

[1057] 回転粘度計によるレオロジー定数測定方法に関する 有限要素解析

正会員 谷川恭雄 (三重大学工学部)

正会員 森 博嗣 (同上)

増田一幸 (三重大学大学院)

正会員 ○渡辺健治 (同上)

1. まえがき

回転粘度計は、フレッシュコンクリートの各種レオロジー定数測定装置の中でも最も多用されているものの一つである[1,2]。しかし、コンクリートのような大きな粗骨材を含む多相材料への本装置の適用は、この種の粘度計が持つ本来の使用条件を超えるため、回転粘度計の適用できる試料の範囲には限界があることが既に指摘されており[3]、試験条件や装置の形状・寸法の違いから各研究者のフレッシュコンクリートに関する測定結果に相違がみられ、測定値の信頼性に疑問が持たれているのが現状である。

筆者らは、既に提案した粘塑性有限要素法[4]を用いて、フレッシュコンクリート・モルタルの各種のコンシステンシー試験やレオロジー試験のシミュレーションを行い[5]、これらの試験方法の特性の理論的な解明を試み、問題点を指摘してきた。本報では、同解析手法を回転粘度計のシミュレーションに適用し、各種の試験条件が測定値に与える影響について考察を行う。

2. 回転粘度計の問題点

フレッシュコンクリートのレオロジー試験として回転粘度計を用いる場合に、主として以下のような問題点が指摘されている。

- 1) 装置サイズに比較して著しく大きい粗骨材の存在により、層流の仮定が乱される可能性がある。
- 2) 試料が比較的大きな降伏値を持つため、側壁面におけるすべりが無視できない。
- 3) 底面部(内円筒端)における吸収トルクの影響の程度が不明確である。
- 4) 骨材のインターロックに起因する変形抵抗力(内部摩擦)のため、試料の下部では自重によって見かけ上昇降伏値が大きくなり、容器内の試料のレオロジー性質に上下の異方性が生じると考えられるが、これが考慮されていない。

本研究の目的は、以上の問題点を粘塑性有限要素法を用いた解析によって解明することにあるが、本報では、主として円筒側壁面におけるすべりの影響(問題点2)を取り上げ、装置の形状・寸法などの試験条件による影響について検討を行った。また、試料の内部摩擦および底面部における吸収トルクの影響についても若干の考察を行った。

3. 解析方法

3.1 回転力を受ける軸対称体の有限要素法

回転粘度計の形状は回転中心軸に関して対称であり、解析には軸対称リング要素を使用するが、軸回転力を受けるため、応力やひずみは円周方向を含めた3次元問題として取り扱う必要がある。解析に用いた座標系およびひずみマトリックスを、図-1および表-1に示す。円周(θ)方向に関する応力と変位のすべての成分を一樣と仮定した以外は、通常の3次元解析と同様である。粘塑性有限要素解析手法の詳細については、既報[4,6]を参照されたい。

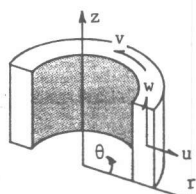


図-1 軸対称座標系

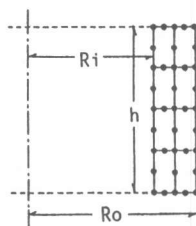


図-3 要素分割

表-1 軸対称ひずみマトリックス

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{zr} \\ \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial r \\ u/r \\ \partial w / \partial z \\ \partial v / \partial z \\ \partial u / \partial z + \partial w / \partial r \\ \partial v / \partial r - v/r \end{Bmatrix}$$

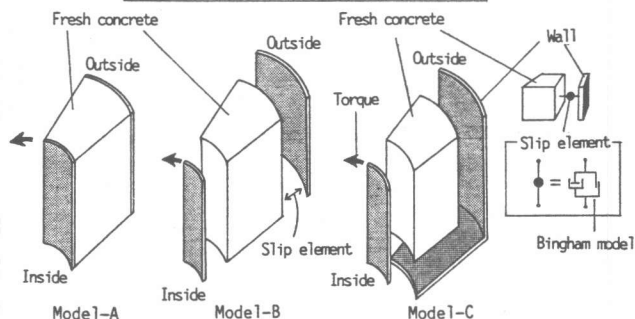


図-2 解析モデルの概略

表-2 試料に関する入力パラメータ

$\tau_y(\text{gf/cm}^2)$	$\eta(\text{kPa}\cdot\text{s})$	$\tan\phi$	ρ	S_1	S_2	S_3	S_4
0.0~3.0	0.06~0.10	0.0~0.3	2.3	0.03	0.10	0.06	1.60

