

数値流体解析による高流動コンクリートの レオロジー定数評価法に関する研究

小門 武¹・細田 尚²・宮川豊章³

¹正会員 工博 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

²正会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻

スランプフロー試験における高流動コンクリートの流動挙動を数値流体解析によってシミュレートすることの妥当性とその限界を、高流動モルタルを用いた実験値との比較を通して考察し、①変形速度の大きい高流動コンクリートを対象とする場合には、スランプコーンが引き上げられる途上でのスランプコーン側壁の影響をモデル化する必要があること、②塑性粘度と降伏値との比が 1.0sec. 以上の場合には、解析値はフロー半径と到達時間との関係を実験値と比較して高い精度(±20%)でシミュレートしていることを明らかにしている。そして、数値流体解析を通して、降伏値と塑性粘度がフロー半径到達時間に与える影響、さらに、スランプフロー試験から高流動コンクリートのレオロジー定数を評価する方法が示されている。

Key Words : slump flow, high-flow concrete, Bingham plastics, rheological coefficients, yield value, plastic viscosity, numerical analysis, MAC method

1. はじめに

高流動コンクリート^{1), 2)}の材料選定や配合設計および品質管理をより合理性のあるものとし、さらに、型枠の隅々まで充填可能であるかどうかを評価するためのコンクリート充填性解析技術を発展させるためには、高流動コンクリートの流動や変形に関する特性、すなわちレオロジー特性³⁾を把握するとともに、スランプフロー値やフロー到達時間⁴⁾などの評価指標とレオロジー定数との関係を定量的に明らかにしていくことが必要である。

筆者らは、7種類の配合の高流動モルタルについて球引上げ試験を実施し、球の引上げ速度が少なくとも10~60mm/sの範囲では引上げ速度と抗力とはほぼ直線関係にあり、高流動モルタルはBingham流体として取り扱えることを確認している⁴⁾。また、流れの基礎式から、スランプフロー値と降伏値との関係を理論的に考察し、Bingham流体におけるスランプフロー値と降伏値との関係を表わす理論式を導くとともに、高流動モルタルを用いた一連の球引上げ試験とスランプフロー試験との結果から、球引上げ試験から求められる降伏値と、スランプフロー値

を用いて理論式から求められる降伏値とは良く一致することを確認している⁵⁾。

さらに、一連の球引上げ試験とスランプフロー試験との結果から、フロー到達時間と塑性粘度との間には高い相関関係があることを明らかにしている⁴⁾。すなわち、スランプフロー値が500mm以上の場合にはフロー半径200mm到達時間と塑性粘度 η_{pl} との間に、また、スランプフロー値が600mm以上の場合にはフロー半径250mm到達時間と塑性粘度 η_{pl} との間に良好な相関関係があることを明らかにしている。ただし、これらの試験から求められたフロー到達時間と塑性粘度との関係には偏差が含まれているため、スランプフロー値に下限値を設けても、フロー到達時間によって高流動コンクリートの塑性粘度を評価することは精度の上で問題が残る。

フロー到達時間と塑性粘度との関係に偏差が含まれるのは、レオロジー定数のうち塑性粘度だけがフロー到達時間に影響を与えるのではなく、降伏値もフロー到達時間に影響を与えていることに起因しているものと想定される。

しかしながら、実験によって降伏値と塑性粘度それぞれがフロー到達時間に与える影響を定量化する

ためにはかなり多くの実験データを必要とし、さらに、得られた数値は使用材料や配合が変わることに伴ってコンクリートの単位容積質量が変化することに対応できない、などの理由により合理的でないと判断される。一方、数値解析により、スランプフロー試験における高流動コンクリートの流動挙動を高精度にシミュレートすることができれば、降伏値と塑性粘度それぞれがフロー到達時間に与える影響を明らかにすることができる。また、コンクリートの単位容積質量の変化に対しても容易に対応できる。

本研究は、スランプフロー試験における高流動コンクリートの流動挙動を数値流体解析によってシミュレートすることの妥当性とその限界を明らかにしたうえで、数値流体解析により、レオロジー定数とフロー到達時間との関係を定量的に表わすことを試みたものである。

2. 基礎方程式

(1) 構成式

非圧縮性粘性流体の構成式は、粘度 η を用いて式(1)で表わされる。

$$\tau'_{ij} = 2\eta e_{ij} \quad (1)$$

ここに、 τ'_{ij} : 偏差応力テンソル、 η : 粘度、 e_{ij} : ひずみ速度テンソルである。

高流動モルタルを用いた球引上げ試験⁹⁾では、直径 D が 31.75mm の鋼球の引上げ速度 v が 10~60mm/s の間で、さらに、降伏値 τ_y と塑性粘度 η_{pl} との条件によっては 2mm/s の引上げ速度領域まで、引上げ速度 v と抗力 F との間には直線関係があり、Bingham 流体としての取り扱いが可能であることが確認されている。

Bingham 流体の構成式⁹⁾は、Hohenemser と Prager とによって任意の応力状態に拡張された式(2)で表わされる。

$$2\eta_{pl}e_{ij} = \begin{cases} 0 & (\sqrt{J'_2} \leq \tau_y) \\ \left(1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J'_2}}\right)\tau'_{ij} & (\sqrt{J'_2} > \tau_y) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 η_{pl} : 塑性粘度、 τ_y : 降伏値、 J'_2

$\left(= \frac{1}{2}(\tau'^2_{rr} + \tau'^2_{\theta\theta} + \tau'^2_{zz}) + \tau'^2_{r\theta} + \tau'^2_{\theta z} + \tau'^2_{rz}\right)$: 偏差応力テンソルの 2 次不変量である。

Bingham 流体を含む非圧縮粘性流体では、ひずみ速度テンソルの 2 次不変量 I_2 は式(3)で表わされ、式(1)より J'_2 と I_2 との間には式(4)の関係が成り立つ。

