

論文 円柱旋回型レオメータによるビンガム体のレオロジー特性評価

呉 相均^{*1}・野口貴文^{*2}・友澤史紀^{*3}

要旨:フレッシュコンクリートを理想的なビンガム体として表されると仮定すれば、その物理量である 2 つのレオロジー定数、降伏値および塑性粘度を用いることによりこれまで定性的にしか表現されていなかったフレッシュコンクリートの流動特性を定量的かつ理論的に評価することが可能になる。本研究はフレッシュコンクリートのレオロジー定数測定をコンクリートの調査設計および品質管理に役立てることを目標として、円柱体周りのビンガム体の流動に関する解析結果を応用した、実験室だけでなく現場でも適用可能な円柱旋回型レオメータの開発経緯、その評価方法に関する検討およびそれを実験室レベルで適用した結果を示すものである。

キーワード:円柱旋回型レオメータ, レオロジー定数, 高流動コンクリート, Stokes 近似

1. はじめに

従来の経験的な試行に基づくスランプ試験などでは、高流動コンクリートのコンシステンシーを評価することが困難であり、近年、流動特性をレオロジー的な観点から解明しようとする努力が続けられてきている^{1),2)}。フレッシュコンクリートを理想的なビンガムモデルで表されると仮定すれば、その物理量である 2 つのレオロジー定数、降伏値および塑性粘度を用いることによりこれまで定性的にしか表現されていなかったフレッシュコンクリートの流動特性を定量的かつ理論的に評価することが可能になる。従って、フレッシュコンクリートのレオロジー性質の測定または評価を目的としてペースト、モルタル、コンクリートなどのレオロジー定数測定について様々な測定方法が提案されて来た^{3),4),5)}。それらは、大まかに球引上げ試験、ツーポイント試験(ミキサ型粘度試験)、回転粘度計による試験などに分けられる。

球引上げ試験は、その簡便性から、ペースト

およびフレッシュモルタルのレオロジー定数測定に広く用いられているが、フレッシュコンクリートに用いる場合の問題点としては、層流を形成させるために、粗骨材寸法の影響を考慮して球の寸法を決めなければならないこと、球表面においてのすべりが発生する可能性があることなどが挙げられる。

ツーポイント試験は、得られた値はビンガムモデルのレオロジー定数ではないので、「見かけのレオロジー定数」と呼ばれる。また回転する翼部分の解析が難しい。

回転粘度計は、フレッシュコンクリートに適用する場合、問題が多い。まず、層流が得られるような均質体としてフレッシュコンクリートを仮定するには、相当量のコンクリートを用いた大きなサイズの装置が必要になる。また、粘性に比べ降伏値が大きいため、板表面でコンクリートがすべったり、非常に速い回転数での測定が必要となり、試料の混練による性質変化が生じやすいなどの問題がある⁶⁾。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 工修(正会員)

*2 東京大学助教授 工学系研究科建築学専攻 博士(工学)(正会員)

*3 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻 工博(正会員)

上記の方法以外にもフレッシュコンクリートのレオロジー試験方法は、数多く提案されているが、理論的な問題点以外にも実際コンクリートのワーカビリティへの適用性などの応用性に関する問題点も残されている。

そこで本研究では、レオロジー定数測定をコンクリートの調合設計および品質管理に役立てることを目標として円柱体の解析結果を応用した、実験室だけでなく現場でも適用可能な円柱旋回型レオメータを開発した。本論文ではその開発経緯、評価方法に関する検討および実験室レベルでビンガム体に適用した結果を示すものである。

2. レオメータの解析

著者らは、高流動コンクリートの型枠内での流動を理論的に解明するために、円柱体のビンガム流体の中での挙動を理論的に考察した⁷⁾。円柱のまわりに一様流が流れる場合、円柱に働く力(Π)は Stokes 近似により式(1)のように求められる⁸⁾。

$$\Pi = \frac{8\pi\eta V}{1 + 2\ln\left(\frac{l_c}{r}\right)} \quad (1)$$

ここで、 Π : 抗力(N/m), η : 粘性(Pa·s), r : 円柱の断面半径(m), V : 流動速度(m/s), l_c : 長

さの単位を持つ任意の定数(m)