[Notes] τ_y : Yield value, η : Plastic viscosity, $\tan\phi$: Internal frictional coefficient, ρ : Specific gravity, $S_1 \sim S_4$: Parameters of slipping resistance in following equation; $\sigma_h = S_1 B \sigma_n + S_2 B + S_3 \sigma_n + S_4$, σ_h : Slipping resistance stress (gf/cm^2), B : Slipping velocity (cm/sec.), σ_n : Normal stress (gf/cm^2).

表-3 装置に関する入力パラメータ

h	R_o	R_i/R_o
5~30	10~25	0.1~0.9

[Notes]
 h : Height of inner rotor (cm)
 R_o : Radius of inner rotor (cm)
 R_i : Radius of outer rotor (cm)

3.2 解析手順

回転粘度計においては、内円筒と外円筒が θ 方向に相対的に運動するが、円筒側壁面に接する試料に対しては、すべり抵抗によって力が伝達される。解析には、既に提案したすべり要素およびすべり面積のモデル[6]を用い、試料と側壁面との相対運動を考慮した。解析モデルの概略を図-2に示す。解析モデルは、側壁面ですべりが生じず、底面部の抵抗を無視した理想状態を想定したモデルA、側壁面のすべり挙動のみを観察することを目的として、両円筒側壁面をすべり要素で拘束し底面部をローラーとしたモデルB、さらに、底面吸収トルクが生じる極端な例として、底面部にもすべり要素を導入したモデルCの3種類である。すべり抵抗特性の入力データは、フレッシュコンクリートおよびモルタルについて行った実験[7]によって定量化した値を用いた。

回転粘度計のシミュレーションに用いた要素分割を図-3に示す。なお、トルクは内円筒側壁面に θ 方向に与えた。解析に用いたフレッシュコンクリートの材料性質および回転粘度計の装置の形状・寸法に関する入力データを、それぞれ、表-2および表-3に示す。

4. 解析結果とその考察

4.1 コンシステンシー曲線

理想状態のモデルAを用いた場合の解析結果の一例を図-4に示す。この図は、計算の入力値であるトルク(M)と、出力値である角速度(Ω)から、表-4中の(1)および(2)式によって、ひずみ速度($\dot{\gamma}$)およびせん断応力(τ)を算定して得られたコンシステンシー曲線である。このモデルのように、側壁面ですべりが生じない場合には、コンシステンシー曲線の後半における直線部の逆勾配である塑性粘度(η^*)は、入力値(η)と一致し、また、直線部を延長したときの τ 軸切片

表-4 回転粘度計の基礎式

where,	
$\tau = \frac{M}{2\pi R i^2 h}$ —(1)	τ : Shear stress (gf/cm ²) M : Torque (g·cm)
$\dot{\gamma} = \frac{2\Omega}{1-(Ri/Ro)^2}$ —(2)	Ri : Radius of inner rotor (cm) Ro : Radius of outer rotor (cm) h : Height of inner rotor (cm) $\dot{\gamma}$: Strain rate (/sec.) Ω : Angular velocity of rotor (rad/sec.)
$\tau_y = \frac{(Ri/Ro)^2 - 1}{21n(Ri/Ro)} \cdot \tau_a$ —(3)	τ_y : Yield value (gf/cm ²) τ_a : Intersection of stress axis and linear portion of consistency curve (gf/cm ²)

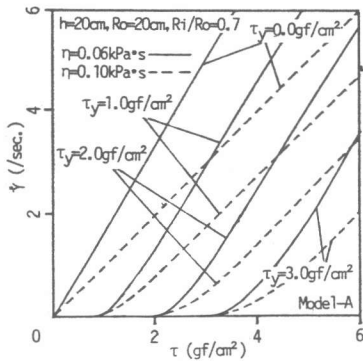


図-4 解析結果の一例
(理想状態)