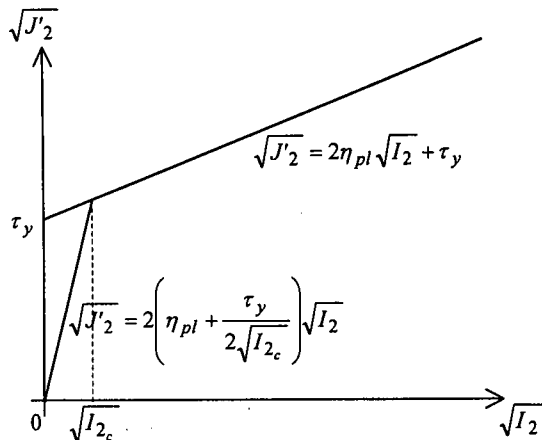


図-1 数値解析に用いる $\sqrt{I_2}$ と $\sqrt{J'_2}$ との関係

$$I_2 = \frac{1}{2}(e_{rr}^2 + e_{\theta\theta}^2 + e_{zz}^2) + e_{r\theta}^2 + e_{\theta z}^2 + e_{rz}^2 \quad (3)$$

$$J'_2 = 4\eta^2 I_2 \quad (4)$$

したがって、Bingham 流体では、 $\sqrt{J'_2} > \tau_y$ の場合、偏差応力テンソル τ'_{ij} は式(2)より、

$$\tau'_{ij} = 2\eta_{pl} \frac{\sqrt{J'_2}}{\sqrt{J'_2} - \tau_y} e_{ij} \quad (5)$$

式(4)と式(5)とから、偏差応力テンソルの 2 次不変量 J'_2 は次のように表わされる。

$$J'_2 = 4 \left(\eta_{pl} \frac{\sqrt{J'_2}}{\sqrt{J'_2} - \tau_y} \right)^2 I_2 \quad (6)$$

したがって、 $\sqrt{J'_2} > \tau_y$ の場合における $\sqrt{J'_2}$ と $\sqrt{I_2}$ との関係は、式(7)で表わされる。

$$\sqrt{J'_2} = 2\eta_{pl}\sqrt{I_2} + \tau_y \quad (\sqrt{J'_2} > \tau_y) \quad (7)$$

一方、式(5)を変形すると、

$$\tau'_{ij} = 2\eta_{pl} \frac{\sqrt{J'_2} - \tau_y + \tau_y}{\sqrt{J'_2} - \tau_y} e_{ij} = 2 \left(\eta_{pl} + \frac{\tau_y}{2 \frac{\sqrt{J'_2} - \tau_y}{2\eta_{pl}}} \right) e_{ij} \quad (8)$$

また、式(7)は、式(9)のように表わされる。

$$\sqrt{I_2} = \frac{\sqrt{J'_2} - \tau_y}{2\eta_{pl}} \quad (9)$$

式(9)を式(8)に代入すると、

$$\tau'_{ij} = 2 \left(\eta_{pl} + \frac{\tau_y}{2\sqrt{I_2}} \right) e_{ij} \quad (10)$$

一方、 $\sqrt{J'_2} \leq \tau_y$ の場合には偏差応力テンソルが

特定できず、数値解析上問題が生じる。そこで、ひずみ速度テンソルの2次不変量の平方根 $\sqrt{I_2}$ が限界値 $\sqrt{I_{2c}}$ 以下では、 $\sqrt{I_2}$ と $\sqrt{I_2'}$ との関係は、原点を通り、かつ、式(7)と $\sqrt{I_{2c}}$ で交わる直線(11)で表わされるものとする(図-1参照)。

$$\sqrt{I_2'} = 2 \left(\eta_{pl} + \frac{\tau_y}{2\sqrt{I_{2c}}} \right) \sqrt{I_2} \quad (\sqrt{I_2} \leq \sqrt{I_{2c}}) \quad (11)$$

したがって、 $\sqrt{I_2} \leq \sqrt{I_{2c}}$ の場合、偏差応力テンソル τ'_{ij} は式(12)によって表わされる。

$$\tau'_{ij} = 2 \left(\eta_{pl} + \frac{\tau_y}{2\sqrt{I_{2c}}} \right) e_{ij} \quad (12)$$

よって、式(10)と式(12)とから、数値解析に用いる Bingham 流体の構成式は次のように表わされる。

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\eta e_{ij} \quad (13)$$

ここに、 τ_{ij} : 応力テンソル、 p : 圧力、 δ_{ij} : Kronecker のデルタであり、粘度 η は式(14)と式(15)で表わされる。

$$\eta = \eta_{pl} + \frac{\tau_y}{2\sqrt{I_2}} \quad (\sqrt{I_2} > \sqrt{I_{2c}}) \quad (14)$$

$$\eta = \eta_{pl} + \frac{\tau_y}{2\sqrt{I_{2c}}} \quad (\sqrt{I_2} \leq \sqrt{I_{2c}}) \quad (15)$$

(2) 流れの基礎式

流体の運動は一般に、連続の式と運動方程式とによって表わされる。スランプフロー試験におけるコンクリートの流動を対象とする場合、スランプコーンの中心を原点として放射線上に広がる軸対称流れとして取り扱うことができる。また、フレッシュコンクリートは非圧縮性とみなせる。

したがって、連続の式と運動方程式は、スランプコーンの軸方向に z 軸、半径方向に r 軸をとった円柱座標系 (r, θ, z) で次のように表わされる。

$$\text{連続の式;} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{運動方程式;} \\ \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (v_r v_z) \\ = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r v_z) + \frac{\partial v_z^2}{\partial z} \\ = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) - g \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、 v_i : i 方向速度成分、 ρ : 密度 (= 単位容積質量)、 g : 重力加速度、 t : 時間である。

式(13)により、運動方程式(17)、(18)は、それぞれ式(19)、(20)のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (v_r v_z) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} \\ + \frac{2\eta}{\rho r} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \right) + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v_z}{\partial r \partial z} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r v_z) + \frac{\partial v_z^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial z} \\ + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\eta}{\rho r} \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{2\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - g \end{aligned} \quad (20)$$

(3) 圧力方程式

自由表面をもつ流れを数値解析によって計算する場合には、計算領域全体の圧力場が決定される必要がある。これは、運動方程式(19)と(20)とから求められる圧力 P に関する圧力方程式(21)を数値計算することによって得られる⁷⁾。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right\} \\ = -2 \left\{ \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ - \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\eta}{\rho} \nabla^2 D \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、

$$D = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (22)$$

$$\nabla^2 D = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial D}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 D}{\partial z^2} \quad (23)$$