この式(1)をビンガム流体に適用することによりせん断応力(τ)とひずみ速度($\dot{\gamma}$)は次の式(2)および(3)から得られる。この式と実験式(4)を用いることで、円柱体がビンガム流体の中を動く時の流動曲線が直ちに求められる。このような円柱体を用いた簡単な方法で、ビンガム流体のレオロジー特性を調べることが可能となった⁷⁾。

$$\tau = \frac{F \left[1 + 2 \ln \left(\frac{l_c}{r} \right) \right]}{16\pi r L} \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{2r} \quad (3)$$

$$l_c = 0.9637r + 0.0011 \quad (4)$$

ここで、 τ : せん断応力(Pa), $\dot{\gamma}$: ひずみ速度(1/s), F : 荷重(N), L : 円柱の長さ(m)

本研究で用いた円柱旋回型レオメータの形状と機能を図-1に、このレオメータを用いてレオロジー定数測定実験を行う様子を図-2に示す。図のようにレオメータは、携帯可能で、一人でも簡単に操作できるし、測定に広い場所は不要である。また、以下に示すように試験結果のレオロジー評価が理論的に可能であるので、コンクリートのレオロジー評価試験方法として十分

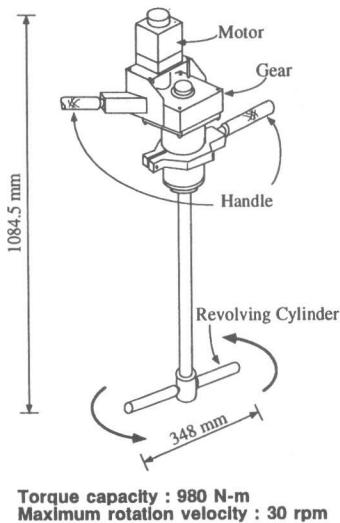


図-1 円柱旋回型レオメータの形状と機能

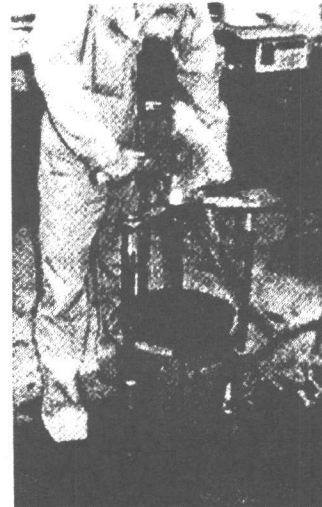


図-2 円柱旋回型レオメータによるレオロジー試験

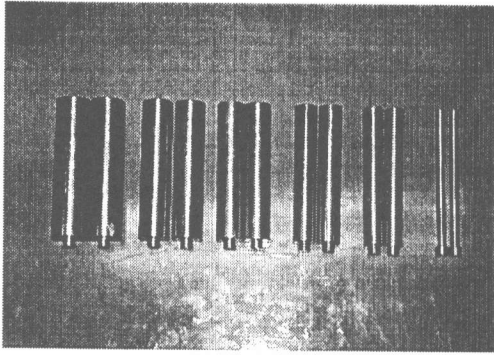


図-3 円柱体の種類

に期待に応えるものである。図-3 はレオメータのトルク測定部分の円柱体の断面半径ごとの種類である。図-4 は旋回しながらトルクを計る円柱体部分を模式図で表現したものであり、種類を変えながら実験ができる。流体からの粘性抵抗を受ける円柱体は図-1のように回転するので、円柱体の軸方向に沿って流速分布が異なるため、式(2)および(3)をそのまま適用できない。円柱体の微小区間 Δx における速度 V は、式(5)のように表現できる。回転軸から距離 x の微小区間 Δx が受ける抗力(ΔF)は、回転により生じるトルク値 $\Delta T'$ と距離 x を用いて式(6)のように表せられる。一方、Stokes 近似を適用すると微小区間 Δx で円柱体受ける抗力($\Delta F'$)は式(7)のようになる。

$$V = \omega x \quad (5)$$

$$\Delta F = \frac{\Delta T'}{x} \quad (6)$$

$$\Delta F' = \frac{8\pi\omega x \eta_{pl}}{1 + 2\ln\left(\frac{l_c}{r}\right)} \Delta x \quad (7)$$

