

V-80 試作コンクリート用回転粘度計について

東京都立大学 正員 村田 二郎
名城大学 〇 菊川 浩治

1. まえがき

フレッシュコンクリートのコンシステンシーおよびワーカビリティなどを表わす尺度としては現在スランプ試験、V・BおよびV・F試験などの試験値が用いられている。しかし、フレッシュコンクリートの複雑な性質を解明する手段として、これらの試験方法とは違った観点から検討を加えることも、きわめて重要であると思われる。

本報告は、フレッシュコンクリートをレオロジー的に検討するために試作されたコンクリート用回転粘度計の原理、構造および性能などについて述べ、その他二、三の実験例を示したものである。

2. 同軸内円筒回転粘度計の原理

図-1. 内円筒回転型

図-1に示すように、トルクMでローターが回転すれば半径r ($R_i < r < R_e$) 高さhの円筒面における接線方向のせん断力は、

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad \text{--- (1)}$$

で表わされる。一方、ビンガム流動のレオロジー方程式は、図-2から

$$\tau = \eta_{pl} \dot{\gamma} + \tau_0 \quad \text{--- (2)}$$

である。また、図-1に示されるように、接線速度は、 $v = r\dot{\theta}$ である。故に、変形速度 $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = r \frac{d\dot{\theta}}{dr}$ 、よって基礎方程式は、

$$\tau = \eta_{pl} \cdot \frac{dv}{dr} + \tau_0 \quad \text{--- (3)}$$

となる。回転系に、この基礎方程式を適用すると、

$$\frac{M}{2\pi r^2 h} = \eta_{pl} \cdot r \frac{d\dot{\theta}}{dr} + \tau_0 \quad \text{--- (4)}$$

そこで4式を解くと、

$$\eta_{pl} \dot{\theta} = -\frac{M}{4\pi h r^2} - \tau_0 \ln r + C \quad \text{--- (5)}$$

ここで、外円筒は静止しているので円筒壁ではすべりが無いという条件から、 $r = R_e$ のとき $\theta = 0$ 、

$$\therefore C = \frac{M}{4\pi h R_e^2} + \tau_0 \ln R_e \quad \text{--- (6)}$$

$$\therefore \eta_{pl} \dot{\theta} = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_e^2} - \frac{1}{r^2} \right) - \tau_0 \ln \frac{r}{R_e} \quad \text{--- (7)}$$

そこで、 $r = R_i$ 、 $\dot{\theta} = \Omega_i$ で試料は全流動するから、

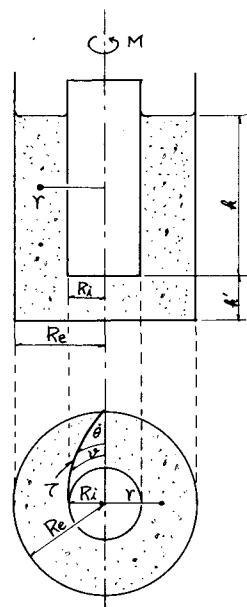
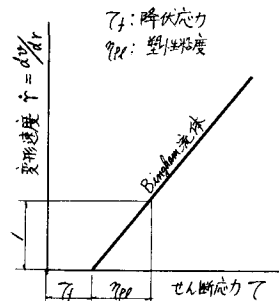


図-2. Bingham 体のレオジ曲線



$$\eta_{pe} \Omega_i = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right) - \tau_0 \ln \frac{R_i}{R_e} \quad \text{----- (8)}$$

今、装置定数 k_1, k_2 を用いて (8) 式を変換すると、

$$\Omega_i = -\frac{k_1}{\eta_{pe}} \cdot M + \tau_0 \cdot \frac{k_2}{\eta_{pe}} \quad \text{----- (9)}$$

が導かれる。ただし、 $k_1 = \frac{1}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_e^2} \right)$, $k_2 = \ln \left(\frac{R_e}{R_i} \right)$ である。

