sup>2</sup>),  $G$ : ずり弾性係数 (gf/cm<sup>2</sup>),  $\eta_v$ : 体積粘性係数 (gf·s/cm<sup>2</sup>),  $\eta$ : ずり粘性係数 (gf·s/cm<sup>2</sup>)

式(34)の解として、

$$u = u_0 e^{i\omega t} e^{-(\beta + \frac{\omega}{c})} \quad \dots \dots \dots (35)$$

ここに、 $\beta$ : 減衰係数,  $\omega$ : 角速度 (rad/s),  $c$ : 波速 (cm/s)

式(35)は減衰曲線を与えている。

内部振動機からコンクリートへの振動の伝播を考える場合

(i) コンクリート中への挿入による内部振動機自体の加速度の変化

(ii) 振動棒からコンクリートへの振動の伝達

(iii) コンクリート中の振動の減衰

について考慮する必要がある。

図-13 はこれらの問題を検討するために計画した実験方法図である<sup>17)</sup>。式(34)は平面波に対する波動方程式であるので、これを実現するために回転方向が相反する 2 台の内部振動機を並列に組み合わせ、振動の横方向成分を消去した単振動型のものを用いた。

a) 内部振動機の無負荷時と負荷時の振動性状

無負荷時の振幅 0.6 mm, 周波数 200 Hz, 加速度 90 g の振動機をスランプ 6~14 cm のコンクリートに挿入した場合、振幅は約 70 % に、周波数は約 94 % に、加速度は約 60 % に低減し、低減の程度はコンクリートの配合や振動時間によってほとんど変化しない。加速度の低減が大部分振幅の低減に起因するのは当然であるが、周波数も若干低下することが認められる。

Kolenda<sup>18)</sup>は挿入時の振動機の加速度を式(36)で計算している。

$$a = 4 \pi^2 f^2 \frac{m_e r}{m_v + m_e + m_b} \quad \dots \dots \dots (36)$$

ここに、 $f$ : 周波数 (Hz),  $m_e$ : 偏心重錘の質量 (g),  $r$ : 重錘の偏心距離 (cm),  $m_v$ : 偏心重錘を除いた振動機の質量 (g),  $m_b$ : 振動棒で排除されたコンクリートの質量 (g)

これは、理想液体中に挿入した円柱状の物体の等価質量がその物体の排除する液体の体積に等しいことに基づくものである。振動機に接するコンクリートはすみやかに液状化するから、加速度低減は配合や振動時間にかかわらずほぼ一定とみなしてよいのであろう。式(36)で計算される加速度は、通常の内部振動機の場合無負荷時の加速度に対して 70~75 % となる。

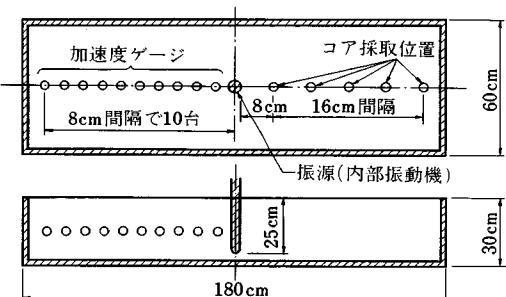


図-13 振動の伝播実験の装置

b) 内部振動機からコンクリートへの振動の伝達  
振動棒の周囲のコンクリートは局部的に液状化して乱れ、振動の伝達を著しく阻害する。この部分を「乱れの領域」という。振動の伝達率は、コンクリート中に埋め込んだ多数の加速度計(図-13参照)による応答加速度が指数減衰するとして求めた振源位置の加速度と振動棒の插入時加速度との比で表わされる。実験の結果は伝達率は軟練りコンクリートほど小となり、スランプ6~14 cmに対し、約0.6~0.2となり、振動開始後約10秒位ほぼ安定した値となる。この場合、周波数の変化はみられないから加速度低減はすべて振幅の減少に起因す。