3. 数値解析条件

(1) 数値解法

スランプフロー試験におけるコンクリートの流動は自由表面流れとなることから、数値解法は、自由表面問題の取り扱いを対象として Harlow と Welch によって開発された MAC 法 (Marker and Cell method)⁸⁾を採用する。

格子系は、圧力がセルの中心で定義され、速度成分がセル境界で定義されるスタッガード・メッシュ⁹⁾を用いる。

連続の式(16)、運動方程式(19)、(20)、および圧力方程式(21)の離散化は、Harlow と Welch の方法⁸⁾に準じる。ただし、運動方程式における対流項(式(19)、(20)それぞれの左辺第2項と第3項)は、1次精度

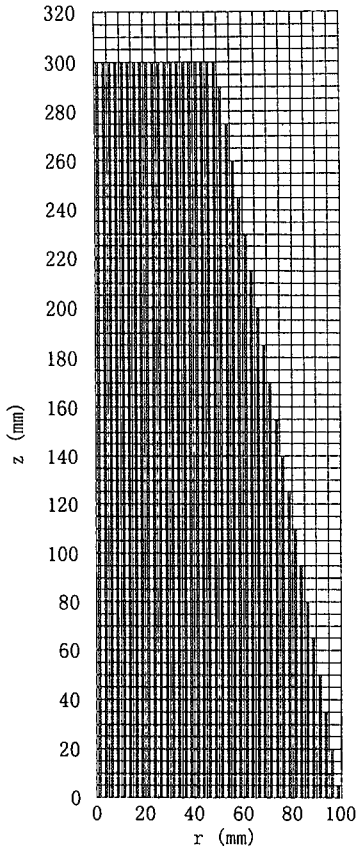


図-2 マーカ粒子の配置 (初期条件)

上流差分⁹⁾により離散化する。

セルの大きさを r 方向 (半径方向) に $\Delta r = 5\text{mm}$, z 方向 (高さ方向) に $\Delta z = 5\text{mm}$ としたケースと, $\Delta r = \Delta z = 2.5\text{mm}$ としたケースについて事前に数値解析を実施して比較した結果, ほとんど差違は認められなかった. そこで, セルの大きさは $\Delta r = \Delta z = 5\text{mm}$ とする. 計算領域は r 方向に $100\Delta r$, z 方向に $64\Delta z$ の広さをもつものとする.

(2) 初期条件

スランブコーンは, 引き上げ始められるまでコンクリートで充たされている. したがって, 計算の初期 ($t = 0$) に, スランブコーン内のセルにマーカ粒子を配置しておき, スランブコーンの引き上げに伴うマーカ粒子の時間的変化を追跡する. 計算初期 ($t = 0$) におけるマーカ粒子の配置は, 図-2 に示すように, $0 < r \leq 50\text{mm}$ では 1セルに $4 \times 2 = 8$ 個, $50\text{mm} < r \leq 100\text{mm}$ では表面セルのマーカ数を 4 個とし, 合計 7160 個のマーカ粒子を配置する.

(3) 境界条件

底面での境界条件は固着条件⁷⁾を採用する. また,

表-1 使用材料

結合材 (B)	普通ポルトランドセメント (OPC) 密度: $3.16 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ フレン比表面積: $3,270 \text{ cm}^2/\text{g}$
	高炉スラグ微粉末 (BFS) $\text{SO}_3: 1.9\%$ 密度: $2.89 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ フレン比表面積: $5,840 \text{ cm}^2/\text{g}$
細骨材	相馬珪砂 (S) 3号(1.2-2.5mm) : 4号(0.3-1.2mm) : 6号(0.074-0.6mm) = 1 : 1 : 1 気乾比重: 2.60, F.M.: 2.46
増粘剤	セルロースエーテル系 (c)
高性能 AE 減水剤	ポリカルボキシル酸系 (SP)

対称軸での境界条件は自由すべり⁷⁾とする.

(4) スランブコーン側壁のモデル化

スランブ試験におけるコンクリートの変形挙動を数値解析によって評価しようとする研究^{10), 11), 12), 13), 14)}が進められてきた. しかしながら, これらの研究のほとんどは, その変形抵抗性の程度がスランブによって表わされる普通コンクリートを対象にしているため, 計算の開始と同時にスランブコーンが瞬間的に消え去ったとして¹⁰⁾解析している.

本研究の場合は, 変形速度の大きい高流動コンクリートを対象としているため, スランブコーンが引き上げられる途上でのスランブコーン側壁の影響をモデル化する必要があるものと考えられる. 筆者らの実験⁴⁾では, スランブコーンはおよそ 40mm/s の速度で引き上げられている. そこで, スランブコーン側壁の形状を半径 100mm の円筒形で近似して, $r = 100\text{mm}$ の位置に鉛直壁を設け, この鉛直壁が 0.125 秒 ($= 5\text{mm} \div 40\text{mm/s}$) 毎に 1セルずつ上方に引き上げられるように境界壁を設定する. この壁面での境界条件は, 底面と同様に固着条件とする.

(5) 安定条件

運動方程式(19), (20)における対流項を 1次精度上流差分によって離散化していることから, 差分の安定条件¹⁵⁾には式(24)を適用する.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2\eta \left(\frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) + \frac{|v_r|}{\Delta r} + \frac{|v_z|}{\Delta z}} \quad (24)$$

(6) 物理量

数値解析に用いるレオロジー定数 (降伏値 τ_y , 塑性粘度 η_{pl}) は, 球引き上げ試験で得られた既報⁴⁾の高流動モルタルの実験データを使用する.