表-5 入力値と解析の出力値の比較

Input		Calculated (No Slipping)				
τ_y	η	τ_a^*	τ_y^*	η^*	τ_y^*/τ_y	η^*/η
1.0	0.06	0.9(1.2)	0.68(0.91)	0.045(0.06)	0.68(0.91)	0.75(1.00)
2.0	0.06	2.1(2.5)	1.60(1.90)	0.042(0.06)	0.80(0.95)	0.70(1.00)
3.0	0.06	3.4(3.9)	2.58(2.96)	0.043(0.06)	0.86(0.99)	0.72(1.00)
1.0	0.10	1.2(1.2)	0.91(0.91)	0.072(0.10)	0.91(0.91)	0.72(1.00)
2.0	0.10	1.8(2.5)	1.37(1.90)	0.071(0.10)	0.69(0.95)	0.71(1.00)
3.0	0.10	3.2(3.9)	2.43(2.96)	0.067(0.10)	0.81(0.99)	0.67(1.00)

[Notes] τ_y : Yield value (gf/cm²), η : Plastic viscosity (kPa·s),
 τ_a : Intersection of stress axis and linear portion (gf/cm²).

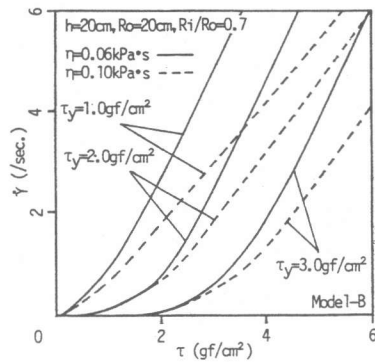


図-5 解析結果の一例
(すべり考慮)

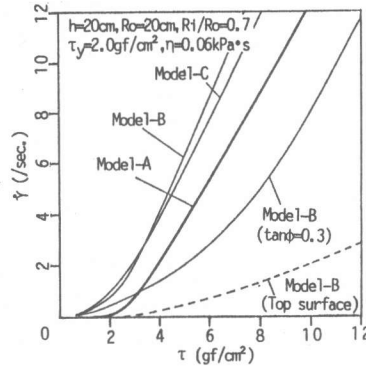


図-6 各モデルによるコンシ
ステンシー曲線の比較

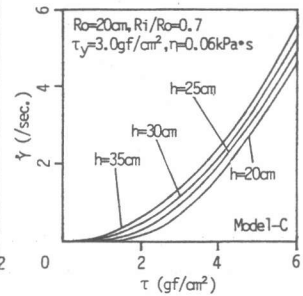


図-7 試料高さ(h)による底面
吸収トルクの影響

(τ_a)を表-4中の(3)式に代入して得られる降伏値(τ_y^*)も、入力値(τ_y)とほぼ一致している(表-5参照)。以上のように、理想的な試験条件下では、回転粘度計の理論式と解析結果はよく一致し、本解析手法の妥当性が確認できた。

側壁面におけるすべりを考慮したモデルBを用いた場合に得られるコンシステンシー曲線の一例を図-5に示す。すべりが生じると、一般に同じトルクの際の回転数が大きくなり、コンシステンシー曲線は上方向に移動する。このため、試料の塑性粘度および降伏値を小さく見積る結果となる。すべりに起因するこの測定誤差の大きさは、表-5に一例を示すように、試料のレオロジー性質自身に影響を受けるとともに、装置形状などによっても異なるので注意する必要がある[8]。

底面部にもすべり抵抗力が働くモデルCを加え、3つの解析モデルによるコンシステンシー曲線を比較したものを図-6に示す。一般に、底面部(内円筒端)の影響については、理論式による近似補正をしたり、この部分に比較的軟らかい試料を入れて、影響を最小限にする工夫が行われている。今回の解析では、これらの正確なシミュレーションは行わなかったが、図-6に示し