このような大きい加速度低減が生じる原因として、Forssblad<sup>19)</sup>は液状化したコンクリートが高速で流動するために発生するキャビテーションによる気泡の混在に起因するとし、キャビテーションが著しくならない振幅、周波数の組合せとして図-14を提示している。

### c) コンクリート中の振動の伝播

図-13の実験で、各点の最大応答加速度が測定されるので減衰曲線は式(37)と単純化される。

ここに、 $u$ :コンクリートの振幅(cm),  $u_0$ :振源位置のコンクリートの振幅(推定値)(cm),  $\beta$ :減衰率,  $x$ :振源からの距離(cm)

周波数は場所的時間的に変化しないから、式(38)で表わしてもよい。

ここに,  $\alpha$ :コンクリートの加速度 (g.),  $\alpha_0$ :振源位置のコンクリートの加速度 (推定値) (g.)

減衰率はコンクリートのコンシスティンシーによって相違し、スランプ 6~14 cm の場合 0.065~0.035 程度である。

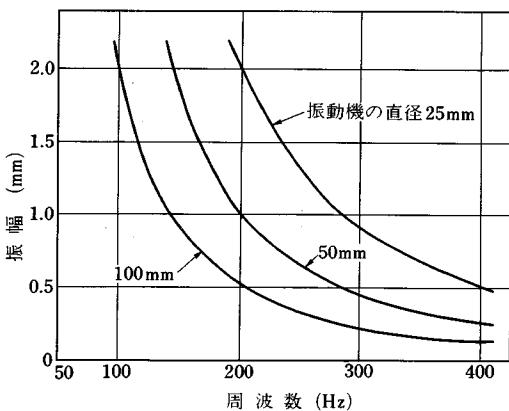


図-14 キャビテーションを起こさない周波数と振幅との組合せ

以上は単振動状態の内部振動機による平面波の場合であって、振動の減衰は主としてコンクリートの内部摩擦に起因する。しかし、実際の内部振動機による振動は360度方向に伝播する円形波である。したがって、コンクリートにおける振動の減衰は粘性減衰のほかにこの幾何学的減衰が加算される。後者についてはDesoff<sup>20)</sup>は次式を与えている。

ここに、 $S_1$  および  $S_2$ ：振動棒の中心線からの距離  $R_1$  および  $R_2$  におけるコンクリートの振幅 (cm),  $\Omega$ ：材料の減衰係数で一般に  $0.04 \sim 0.08$

Desoff の式によれば、 $\Omega = 0.04 \sim 0.08$  の場合幾何学的減衰は全減衰の約 85~80 % と大部分を占め、内部摩擦による減衰は約 15~20 % となる。

d) 振動締固め度<sup>17)</sup>

再び図-13をみよう。この実験では、振動機の右側のコンクリートから加速度計の埋設位置とほぼ対称的にコアを採取し、締固め度の尺度として圧縮強度を試験している。

図-15は各位置における対数表示した総振動エネルギーと圧縮強度との関係を示したもので、両者はほぼ直線関係にあり、振動の有効限度も示されている。

ここに、振動エネルギー  $W$  は、変位を  $u = a \sin(\omega t - \theta)$  ( $a$ : 最大振幅,  $\omega$ : 角速度,  $\theta$ : 位相差) と表わすと、応答値を用いるから、

$t$  秒間の総振動エネルギーは、

ここに、 $W_t$ :  $t$  秒間の総振動エネルギー (erg),  $m$ : ボ

記号	コンクリートの種類
—○—	AEコンクリート(スランプ6cm)
—△—	流動化コンクリート(スランプ6→10cm)
- - -□-	AEコンクリート(スランプ12cm)
- - -×-	流動化コンクリート(スランプ6→14cm)