使用材料と配合を表-1, 表-2 に示す. また, 球

表-2 配合表

配合	No.	W/B (%)	S/B (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	OPC	BFS	S	増粘剤 (c)	SP
M30%	1	30			240	240	559	1198	-	5.19
	2									5.59
	3									5.99
	4									6.39
	5									6.95
	6									6.79
	7									7.19
	8									7.99
M35%	1	35			269	230	537	1151	-	3.22
	2									3.22
	3									3.84
	4									4.22
	5									4.60
	6									4.76
	7									5.14
M40%	1	40	1.5	3.0	295	221	517	1107	-	3.17
	2									3.47
	3									4.06
Mc0.5%	1	35			269	230	537	1151	1.345	6.14
	2									6.90
	3									7.67
	4									9.20
	5									9.20
	6									11.51
	7									15.34
Mc0.25%	1								0.6725	4.99
	2									5.37
	3									5.75
	4									6.14
	5									5.75
	6									6.90
	7									7.67

表-3 実験データ

配合	No.	レオロジー定数			スランプフロー値	
		τ_y (Pa)	η_{pl} (Pa·s)	η_{pl}/τ_y (s)	Sfs (mm)	Sfe (mm)
M30%	1	121	60	0.5	493	484
	2	83	41	0.5	542	537
	3	45	37	0.8	599	604
	4	34	28	0.8	653	654
	5	19	23	1.2	732	728
	6	13	22	1.7	761	758
	7	10	21	2.1	793	783
	8	2.8	14	5.0	900	885
M35%	1	102	33	0.3	500	488
	2	106	18	0.2	512	503
	3	44	17	0.4	610	608
	4	32	15	0.5	656	643
	5	19	13	0.7	712	719
	6	15	11	0.7	735	748
	7	12	9.8	0.8	778	786
M40%	1	19	6.8	0.4	730	712
	2	17	6.8	0.4	726	719
	3	10	4.7	0.5	790	787
Mc0.5%	1	57	76	1.3	546	542
	2	80	74	0.9	551	548
	3	53	61	1.2	584	598
	4	35	53	1.5	624	644
	5	28	45	1.6	666	683
	6	24	42	1.8	701	703
	7	11	33	3.0	777	780
Mc0.25%	1	112	44	0.4	504	513
	2	72	43	0.6	562	553
	3	38	32	0.8	635	631
	4	30	29	1.0	670	655
	5	33	29	0.9	671	661
	6	14	24	1.7	749	755
	7	12	21	1.8	780	788

引上げ試験で得られた引上げ速度 v と抗力 F とを Ansley ら¹⁹⁾の式(25)によって直線回帰して求められる降伏値 τ_y と塑性粘度 η_{pl} とを表-3 に示す。

$$F = 3\pi\eta_{pl}vD + \frac{7}{8}\pi^2D^2\tau_y \quad (25)$$

ここに、 D ：球の直径 (=31.75mm)。

表-3 には、塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比 η_{pl}/τ_y 、および、球引上げ試験の開始時（混練後 15 分後）に測定されたスランプフロー値 Sfs と、球引上げ試験終了時に測定されたスランプフロー値 Sfe も併せて示している。

また、モルタルの密度 (=単位容積質量) は、表-2 に示す配合表から算定される値を用いる。すなわち、水結合材比 (W/B) が 35% の M35%、Mc0.5%、および Mc0.25% を $2.187 \times 10^3 \text{g/mm}^3$ 、水結合材比 (W/B) が 30% の M30% を $2.237 \times 10^3 \text{g/mm}^3$ 、水結合材比 (W/B) が 40% の M40% を $2.140 \times 10^3 \text{g/mm}^3$ とする。

(7) $\sqrt{I_{2c}}$ の設定

$\sqrt{I_2}$ と $\sqrt{J'_{2c}}$ との関係は、先に述べたように、ひ

ずみ速度テンソルの 2 次不変量の平方根 $\sqrt{I_2}$ が限界値 $\sqrt{I_{2c}}$ 以下の場合、数値解析上、原点を通り、勾配が $2(\eta_{pl} + \tau_y / (2\sqrt{I_{2c}}))$ の直線 (式(11)) で表わされる。したがって、 $\sqrt{I_{2c}}$ を小さく設定することにより、Bingham モデルとの乖離が抑えられるものと考えられる。しかしながら、 $\sqrt{I_{2c}}$ を小さく設定する程、式(15)で表わされる粘度 η が大きくなり、その結果、式(24)で表わされる安定条件を満たすための時間刻み Δt が小さくなって、計算時間が長くなってしまう。

直径 D が 31.75mm の鋼球を用いて実施した球引上げ試験⁴⁾では、球の引上げ速度が 10~60mm/s の間で、さらに、降伏値 τ_y と塑性粘度 η_{pl} との条件によっては 2mm/s の引上げ速度領域まで、引上げ速度 v と抗力 F との間に直線関係のあることが確認されている。球引上げ試験において、球近傍における試料は単純せん断を受けるものと考え、せん断ひずみ速度 e は、式(3)により、

$$e = \sqrt{I_2} \quad (26)$$

と表わされる。また、球引上げ試験では、せん断ひ

ずみ速度 e と引上げ速度 v との間に、

$$e = \frac{v}{2D} \quad (27)$$

なる関係が与えられている¹⁷⁾。式(27)を用いると、球の引上げ速度 v が 10mm/s の場合にせん断ひずみ速度 e は約 0.16/s、また、2mm/s の場合には e は約 0.03/s となる。上記試算に基づけば、 $\sqrt{I_{2c}}$ は少なくとも 0.16/s 以下に、降伏値 τ_y と塑性粘度 η_{pl} との条件によっては約 0.03/s 以下に設定する必要があるものと思われる。

したがって、本解析では、計算時間への影響も考慮して、 $\sqrt{I_{2c}}$ を約 0.03/s と設定する。これは、結果的には、山田ら¹⁴⁾の設定値と同じになる。

4. 解析結果と考察

(1) 流動挙動

スランブコーンの引上げに伴って高流動モルタルが流動していく状況を、数値解析によって求めることができる。一例として、Mc0.5%-7 (降伏値 $\tau_y=11\text{Pa}$ 、塑性粘度 $\eta_{pl}=33\text{Pa}\cdot\text{s}$) を対象として解析した結果を図-3 に示す。はじめは約 0.28 秒 (10,000 step) ごとに、そして 1.69 秒以後は約 1.13 秒 (40,000 step) ごとに、マーカ粒子の配置状況が示されている。なお、全部で 7,160 個のマーカ粒子のうち、図-3 では、4 個に 1 個の割合でマーカ粒子がプロットされている。

引上げ途上のスランブコーン壁面の影響を考慮するために設けられた鉛直壁が 50mm 程度の高さまで上方に移動していく間は、底面と壁面との間から流れ出るように、試料が半径方向に拡がっていく状況が観察される。