ここで、 ω : 角速度 (rad/s), η_{pl} : 塑性粘度 (Pa·s)

その時、 $\Delta F / \Delta F'$ の比を無次元値 X と定義すれば、ビンガム体においてビンガム数 N との間には式(8)のような関係がある。

$$\frac{\Delta F}{\Delta F'} \equiv X = 1 + N \quad (8)$$

ここで、 $N = \frac{2r\tau_y}{\omega x \eta_{pl}}$ (N :ビンガム数, τ_y :降伏値 (Pa))

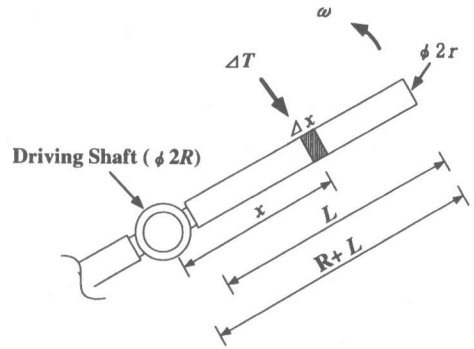


図-4 回転する円柱体の模式図

式(8)に式(6)と(7)を代入し、トルク ΔT に対して整理すると、式(9)のようになる。

$$\Delta T' = \frac{8\pi x (\omega x \eta_{pl} + 2r\tau_y)}{1 + 2\ln\left(\frac{l_c}{r}\right)} \Delta x \quad (9)$$

ここで式(10)のように両辺を、区間 R から $R+L$ まで積分することにより式(11)が得られる。

$$\int_R^{R+L} \frac{\Delta T'}{\Delta x} dx = \int_R^{R+L} \frac{8\pi x (\omega x \eta_{pl} + 2r\tau_y)}{1 + 2\ln\left(\frac{l_c}{r}\right)} dx \quad (10)$$

$$T = \frac{8\pi}{1 + 2\ln\left(\frac{l_c}{r}\right)} \left\{ \left(\omega R^2 L + \omega R L^2 + \frac{1}{3} \omega L^3 \right) \eta_{pl} + (2rRL + rL^2) \tau_y \right\} \quad (11)$$

ここで、 T :トルク値 ($N \cdot m$), R :回転軸の半径 (m)

また、ここで円柱体端部に生じるせん断応力によるトルク (T_e) の影響を、検討を行って結果、微小であり、以後の解析ではその影響を無視することとした。従って、円柱体全部にかかるトルク (T) は式(12)のように考える。

$$T = T' + T_e \approx T' \quad (12)$$

ここで、 $T_e = \pi r^2 \times (R+L) \times \tau_e$

(円柱体端部の影響)

$$\tau_e = \dot{\gamma}_e \eta_{pl} + \tau_y$$

その時、

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{(R+L)} = \frac{\omega(R+L)}{(R+L)} = \omega$$

従って、

$$T_e = \pi r^2 \times (R+L) \times (\omega \eta_{pl} + \tau_y)$$

この式(11)を式(12)を考慮して整理すると式(13)のように表現でき、これはもとのビンガム流体の流動曲線定義式である(14)と比較すれば、せん断応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は式(15)および(16)のように求められる。

$$\frac{T \left[1 + 2 \ln \left(\frac{l_c}{r} \right) \right]}{8\pi r L (2R + L)} = \left(\frac{\omega \left(R^2 + RL + \frac{1}{3} L^2 \right)}{r(2R + L)} \right) \eta_{pl} + \tau_y \quad (13)$$

$$\tau = \dot{\gamma} \eta_{pl} + \tau_y \quad (14)$$

$$\tau = \frac{T \left[1 + 2 \ln \left(\frac{l_c}{r} \right) \right]}{8\pi r L (2R + L)} \quad (15)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega \left(R^2 + RL + \frac{1}{3} L^2 \right)}{r(2R + L)} \quad (16)$$