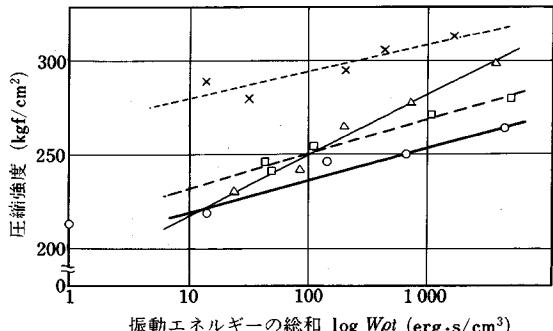


図-15 振動エネルギーの総和と圧縮強度との関係

ンクリートの質量,  $a$  および  $f$ : 応答振幅および応答周波数 (cm および Hz),  $t$ : 振動時間 (s)

振動によるコンクリートの影響範囲が不明確であるので、コンクリートの単位質量を考え、 $m = \rho$  とする ( $\rho$  : コンクリートの密度)。

ここに、 $W_{st}$ ：コンクリートの単位質量当たりの  $t$  秒間の総振動エネルギー (erg·s/cm<sup>3</sup>)、 $\rho$ ：コンクリートの密度 (g/cm<sup>3</sup>)

図-15において、たとえば、ベースコンクリートのスランプ 6 cm、流動化後のスランプ 14 cm の流動化コンクリートは総振動エネルギーが約 400 erg·s/cm<sup>3</sup> ではほぼ最大締固め度に達しているが、スランプ 6~12 cm の AE コンクリートの場合は 3 500 erg·s/cm<sup>3</sup> においてもなお最大締固め度に達していない。また、総振動エネルギー 400 erg·s/cm<sup>3</sup> 程度でスランプ 6→14 cm の流動化コンクリートの圧縮強度は 310 kgf/cm<sup>2</sup> であるのに対し、同じ水セメント比および空気量の AE コンクリートの圧縮強度は 250~270 kgf/cm<sup>2</sup> となっている。このように総振動エネルギーは締固め度の有力な指標となるものであって、種々の配合のコンクリートについてあらかじめ図-15 に示すような総振動エネルギーと圧縮強度（振動締固め度）の関係が得られていれば、施工の合理化に有効に用いることができると思われる。

なお、コンクリートの締固めに有効な最小振幅として従来約  $0.05 \text{ mm}^{21)}$ 、最小加速度として  $1.5 \text{ g}^{22)}$  等が与えられている。

## 5. 練りませ

練りませ機構の解析は、フレッシュコンクリートの挙動のうち最も難解な問題であって、アプローチの方法もいまが明らかとなっていない。ただ、その方向性は粉体

工学や化学工学すでに検討されている粉体と粉体の混合理論、液体と液体の混合理論の拡張となろう。たとえば、赤尾<sup>23)</sup>は、粉体の混合について、その混合過程を移動混合の基本モデルと拡散混合の基本モデル（図-16 参照）の両者が同時進行する確率現象と考えて混合過程をシミュレートしている。

コンクリートの混合理論についてはすべて今後の研究課題となっている。

## 6. フレッシュコンクリートの物性値測定法

以上に述べたフレッシュコンクリートの静的または動的流動、変形等の解析はいずれも採用した数学モデルを構成する物性値によって組み立てられている。したがって、これらの物性値を的確に求め得るかどうかは解析結果の実用性の成否の鍵となる最も重要な要件の1つである。

フレッシュコンクリートやグラウトのレオロジー定数の測定に適用できるレオメータとして、二重円筒型回転粘度計、球引上げ型粘度計、管型粘度計、平行板プラスチメータ、三軸圧縮試験、振動式粘度計（波動法）等が挙げられる。これらの試験方法については、すでに土木学会コンクリート施工研究小委員会「物性値測定法分科会（主査：明石外世樹氏）」により“フレッシュコンクリートの物性値測定法についてのガイドライン”が公表されている<sup>24)</sup>ので、本文では主な試験方法の位置づけならびに試験実施上の要点について述べる。

### (1) 二重円筒型回転粘度計

容器寸法および円筒壁面と試料間のすべりに注目する。

水セメント比 45 % 以上のセメントペースト、P ロート流下時間 20 秒以下のグラウトモルタルの場合は内外円筒間隙幅が 10~15 mm の小型容器を用い、円筒壁面