また、鉛直壁面に付着している試料が、時間の経過とともに直下の試料中に流下していく様子が見られる。

そして、このケースでは、3 秒後あたりから、ゆっくりとしたスピードで半径方向に拡がっていく様子が認められる。

(2) フロー半径と到達時間

試料が半径方向に拡がっていく早さは、先端部のマーカ粒子の r 座標 (=フロー半径) とその到達時間との関係によって求められる。図-4 と図-5 は、数値解析により求められたフロー半径と到達時間との関係を、実験値と対比して示したものである。なお、横軸にとった時間は、解析値、実験値とも、フロー半径が 110mm に達した時間を 0 としている。こ

れは、数値解析と実験値とでは、スランブコーンの引上げ開始直後 (計算開始直後) の条件に差があるため、この差を解消するためにとった措置である。すなわち、数値解析では、計算の開始時点 ($t = \Delta t$) で既に底面と鉛直壁との間に 1セル分 (5mm) の隙間が生じている。一方、実験値では、スランブコーンが動き始める瞬間をもって、スランブコーンの引上げ開始時刻としている⁴⁾。したがって、スランブコーンの引上げ開始直後 (計算開始直後) の条件の違いにより、解析値と実験値との間には多少の差が発生する。この差を解消するために、解析値、実験値とも、フロー半径が 110mm に達した時間を 0 としてフロー半径到達時間を表わしている。以後、同様とする。

図-4 は、Mc0.25%-6 (降伏値 $\tau_y=14\text{Pa}$ 、塑性粘度 $\eta_{pl}=24\text{Pa}\cdot\text{s}$) の解析値と実験値とを示している。併せて、ひずみ速度テンソルの 2 次不変量の平方根の限界値 $\sqrt{I_{2c}}$ を 0.16s とした場合、および、計算の開始と同時にスランブコーンが瞬間的に消え去ったとした場合、それぞれの解析結果も併記している。同様に、図-5 は、Mc0.5%-6 (降伏値 $\tau_y=24\text{Pa}$ 、塑性粘度 $\eta_{pl}=42\text{Pa}\cdot\text{s}$) の解析値と実験値とを示す。

数値解析結果は、流動初期は拡がる早さが大きく、拡がる早さが徐々に低下していく遷移域を経て、流動後期では小さな早さで拡がっていく状況を高精度に再現していることが、実験値との比較を通して確かめられる。

なお、図-4 と図-5 とが示すように、計算の開始と同時にスランブコーンが瞬間的に消え去ったとする解析モデル (スランブコーン考慮せず) では、計算開始直後の、試料が半径方向に拡がっていく早さは、実験値と比べてはるかに大きい。一方、スランブコーンが引き上げられる途上でのスランブコーン側壁の影響を考慮した解析モデル (スランブコーンの引上げ速度=40mm/s) では、実験値とかなり良く一致した解析結果が得られている。したがって、変形速度の大きい高流動コンクリートを対象とする場合には、スランブコーンが引き上げられる途上でのスランブコーン側壁の影響をモデル化する必要があることが確認される。

また、ひずみ速度テンソルの 2 次不変量の平方根の限界値 $\sqrt{I_{2c}}$ を 0.03s としたケースと 0.16s としたケースとを比較すると、フロー半径が 250mm に達するあたりまでは、フロー半径と到達時間との関係に差はほとんど生じていない。流動後期の、拡がる早さが小さい領域では、 $\sqrt{I_{2c}}$ を 0.16s としたケースの方が、0.03s としたケースよりも、多少、拡が