ここで、 $\Omega_i \sim M$ 線図は明らかに線形式で表わされることが分る。(9) 式は一般に Reiner-Rivlin の式と呼ばれるものである。

以上のことから、図-3に示す回転円筒内流動のコンシステンシー曲線において、そのコンシステンシー変数を速度勾配 V およびせん断応力 P で表わすと、

$$V = \frac{2 \Omega_i}{1 - a} \quad \text{----- (10)}$$

$$P = \frac{M}{2\pi h R_i^2} \quad \text{----- (11)}$$

ただし、 Ω_i = 角速度、 $a = \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^2$, M = トルクである。

今、流動特性のわからない試料をこの内円筒回転粘度計に入れて、回転速度、トルク、外円筒、内円筒の半径、流体中に没している内円筒の有効深さを測定し、式 (10) (11) から $V \cdot P$ を求めてグラフにプロットすれば、図-3のコンシステンシー曲線が得られる。この曲線の直線部と横軸との交点を τ_0 とすれば、

$$\tau_0 = \tau_0 \cdot \frac{2 \ln \left(\frac{R_i}{R_e} \right)}{1 - a} \quad \text{----- (12)}$$

ただし、 $a = \left(\frac{R_i}{R_e} \right)^2$ である。

この式から降伏応力 τ_0 が求められる。ここで、塑性粘度 η_{pe} は、このコンシステンシー曲線の直線部の逆勾配として求められる。求めたシオロジ一定数 η_{pe} および τ_0 は、装置の形状寸法の影響のない線図として表わせるので一般性を持ったものといえよう。

3. 本実験に用いた回転粘度計の構造および性能

この粘度計は、写真-1に示すように内円筒回転式で、ローターと容器の間に試料を入れローターを回転させることによりローター側面のコンフリートに働くせん断力をトルクメーターで読む型式のものである。また、モーターの回転を自由に变速できる無段变速機を有し、回転速度はダイナモを回転させることにより回転計で読むことができる。回転計は最大1500rpmまで測定できることになっているが、実験の結果、本機を用いてモルタルおよびコンフリートを試験できる範囲を300rpm

図-3, コンシステンシー曲線

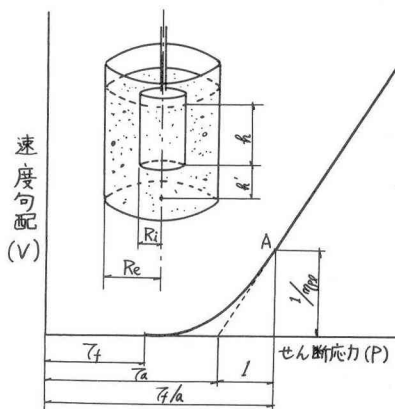


図-4, トルクメーター

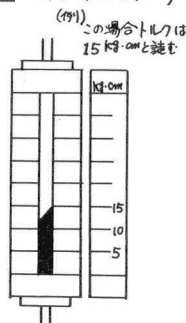
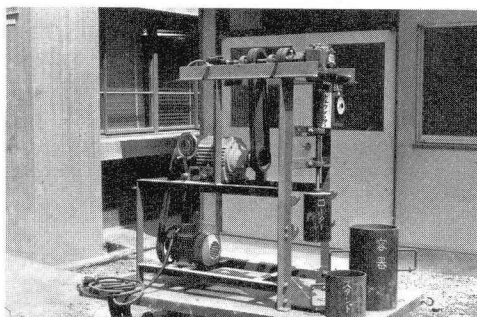
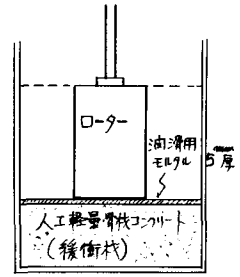