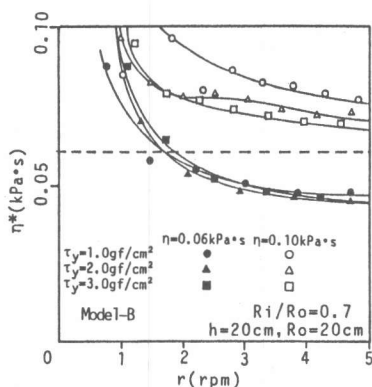


図-8 回転数(r)と塑性粘度(η^*)の関係

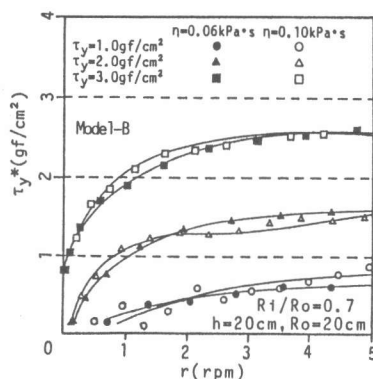


図-9 回転数(r)と降伏値(τ_y^*)の関係

たように、モデルCのような極端な例でも、底面部の吸収トルクの影響は側壁面のすべりによる影響に比べれば小さい。また、図-7に示すように、容器の高さ(h)が大きくなるほど、底面部の吸収トルクの影響は相対的に小さくなる。

4.2 レオロジー定数の測定値

図-8は、低速回転時における回転数(r)と測定される塑性粘度(η^*)の関係に関する解析結果の一例である。低い回転数で測定される塑性粘度(η^*)の値は、入力値(以下、真値と記す)より大きく、回転数が高くなるにつれて、しだいに小さくなり、最終的には試料の降伏値(τ_y)にかかわらずほぼ一定値に収束する。しかし、すべりが生じると、この領域で得られる塑性粘度(η^*)の値は、真値(η)より小さくなる。また、図には示していないが、内外円筒半径比(R_i/R_o)が大きくなるにしたがって、塑性粘度(η^*)は、より低い回転数で一定値に収束する傾向がある。

低速回転時における回転数(r)と測定される降伏値(τ_y^*)の関係に関する解析結果の一例を図-9に示す。低い回転数で測定される降伏値(τ_y^*)の値は、真値(τ_y)より小さな値を示しているが、回転数の増加にともなって増大する傾向にある。

以下の考察では、回転数が充分大きい状態から測定される塑性粘度(η^*)および降伏値(τ_y^*)について検討する。

内外円筒半径比(R_i/R_o)と測定されるレオロジー定数(η^* , τ_y^*)の関係に関する解析結果の一例を図-10および図-11に示す。一般に、測定される塑性粘度(η^*)の値は、真値(η)の約1/2前後であるが、内外円筒半径比(R_i/R_o)が0.5~0.6のとき最も大きな値となり、また、外円筒半径(R_o)が大きくなるにつれて誤差は小さくなる。測定される降伏値(τ_y^*)については、誤差の傾向は複雑であるが、外円筒半径(R_o)が大きくなるほど、降伏値(τ_y^*)は、塑性粘度(η)の影響を受けにくくなる。

また、図には示していないが、試料高さ(h)が大きくなるにしたがって、測定される塑性粘度(η^*)は全体に大きくなり、真値に近づく。これは、試料高さ(h)が高くなると、下部の試料が自重によってより大きな側圧を受け、壁面におけるすべりが生じにくくなるためである。

4.3 粗骨材のインターロックの影響

フレッシュコンクリートおよびモルタルでは、骨材のインターロックに起因する内部摩擦が生じる。応力に依存するレオロジー性質を表現するモデルとして、筆者らが提案した構成則[9]によるシミュレーションを、モデルBを用いて行った。図-12に、内部摩擦($\tan \phi$)が生じた場合の解析結果の一例を示す。この図から明らかなように、内部摩擦($\tan \phi$)の増加にともなってコ