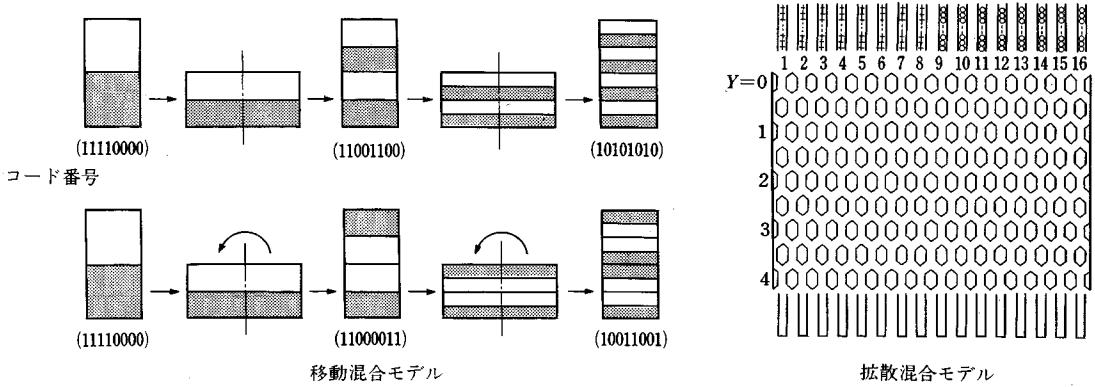


図-16 混合理論の基本モデル

と試料間にすべりは生じないとしてよい。

コンクリートの場合は試料の流動幅を30~40mmとする必要があり、流動幅は内円筒半径に比例する<sup>25)</sup>から、内円筒半径15cm、外円筒半径20cm程度の大型の容器を用いる。円筒壁面と試料間にすべりが生じるので、試料の流速分布を実測し、その結果を用いてコンシスティンシー曲線を描き、塑性粘度および降伏値を決定する必要がある。

従来、二重円筒型回転粘度計による測定値は研究者によってまちまちの値が報告されていたが、菊川<sup>26)</sup>が試料上面の多数の点を実測する方法（多点法）を提案して以来物理量として十分利用できる試験値が得られるようになった。

スランプ12cm程度以下のコンクリートの場合は回転する容器内で流動現象が現われず、実際に粘度測定を行うことはできない。二重円筒型回転粘度計の適用範囲がスランプ12~15cm以上であることは、2.の変形計算において、ビンガム体と仮定できるスランプの範囲と軌を一つにしている。

## (2) 三軸圧縮試験

フレッシュコンクリートの三軸圧縮試験による内部摩擦角および粘着力の試験値は一般にばらつきが大きいとされている。これは主として軸差応力ひずみ曲線上で降伏応力の判定が困難な場合が多いためであって、土の場合でも降伏応力の判定が困難なため、ひずみ度15%のときの軸差応力を降伏応力とみなすことが慣例的に行われている。

越川<sup>27)</sup>はコンクリート中の間隙水圧を同時に測定し、間隙水圧の急減がコンクリートのすべり破壊に起因することに着目し、軸差応力・間隙水圧曲線（図-17参照）

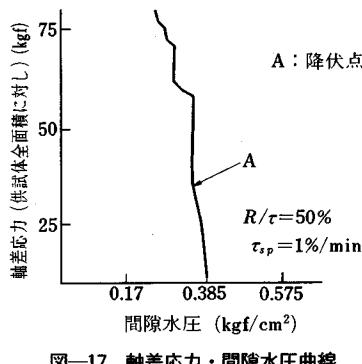


図-17 軸差応力・間隙水圧曲線

を描いて降伏応力を合理的に決定する方法を提案し、安定した試験値が得られることを明らかにしている。

三軸圧縮試験はスランプ12cm程度以下の硬練りコンクリートに適用する。

## (3) 平行板プラスチメータ

三軸圧縮試験と同様にスランプ12~15cm以下のコンクリートの物性値の測定に適用する。しかし、平行板プラスチメータでは試料をビンガム体と仮定するから、得られる物性値は塑性粘度と降伏値である。全コンシスティンシーの領域でフレッシュコンクリートをビンガム体と仮定して挙動の解析を行う場合にはこの試験値を利用することになる。水口<sup>28), 29)</sup>は平行板プラスチメータの力学、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートに関する試験方法、試験結果を示している。