写真-1, 本実験に用いた回転粘度計



にとれば十分である。また、写真-1および図-4に示されるトルクメーターは、試料の軟らかさの程度によって自由に交換可能な部品になっており、一般にスランプ0~5cmの場合は0~250 kg-cmの容量のメーターを使用し、スランプ5~10cmの場合は0~170 kg-cmのものを使用する。また、スランプ10cm以上の軟練りコンクリートの場合は、0~100 kg-cm程度のトルクメーターが使用できる。しかし、この種のトルクメーターはトルクの判読が一般に困難であり、デジタル式に改良すべきであると思われる。

図-5. ローター底部詳細図



なお、ローターの半径は7cm、高さ24cm、容器の半径11.5cm、深さは緩衝材を容器底部に敷くことにより任意に選ぶことができる。しかし、一般にローターの端部影響を無視するために、図-5に示すようにローター底部と容器との間を5mmとし、この間にセメント(C):砂(S):水(W)の比率をC:S:W=1:3.5:0.4となるようなモルタルを敷いて実験を行った。このようにすれば、その吸収トルクが0となり、かつ、ローターの回転によって拡散しない程度のコンシステンシーを有するように、試的に配合を定めたものである。

現在、回転計の最小目盛は20 r.p.m.となっているが、この実験は、低速における試験値が重要であり、現在の $\frac{1}{10}$ 程度の精度が要求される。これは、ダイナモのギヤ比を変換することにより解決できる。

4. 回転粘度計の設計

図-3のコンシステンシー曲線からレオロジー定数 τ_0 および η_{pr} を知るためには、少なくともA点以上の所までは $P \cdot V$ をプロットする必要がある。この点のせん断応力は $\frac{T}{A}$ で、そのトルクは $2\pi R_e^2 \tau_0$ である。この時の回転速度は7式にこのトルクの値を代入して求められる。

ここで、粘度計の最小限度の性能を表わす意味で添字Sを付すると、

$$\eta_{pr} \dot{\Omega}_S = \frac{2\pi R_e^2}{4\pi h} \tau_0 \left(\frac{1}{Re^2} - \frac{1}{R_i^2} \right) - \tau_0 l_m \frac{R_i}{Re} \quad \text{--- (13)}$$

$$\therefore \eta_{pr} \dot{\Omega}_S = \frac{\tau_0}{2} \left(1 - \frac{1}{a} + 2.3 \log \frac{1}{a} \right). \quad \eta_{cm^2} \quad \text{--- (14)}$$

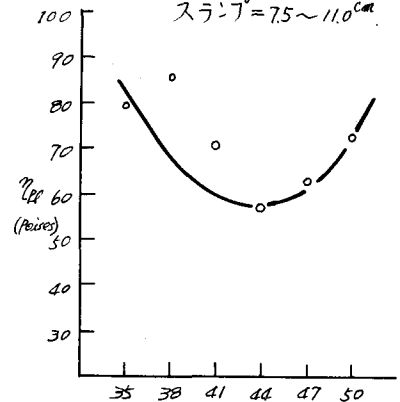
$$\text{故に回転速度は, } N_S = 9.55 \frac{\tau_0}{\eta_{pr}} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2a} + 1.15 \log \frac{1}{a} \right). \quad \text{r.p.m.} \quad \text{--- (15)}$$

$$\text{である。ただし, } \dot{\Omega}_S = \frac{2\pi}{60} N_S. \quad \text{rad/sec.} \quad \text{よってトルクは, } M_S = 2\pi R_e^2 \tau_0 \quad \text{--- (16)}$$

となる。ここで、 N_S, M_S を極小小さいものとして、しかも広範囲の試験に適応し、測定誤差の少ない測定器の設計が望ましい。そこで、 η_{pr} と τ_0 を仮定して(15)式および(16)式に代入し、回転数 N_S トルク M 、ローター半径 R_i 、容器半径 R_e および比半径 $\frac{R_e}{R_i}$ などの相互関係を用いて、所用の回転粘度計を設計することができる。一般に円周方向の試料の厚さは粗骨材最大寸法の3~4倍は必要だから、たと