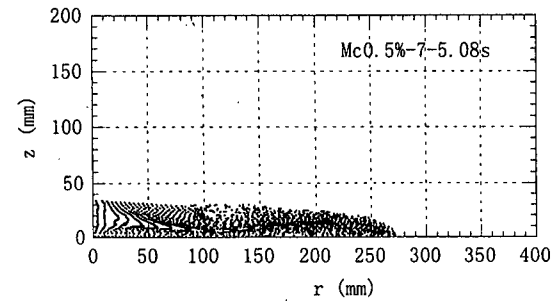
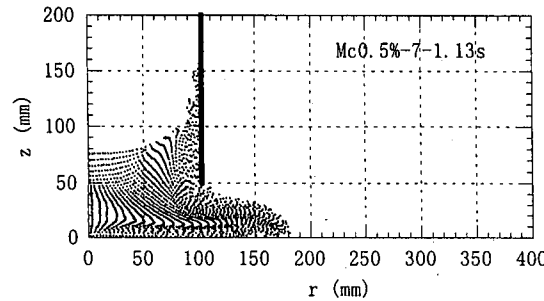
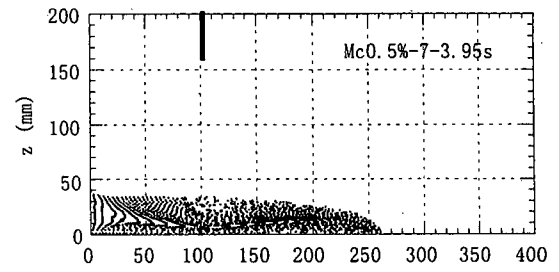
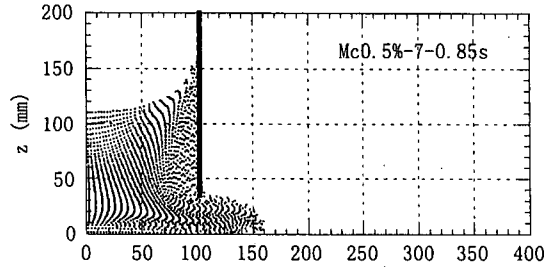
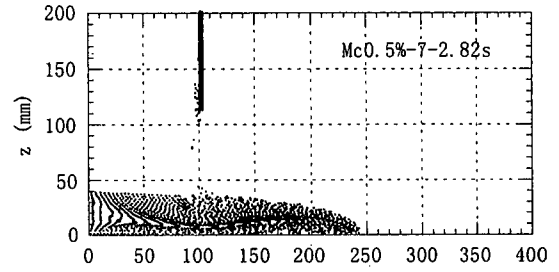
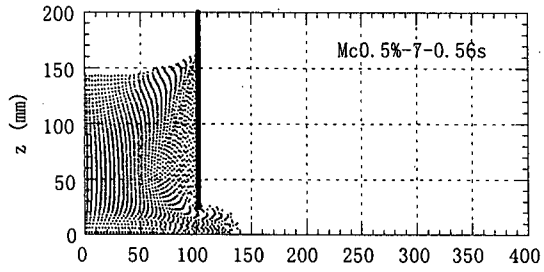
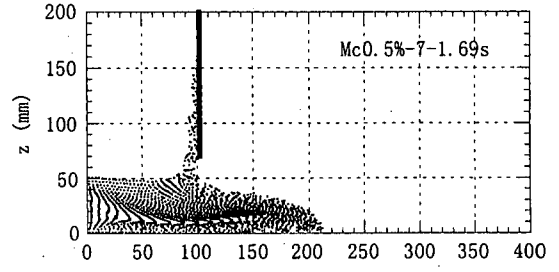
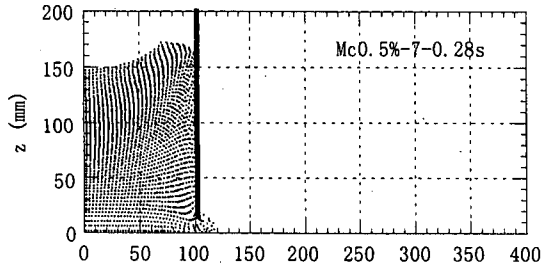
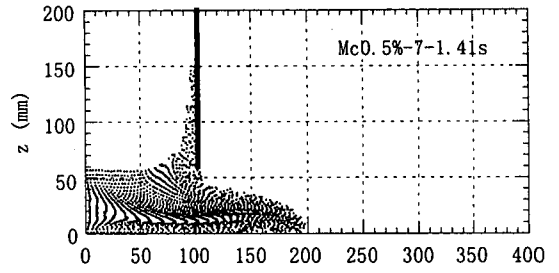
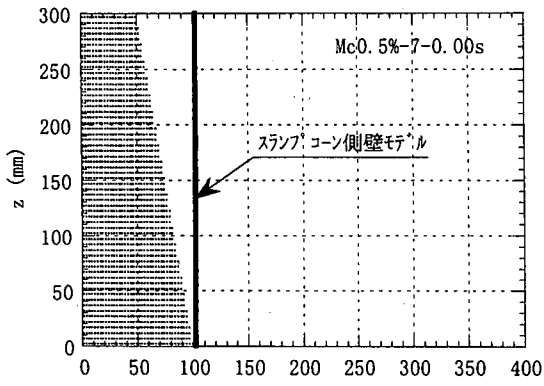


図-3 数值解析結果 (Mc0.5%-7)

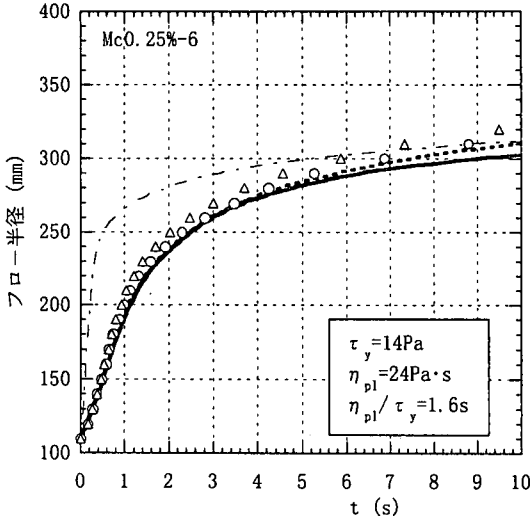
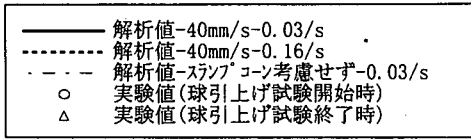


図-4 フロー半径と到達時間との関係 (Mc0.25%-6)

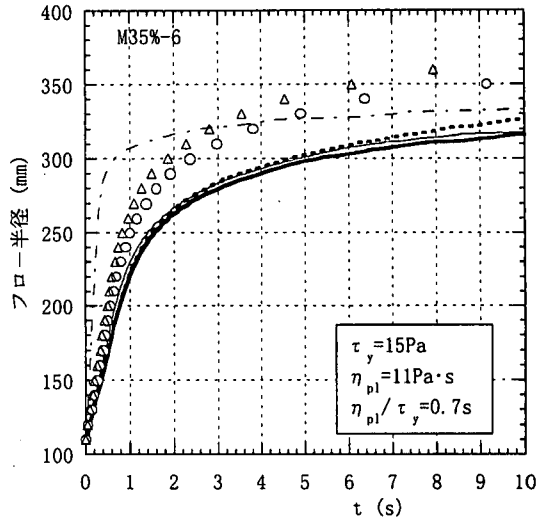
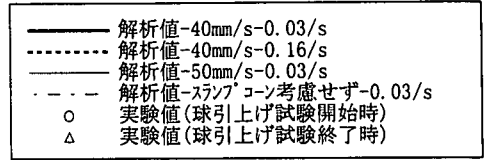


図-6 フロー半径と到達時間との関係 (M35%-6)

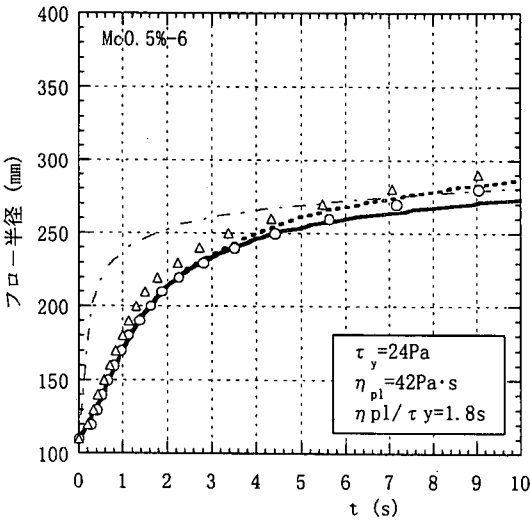
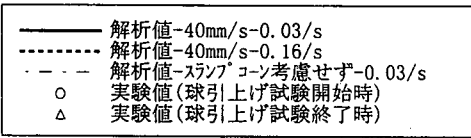