## (4) 振動式粘度計（波動法）

波動法はフレッシュコンクリートに弾性波を透過し、コンクリートを粘弹性体と仮定してその動的物性値を求めるものであって、振動に対するコンクリートの応答解析に用いる物性値の唯一の測定法としてきわめて重要である。しかし、この方法にはなお検討を要する点があり、たとえば、パルス波を用いるか、バースト波がよいか、減衰率を求めるために受振子（埋込み加速度計）を何か所以上必要とするか等がある。図-18はバースト波の応答波形の例であって、第1波から5波程度までは波頭付近に欠損部が生じたり、振幅がふぞろいとなったりするので波速、減衰率の両者を満足に測定するためにはバースト波の後半部を用いるのがよいようである。

一般に、縦波速度と減衰率を測定し、動的弾性率E'および動的粘性率η'を求める場合が多い。E', η'は次式から計算される。

$$\left. \begin{aligned} E' &= \frac{\rho k^2 c^2 (k^2 - \beta^2)}{(\beta^2 + k^2)} \\ \eta' &= \frac{3 \rho \beta k^2 c}{2 (\beta^2 + k^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

ここに、E':動的弾性率(dyne/cm²), η':動的粘性率(dyne·s/cm²), ρ:密度(g/cm³), β:減衰率, c:波速(cm/s), k:位相係数,  $k = \omega/c = 2\pi f/c$  [ω:角速度(rad/s), f:周波数(Hz)]

式(43)に示すように、E'およびη'は周波数の関数であって、 $\partial E'/\partial f = 0$ ,  $\partial^2 E'/\partial f^2 = 0$ ならびに $\partial \eta'/\partial f = 0$ ,  $\partial^2 \eta'/\partial f^2 = 0$ 等によって極値および反曲点を求めれば、図-19のようにE'およびη'の理論的な

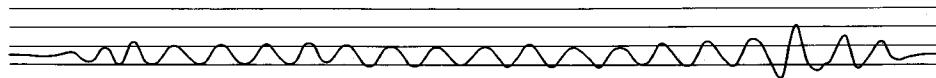
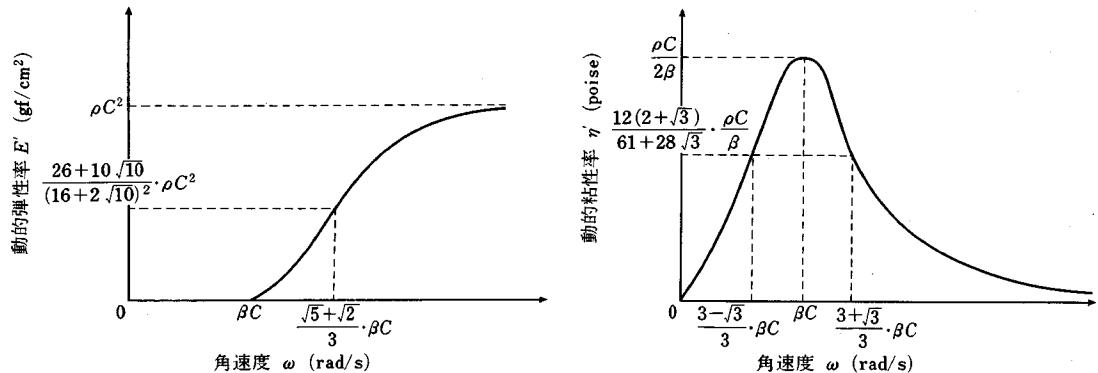