図-6. S_A と η_{pr} との関係

$w/c = 50\%$, $w = 181 \text{ kg/m}^3$
人工軽量骨材 (メサイト)
スランプ = 7.5 ~ 11.0 cm



えは粗骨材の最大寸法25 mmの骨材を用いる場合、その試料の厚さは約10 cmとなる。この場合、上式の相互関係を用いて設計すると、ローター半径10 cm、高さ40 cm、容器の半径20 cm、深さ50 cm以上、回転数 $N_s=200$ r.p.m、トルク $M=500$ kg-cmとなる。従つて、測定器の余裕をみて、回転計は最大300 r.p.m、トルクメーターは0~600 kg-cm程度のもが必要となるであろう。

5. 実験例

① 最適 S/A の判定。

V・Bコンシステンシーメーターによつて最適 S/A を判定する場合、一般に軟練りコンクリートには適用できない。しかし、回転粘度計によれば、軟練りおよび硬練りを問わず、すべての試料に適用できる。図-6は人工軽量骨材を使用した比較的軟練りのコンクリートについて、塑性粘度 η_{pl} によつて最適 S/A の判定が可能であることを示唆しているものである。

② フィニッシュビリチーの測定。

床版コンクリートおよび舗装コンクリートなどのように、一般に表面仕上げの必要なコンクリートは、フィニッシュビリチーに密んでいることが要求される。この目的のために特に開発された舗装用減水剤(ポブリスNo.100N)を用いてフィニッシュビリチーの比較試験を実施してみた。図-7は、これらの実験結果であるが、比較試験のために用意されたモルタルはすべてコンシステンシーおよび空気量を同一にしてある。

この実験結果から判断できることは、舗装用減水剤を用いたモルタルの場合、他のモルタルにくらべて $\bar{\eta}_f$ が小さく、 η_{pl} が大きいことである。フレッシュコンクリートの初期せん断降伏値 $\bar{\eta}_f$ は、そのコンクリートの表面の変形能を表わし、また、塑性粘度 η_{pl} は、材料分離の抵抗性を示すものと考えられるから、この現象は、モルタル表面の仕上げ安さを示し、材料分離の傾向が小さいことを示すものと解釈できる。

コンクリートの場合も同様に、図-8に示すように、舗装用減水剤を用いた場合は、他の減水剤を用いた場合に較べて $\bar{\eta}_f$ は一般に小さく、逆に η_{pl} は大きい。このことはモルタルと同様に、本試験機によつて、フィニッシュビリチーの検出が可能であることを示唆するものといえよう。

参考文献

1. Markus Reimer : (山田嘉昭, 柳澤延房共訳), シオロジ-の基礎理論, コロナ社, 1969.
2. T. C. Powers : The properties of fresh concrete. Wiley, 1968.

図-7. モルタルにおける η_{pl} , $\bar{\eta}_f$ およびフロー $S/A=2.25$

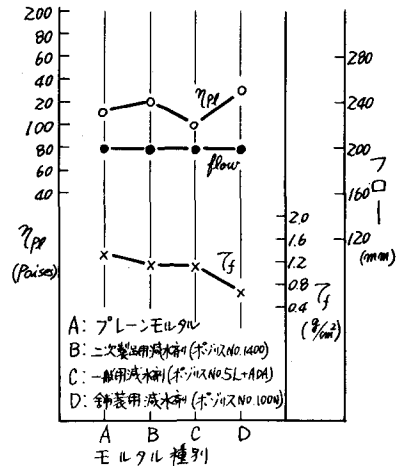


図-8. フィニッシュビリチーの比較(舗装用減水剤と一般用減水剤とを比較)

$w_k = 40\%$ $S/A = 44\%$
 $C = 383$ kg/m³ (舗装用)
 $C = 370$ " (一般用)
 川砂, 川砂砂利