図-5 フロー半径と到達時間との関係 (Mc0.5%-6)

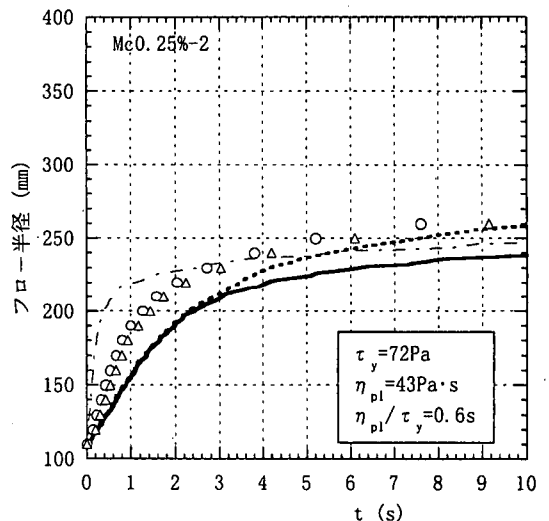
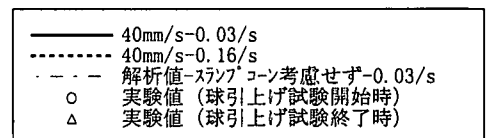


図-7 フロー半径と到達時間との関係 (Mc0.25%-2)

る早さが大きく、その差は、降伏値の大きい Mc0.5%-6の方が大きい。

以上、フロー半径と到達時間との関係において、解析値と実験値とが良く一致する場合について示してきたが、次に、解析値と実験値とが一致しない

場合を示す。

図-6は、図-4に示す Mc0.25%-6と降伏値 τ_y がほぼ同等で、塑性粘度 η_{pl} が約半分である M35%-6 (降伏値 $\tau_y = 15\text{Pa}$ 、塑性粘度 $\eta_{pl} = 11\text{Pa}\cdot\text{s}$)の、フロー半径と到達時間との関係を示す。実験値と比較して、

解析値の方が広がる速度が小さく、フロー半径到達時間の差は、フロー半径が大きくなるに従って増大していく。解析値と実験値との差は、フロー半径 200mm 到達時間では 0.2 秒程度であるが、フロー半径 250mm 到達時間では 0.5 秒と 0.7 秒となり、比率で表わすと、実験値は解析値の 0.65 倍と 0.54 倍になる。そして、フロー半径が大きくなると、さらにその差は広がっていく。なお、筆者らの実験⁴⁾では、スランプコーンを引き上げる早さは粘性の影響を多少受ける場合もあるため、スランプコーンの引上げ速度を 50mm/s とした場合についても解析を行なっているが、この程度の引上げ速度の違いでは、フロー到達時間にあまり影響は与えていない。

また、図-7 は、図-5 に示す Mc0.5%-6 と塑性粘度 η_{pl} がほぼ同等で、降伏値 τ_y が約 3 倍である Mc0.25%-2 (降伏値 $\tau_y=72\text{Pa}$, 塑性粘度 $\eta_{pl}=43\text{Pa}\cdot\text{s}$) の、フロー半径と到達時間との関係を示す。解析値は、実験値と比較して、流動初期の段階から広がる速度が小さく、フロー半径が 200mm に到達するまでに実験値の 2 倍近くの時間がかかっている。

$\sqrt{I_{2c}}$ を 0.16s としたケースでは、0.03s のケースと比較して、流動後期において広がる速度が大きくなっているが、フロー半径 200mm に到達するまではほとんど広がる速度に差はない。

このように、降伏値 τ_y と塑性粘度 η_{pl} の条件によっては、解析値と実験値とが一致しない場合がある。

(3) 適合条件の分析

上述したように、塑性粘度 η_{pl} がほぼ同等であっても降伏値 τ_y が大きくなると、また、降伏値 τ_y がほぼ同等であっても塑性粘度 η_{pl} が小さくなると、フロー半径到達時間に関し、解析値は実験値と一致しなくなる。

そこで、塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比、 η_{pl}/τ_y に着目して、数値解析の適合条件について考察する。なお、ここでいう「解析値」とは、3章で述べた数値解析条件を用いて得られる数値解析の結果であり、 $\sqrt{I_{2c}}$ は 0.03/s、また、スランプコーンの引上げ速度は 40mm/s の条件が、全てのケースにおいて一貫して用いられている。

図-8 は、 η_{pl}/τ_y と、フロー半径 200mm 到達時間、 t_{200} の実験値と解析値との差、 $t_{200\text{Exp}}-t_{200\text{Cal}}$ との関係を表わす。降伏値 τ_y が 60Pa 以下であれば、実験値と解析値との差は ± 0.5 秒以下に収まっている。一方、図-9 は、 η_{pl}/τ_y と、フロー半径 200mm 到達時間の実験値と解析値との比、 $t_{200\text{Exp}}/t_{200\text{Cal}}$ との関係を表わす。 η_{pl}/τ_y が 0.8s よりも大きい場