図-18 バースト波(20波)の応答波形の例

図-19 動的弾性率  $E'$  および動的粘性率  $\eta'$  の周波数特性

周波数特性が示される。したがって振動の応答解析を行う場合、その振動数付近の物性値を用いなければならぬ。

波動法については角田の詳細な研究<sup>30)</sup>がある。

#### (5) 管型粘度計（傾斜管試験法）<sup>31)</sup>

傾斜管試験は操作が簡単であるのでグラウトの粘度の現場試験法としても利用できる。従来Pロート試験が広く用いられているが、これを解析的に検討すると必ずしも合理的とはいがたい。

図-20に示すPロートの試料液面および流出管出口にエネルギー方程式を適用する。

$$\frac{V^2}{2g} + z + l = \frac{V_0^2}{2g} + f_m \frac{V_0^2}{2g} + h_i \quad \dots \dots \dots (44)$$

ここに、 $V$  および  $V_0$ ：液面および流出管出口における流速 (cm/s),  $z$  および  $l$ ：液面および流出管の高さ (cm),  $f_m \frac{V_0^2}{2g}$ ：流出管入口までの損失エネルギー (cm),  $h_i$ ：流出管における損失エネルギー (cm)

$V = (d_0/d)^2 V_0$  を用い、式 (44) を  $V_0$  の 2 次式で表わし、 $V_0$  について解けば、

$$V_0 = \frac{2}{\frac{l}{K(z+l)} + \sqrt{\frac{l^2}{K^2(z+l)^2} + \frac{2}{g(z+l)} \left\{ 1 + f_m + \left(\frac{d_0}{d}\right)^4 \right\}}} \quad \dots \dots \dots (45)$$

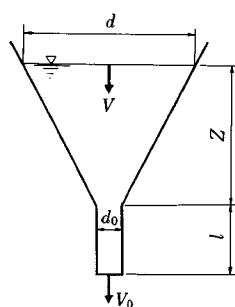


図-20 P-ロート

ここに、 $K = \frac{\rho g R^2}{8 \eta_{pl}} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{r_f}{R} \right)^4 \right]$ ,  $R$  : 流出管の半径 (cm),  $r_f$  : 案内半径 (cm)

流出管の長さ  $l$  について検討する。

$l=0$  の場合

$$V_0 = \sqrt{\frac{2gz}{1 + f_m + (d_0/d)^4}} \quad \dots \dots \dots (46)$$

$f_m$  は試料粘度の関数であるが、 $f_m < 1$  でその影響は小さいので、流出速度はロートの形状のみに関係し、試料の粘性にはほとんど無関係となる。

$l$  を十分長くした場合

$$V_0 = \frac{z+l}{l} K \quad \dots \dots \dots (47)$$

このように、流出管を長くすれば、流出速度は試料の物性値の明瞭な尺度となる。従来、ロートの形状を種々変化させた試験方法が提案されているが、単なる思いつき的発想ではほとんど意味をなさない。傾斜管試験では流出管長をPロートの場合の約20倍とし、試料と管壁間にすべりが生じないよう水平近くに設置し、さらにロートにオーバーフローを設け、定常流となるようにしたものである。鈴木<sup>32)</sup>は、傾斜管試験によって測定したグラウトの塑性粘度および降伏値が二重円筒型回転粘度計によって求めた値とほとんど差異はない、試験値のはらつきもごく小さいことを明らかにしている。

#### 7. あとがき

コンクリート施工の合理化のためのフレッシュコンクリートの挙動の解析方法について述べたが、ごく一部を除いてまだ実務に直結できるまでには至っていない。しかし、力を焦って一足飛びに複雑な現象を取り扱うより、まず単純な現象について適切なモデルの選定、モデルの構成要素としての物性値の的確な把握、解析方法の適正化を十分に行なうことがきわめて重要である。解析方法の検討のみに走ることなく、また、実験のみに片寄る