また式(15)での長さの次元を持つ任意の定数 l_c は、式(4)により求められる。従って円柱旋回型レオメータから得られるトルク値(T)と角速度(ω)を式(15)、(16)に代入し、式(4)を用いることにより、コンクリートのレオロジー定数の算定が可能となる。

3. 実験概要

本研究では、理想的なビンガム流体に近い高流動コンクリートのモデルモルタルを用いてレオロジー試験を行った。円柱旋回型レオメータから得られた値の妥当性を確かめるためには、既に理論的に確立された手法から得られる値と比較して一致していることが必要となる。従って、円盤型回転粘度計で測定した結果と円柱旋回型レオメータの算出結果を比較することにより円柱旋回型レオメータの妥当性を確認した。

3. 1 実験因子および水準

実験因子および水準を表-1に示す。本実験では、レオロジー特性が異なる2水準のモデルモルタルを用いてレオロジー定数の測定を行った。

円柱体の種類については、円柱旋回型レオメ

表-1 実験因子および水準

実験要因	水準	記号
モデルモルタルのレオロジー特性	基準 高粘性	PN PS
円柱体の半径 (mm)	8	r8
	12	r12
	16 20	r16 r20
円柱体の回転速度 (rpm)	1	
	2	
	3	
	4 5	

表-2 使用材料

試料	使用材料
モデルモルタル	高吸水性樹脂+水

表-3 モデルモルタルの調合

記号	高吸水性樹脂の単位重量 (g/l)	フロー (cm)
PN	4.7	21.5
PS	5.4	18.0

ータの妥当性を検討するため、半径を4種類(r8, r12, r16, r20)に変えながらレオロジー定数を測定した。式が正しければ円柱体の半径が変わっても、同じ流体は同一流動曲線を描くと予測される。レオメータの回転速度は、円柱体の回転による試料の構造破壊などが原因で現れるチクソトロピー現象の顕出を最小限に収めるため、また慣性力が無視できる Reynolds 数を考慮して4水準(1, 2, 3, 4, 5 rpm)とした。

3. 2 使用材料および調合

本研究で用いたモデルモルタルの材料を表-2に示す。また調合を表-3に示す。

モデルモルタルは、白色粉末状の高吸水性樹脂を水道水に微量添加することにより粘性を調節し、標準的な高流動コンクリート(*slump flow* ≒ 65 cm)のモルタル部と同等なレオロジー特性を持つようにしたものである。高吸水性樹脂は、粘性を有する他の材料と比較して温度や湿度などの外的環境による経時的な品質変化が少なく安定性の高い材料である。従って均質な流体と仮定できるビンガムモデルとして適切な材

料であると判断される。

3.3 実験方法

円盤型回転粘度計によるレオロジー定数測定では、均質に攪拌した試料を500 ccの容器に入れ、円盤型ローターのひずみ速度が円柱旋回型レオメータと同一範囲になるように回転（回転速度：2, 4, 6, 8, 10 rpm）させてトルクを測定し、仕様に従ってレオロジー定数を算出した。円柱旋回型レオメータの場合は、約40 l容器に均質に攪拌した試料を入れ、レオメータを試料中に挿入して回転速度の上昇課程においてせん断応力を測定した（回転速度：1, 2, 3, 4, 5 rpm）。

また、従来のコンシステンシー試験であるフロー試験を行った。フロー試験は、JIS R 5201に定められたフローコーンを用いて落下運動を与えない状態で広がるフロー値を測定した。