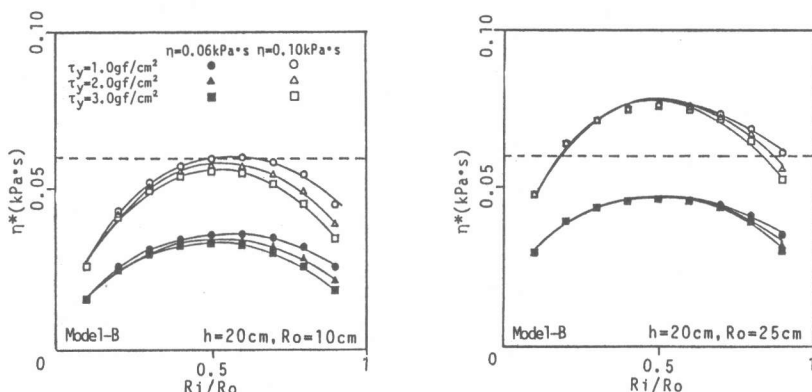


図-10 内外円筒半径比(R_i/R_o)と塑性粘度(η^*)の関係

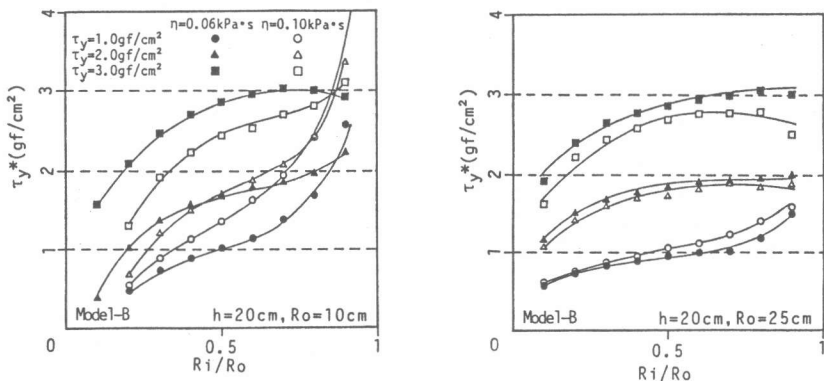


図-11 内外円筒半径比(R_i/R_o)と降伏値(τ_y^*)の関係

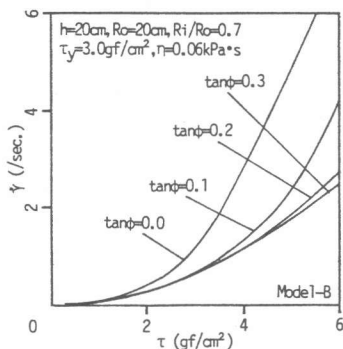


図-12 内部摩擦($\tan\phi$)の影響

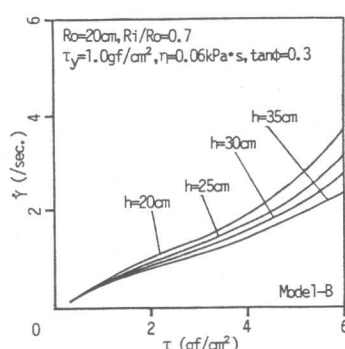


図-13 試料高さ(h)の影響

ンシステンシー曲線は下方に大きく移動し、非常に大きな誤差を生じることになる。この傾向は、図-13に示すように、容器の高さ(h)が高くなるほど顕著になるため、側壁面のすべりや底部部の吸収トルクの影響を避けるために容器高さを増すことには注意が必要である。

4.4 容器内部の流速分布

回転粘度計の試験時における容器内の試料の流速分布に関する解析結果の一例を図-14および図-15に示す。これらの図に示すように、試料の流速は上下部で同一ではない。一般に、すべりが生じやすい上層部では試料の流速は遅く、底面部の抵抗を受ける場合は、最下部の流速も小さくなる。また、試料の内部摩擦を考慮すると、下部ほど流速が抑制される結果となる。