ことなく、両者を兼ね備えた地道な研究が必要であって、基礎研究の部分については特に大学関係者の不断の尽力を期待する。

## 参考文献

- 1) Murata, J. : Flow and deformation of fresh concrete, *Matériaux et Constructions*, Vol. 17, No. 98, 1983.
- 2) 下山善秀：静的荷重によるフレッシュモルタルの変形に関する基礎研究，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，昭和60年9月。
- 3) 未発表
- 4) 谷川・森：粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートのスランプ挙動の解析，日本建築学会昭和60年度大会（東海）学術講演梗概集A, 1985.
- 5) Okamoto, H. : A Study on Creep Properties of Concrete at Very Early Age, *Proceedings of the 30th Japan Congress of Materials Research*, 1987. 3.
- 6) Ede, A. N. : The resistance of concrete pumped through pipelines, *Mag. Conc. Res.*, Vol. 9, No. 27, 1957. 11.
- 7) 村田・鈴木：グラウトの管内流動に関する研究，土木学会論文集，第354号，1985. 2.
- 8) 村田・鈴木：セメント系混合物の管内流動のレオロジー解析とその応用，セメント技術年報38, 1984.
- 9) 本間 仁著「応用水理学」および「標準水理学」
- 10) 一色・山崎・岡村：ポンプ圧送性におけるフレッシュコンクリートの変形性，土木学会論文集，第354号，1985. 2.
- 11) 小谷・神田：フレッシュコンクリートの流動解析，フジタ工業技術研究所報，1985. 7.
- 12) 岩崎訓明：プレパックドコンクリートにおけるグラウトの注入状況の予測方法，土木学会論文集，第360号，1985. 8.
- 13) 村田・清水・斎藤・大作：銅スラグ微粉末を用いたプレパックドコンクリート用グラウトの充填性および均等性に関する研究，土木学会論文集，第366号，1986. 2.
- 14) 村田・川崎：超硬練りコンクリートの振動締固めに関する基礎的研究，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，昭和59年。
- 15) Petrov, A. A. : Concrete long column compaction under vibration, *Izv Vyssh Vcheb Zaved Stroit Arkit*, No. 3, 1979.
- 16) 遠藤孝夫：ローラー・コンパクテッド・コンクリートの締め固め解析，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，昭和61年。
- 17) 村田・川崎・関：振動締固めによるコンクリートの挙動，土木学会フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，昭和61年3月。
- 18) Kolenda, J. : The vibration process in compacting by means of internal vibrators, Unpublished (*Behavior of fresh concrete during vibrations*), ACI, Jou., 309, 1981. 1. 2.
- 19) Forssblad, L. : Investigation of internal vibration of concrete, *Civil Engineering and Building Construction Series*, No. 29, 1965.
- 20) Dessoff, M. : Sur l'étude de la pervibration du béton, *Annales des Ponts et Chausées*, No. 5, 1937.
- 21) Kolek, J. : Research on the vibration of fresh concrete, *Reports Conference on Vibrations-Compaction Techniques*, 1963.
- 22) 山田ほか：コンクリート振動機の性能実験，竹中技術研究報告20, 1978. 10.
- 23) 赤尾ほか：混合システムの合成とその最適層形成，粉体工学会誌，Vol. 19, No. 11, 1982.
- 24) 土木学会フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，昭和61年3月。
- 25) 村田・菊川：回転粘度計によるフレッシュベースト，モルタルおよびコンクリートのレオロジー定数測定法，土木学会フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，昭和58年3月。
- 26) 村田・菊川：まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案，土木学会論文報告集，第284号，1979. 4.
- 27) 竹内・越川・伊藤：フレッシュコンクリートの三軸圧縮試験方法に関する研究，土木学会フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，昭和61年3月。
- 28) 水口・河野：平行板プラストメータによるフレッシュコンクリートのレオロジー定数測定法に関する検討，土木学会フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，昭和58年3月。
- 29) 水口・安永：フレッシュモルタルのレオロジー定数の測定法，セメント技術年報27, 昭和48年。
- 30) 角田 忍：フレッシュコンクリートの動的性質に関する基礎的研究（学位論文），昭和60年10月。
- 31) 村田・鈴木：傾斜管試験法によるグラウトの粘度測定，土木学会フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文集，昭和58年3月。

(1987.1.10・受付)