4. 実験結果および考察

表-3にモデルモルタルの調合とともに従来のコンシステンシー試験の結果を示す。モデルモルタルは時間に対する品質の安定性が優れたため、時間経過後もフロー値の変化は確認できなかった。

図-5と図-6は円柱旋回型レオメータから得られたモデルモルタルのトルク値測定結果である。PNとPSどちらも回転速度および円柱体の半径

が増加することに伴いトルク値は大きくなった。図のように、回転速度の増加および円柱体半径の増大に伴うトルク値の増加率は、粘度が高いPSの方が大きい。

図-7は、図-5と図-6でのトルク値と回転速度を式(15)、(16)に代入して算出した結果（円柱旋回型レオメータによるモデルモルタルの流動曲線）である。図中の全点に対する回帰直線の傾きが試料の塑性粘度であり、縦軸の切片が降伏値を表す。図のように円柱の半径が変わってもせん断ひずみ速度とせん断応力の関係は同一曲線上にあることが確認できる。これは式(15)と(16)が理論的に妥当であることを示している。また、図より降伏値、塑性粘度ともに大きいPSの方がひずみ速度の増加に伴う試料の構造破壊に起因するチクソトロピー現象が現れていることも確認できる。

図-8は、PNとPSにおいて回転粘度計から得られた結果と円柱旋回型レオメータから得られた結果を同一範囲のひずみ速度で直線回帰することにより算定した流動曲線を比較したものである。回転粘度計の結果を記号「-RV」で、円柱旋回型レオメータの結果は「-Cy」で表示している。この図からわかるように、円柱旋回型レオメータで得られた流動曲線（太い実線と太い点線）は、いずれのモデルモルタルについても、

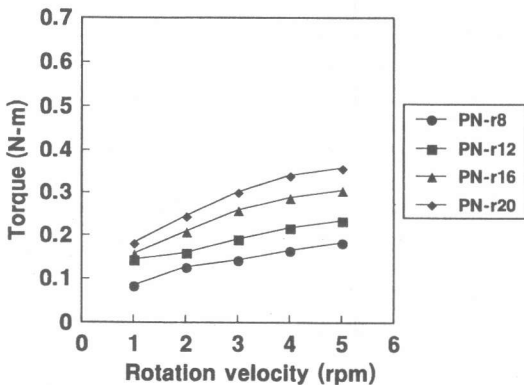


図-5 円柱旋回型レオメータにより測定された回転速度とトルク値の関係(PN)

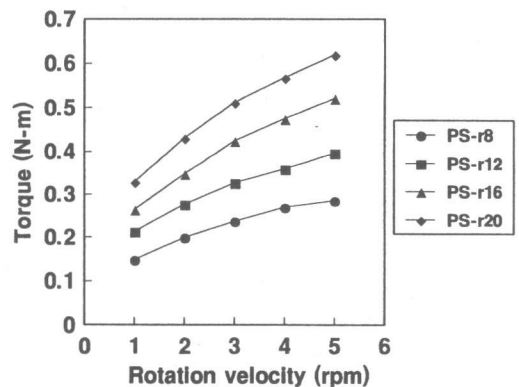


図-6 円柱旋回型レオメータにより測定された回転速度とトルク値との関係(PS)

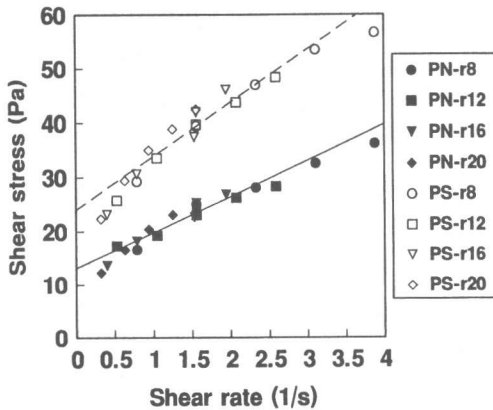


図-7 円柱旋回型レオメータで測定した値を式(15)(16)を用いて算出した結果

回転粘度計から得られた流動曲線(細い実線と細い点線)とよく一致しており、本研究で開発した円柱旋回型レオメータはビンガム体のレオロジー定数測定が可能であるといえる。