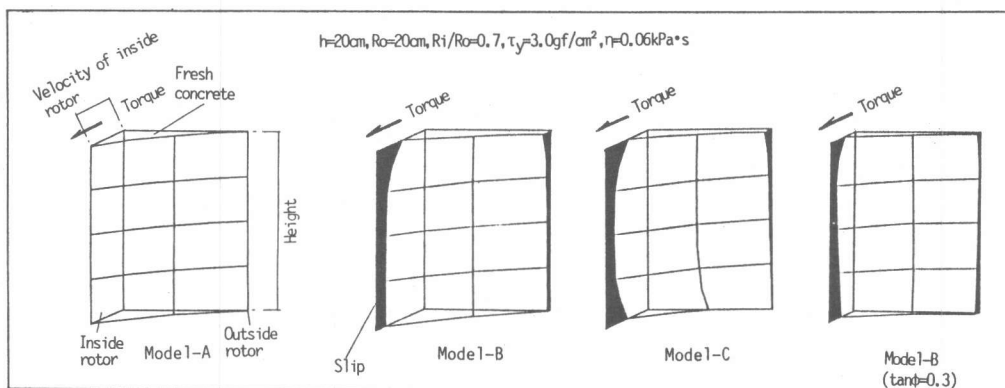


図-14 各モデルによる内部流速分布の比較

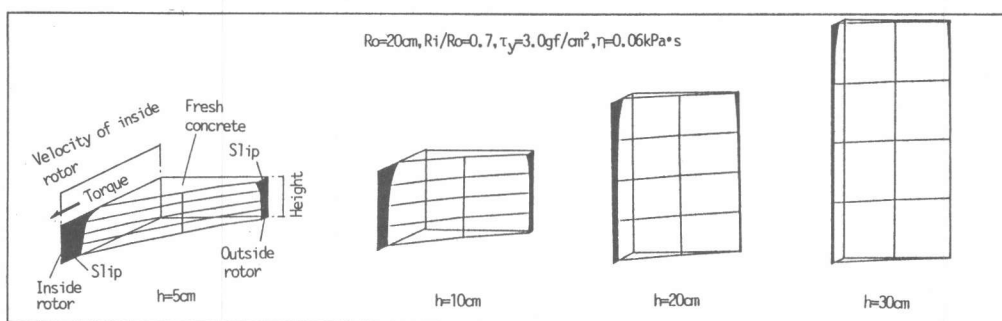


図-15 試料高さ(h)による内部流速分布の影響

5. 結論

本報では、粘塑性有限要素法による回転粘度計のシミュレーションを行い、各種試験条件が測定結果に与える影響について調べた。これまでも、側壁面におけるすべりに関しては、この影響を除去するため、試料上面に浮子を置いて試料自身の流速を測定するなどの補正対策が考案されている[3,10]。しかし、試料の流速は、上部では同位置の下部より遅いため、このような補正は逆にコンシステンシー曲線を下側(図-6中の破線)に見積る結果となる。したがって、回転粘度計を用いてフレッシュコンクリートのレオロジー定数を精度よく測定するためには、あらかじめ使用する装置に対して解析的な検討を行い、その特性を充分把握しておく必要があると思われる。また、本解析では、試料を均質な連続体として取り扱っているが、実際には、粗骨材と容器のサイズが重要な要因になるものと思われる。この点については今後の課題としたい。

〔謝辞〕本研究には黒川善幸君(青木建設)の助力を得た。また、本研究費の一部は竹中育英会建築研究助成金によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- [1] Wesche, K., Flatten, H. and Von Berg, W., Proc. of RILEM Seminar, Vol.1, pp.2.10-1-2.10-11, 1973.3.
- [2] 村田・菊川, フレッシュコンクリートの物性値ならびに挙動に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.9-16, 1983.
- [3] 村田・菊川・杉山, セメント技術年報, Vol.29, pp.204-206, 1975.
- [4] 森・谷川, 日本建築学会構造系論文報告集, No.374, pp.1-9, 1987.4.
- [5] 森・谷川, 日本建築学会構造系論文報告集, No.377, pp.16-26, 1987.7.
- [6] 谷川・森・筒井・黒川, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.25, pp.13-16, 1987.2.
- [7] 谷川・森・黒川・田中・梅本, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.111-112, 1987.10.
- [8] 谷川・森・黒川・増田, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.26, pp.25-28, 1988.2.
- [9] 谷川・森・筒井・黒川, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.115-120, 1987.
- [10] 長滝・米倉, セメント技術年報, Vol.29, pp.207-212, 1975.