5. まとめ

本研究では、高流動コンクリートのレオロジー特性を把握し、それに基づいた調査設計および品質管理を可能にすることを目的として、現場でも適用可能な円柱旋回型レオメータを開発し、その妥当性の評価実験を行った。円柱旋回型レオメータは、円柱体が回転する機構を有しており、それを用いて測定されるトルク値と角速度からせん断応力およびせん断ひずみ速度を算出するものである。その算出過程において、筆者らの導き出した円柱体に対する Stokes 近似式を応用し、(15)、(16)式が最終的に得られた。またこの式の妥当性を確認するために理想的なビンガム流体と思われる高吸水性樹脂で作られた標準的な高流動コンクリート(スランプフロー:65±5cm)のモルタル部と同程度の粘性を持つモデルモルタルを用いて比較実験を行った。その結果、本研究で開発した円柱旋回型レオメータを用いることにより、ビンガム体のレオロジー定数を測定することが可能であった。

今後、この機械を用いて、コンクリートのレオロジー定数測定に適用し、高流動コンクリー

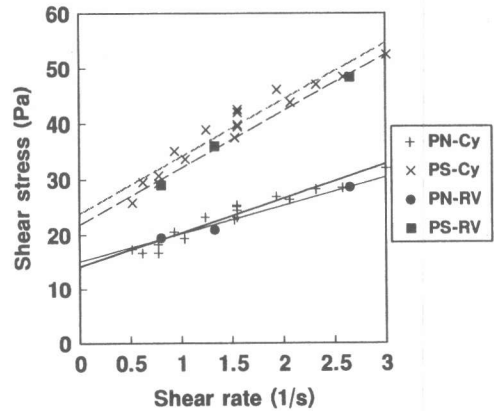


図-8 流動曲線の比較(円盤型回転粘度計と円柱旋回型レオメータの結果比較)

トの材料選定手法および調査設計手法確立のための基礎資料を得る予定である。

参考文献

- 1) Hattori, K. · Izumi, K. : A New Viscosity Equation for Non-Newtonian Suspensions and Its Application, Proceeding of the RILEM Colloquium on Properties of Fresh Concrete, H.-J. Wierig, ed., Chapman and Hall, London, pp. 83-92, 1990
- 2) Tanigawa, Y. · Mori, H. · Watanabe, K. : Computer Simulation of Various Kinds of Consistency and Rheology Tests for Fresh Concrete by Viscoplastic Finite Element Method, Proceedings of RILEM Colloquium on Properties of Fresh Concrete, Hanover, pp.301-308, Oct.1990
- 3) Mizuguchi, H. : Measurement Method of Yield Value and Plastic Viscosity of Fresh Mortars, Review of the 27th General Meeting JCA, Vol. 27, pp. 109-111, 1973
- 4) Ellis, C. · Wimpenny, D. E. : The Assessment of Mix Stability Using the Two-Point Test, Rheology of Fresh Cement and Concrete, The British Society of Rheology, edited by P. F. G. Banfill, E. & F. N. SPON, pp. 281-291, 1991
- 5) de Larrard, F. · Hu, C. · Sedran, T. · Sztikar, J. C. · Joly, M. · Claux, F. · Derkx, F. : A New Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete, ACI Material Journal, V. 94, No. 3, pp. 234-242, May.-June 1997
- 6) コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 日本建築学会, 1994
- 7) 呉 相均 · 野口貴文 · 友澤史紀 : 高流動コンクリートの棒引上げ試験によるレオロジー定数算定, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.406-411, 1997
- 8) Happel, J. · Brenner, H., Low Reynolds Number Hydrodynamics, Prentice-Hall, 1965