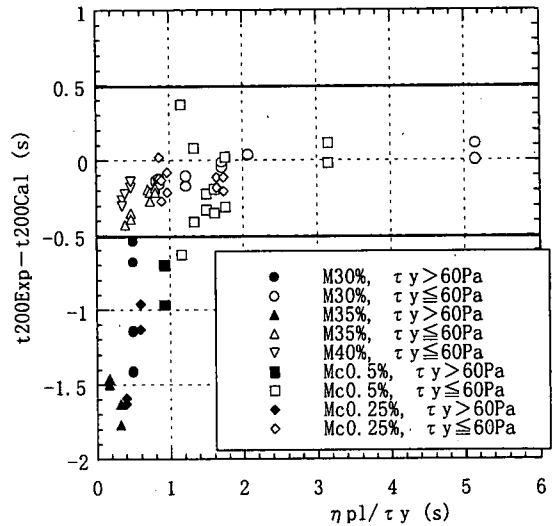


図-8 η_{pl}/τ_y と $t_{200\text{Exp}}-t_{200\text{Cal}}$ との関係

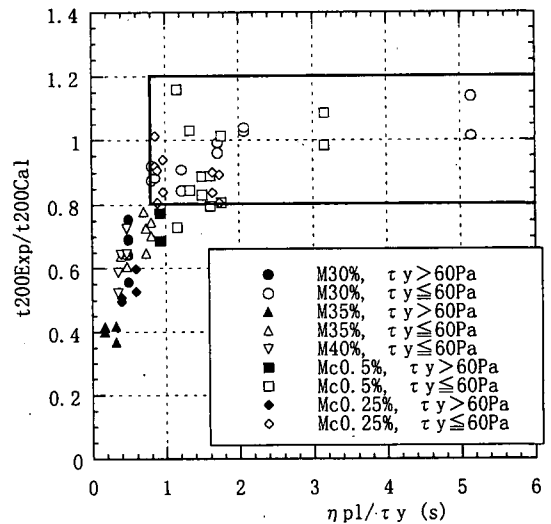


図-9 η_{pl}/τ_y と $t_{200\text{Exp}}/t_{200\text{Cal}}$ との関係

合には、実験値と解析値との比、 $t_{200\text{Exp}}/t_{200\text{Cal}}$ は、ほぼ 1.0 ± 0.2 の範囲に収まる。また、 η_{pl}/τ_y が 0.8s 以下の場合には、解析値に比べ実験値の方が到達時間は短く、その比は 0.8 を下回る。そして、実験値と解析値との比が 0.8 を下回るかどうかは、降伏値 τ_y の大小には関係していない。したがって、比較的粘性が低く、到達時間も短い場合、実験値と解析値との差が ± 0.5 秒以下に収まっているても、その比で評価すれば、図-6 が示す M35%-6 の場合のように、必ずしも実験値と一致しているとは限らないことが認識される。図-10 は、図-9 の結果を $t_{200\text{Cal}}$ と $t_{200\text{Exp}}$ との関係に書き直したものであり、白抜きのプロットで示す $\eta_{pl}/\tau_y > 0.8\text{s}$ の場合、両者がほぼ一致していることをより一層明確に示している。

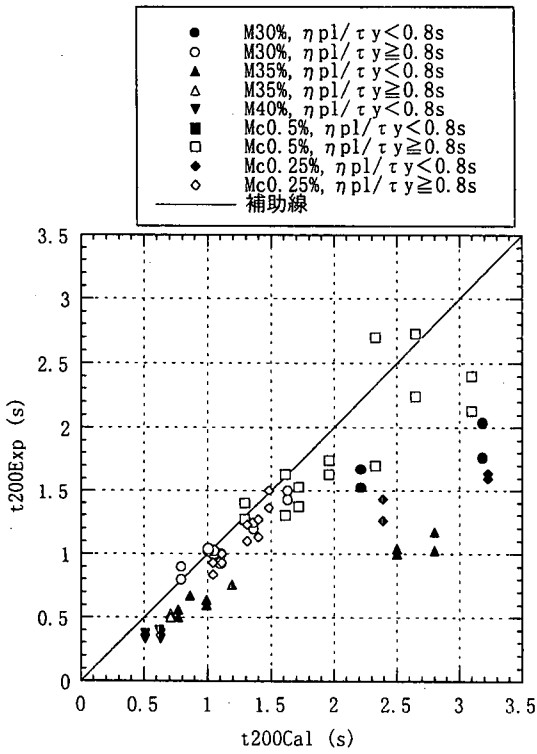


図-10 t_{200Cal} と t_{200Exp} との関係

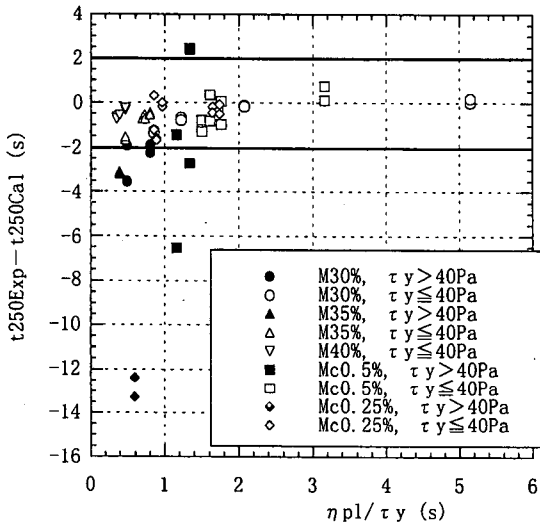


図-11 η_{pl}/τ_y と $t_{250Exp} - t_{250Cal}$ との関係

また、黒塗りのプロットで示す $\eta_{pl}/\tau_y < 0.8s$ の場合は、到達時間が短くて実験値と解析値との差が ± 0.5 秒以下に収まるグループと、到達時間が長く実験値と解析値との差が ± 0.5 秒を超えるグループとに区分されることが確認される。

同様に、フロー半径 250mm 到達時間に関し、 η_{pl}/τ_y と、実験値と解析値との差、 $t_{250Exp} - t_{250Cal}$ との関係を図-11に、 η_{pl}/τ_y と、実験値と

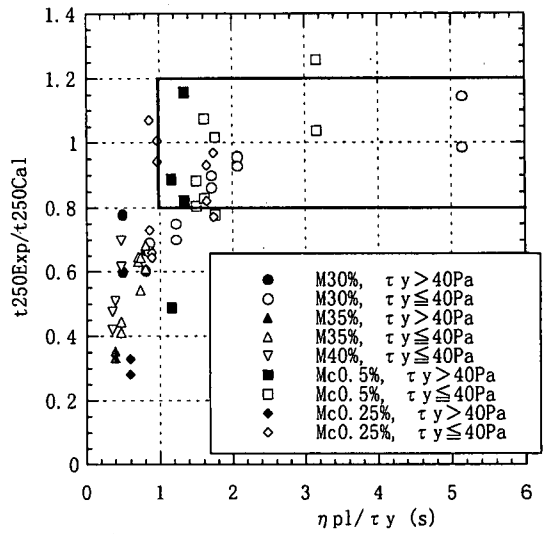


図-12 η_{pl}/τ_y と t_{250Exp}/t_{250Cal} との関係

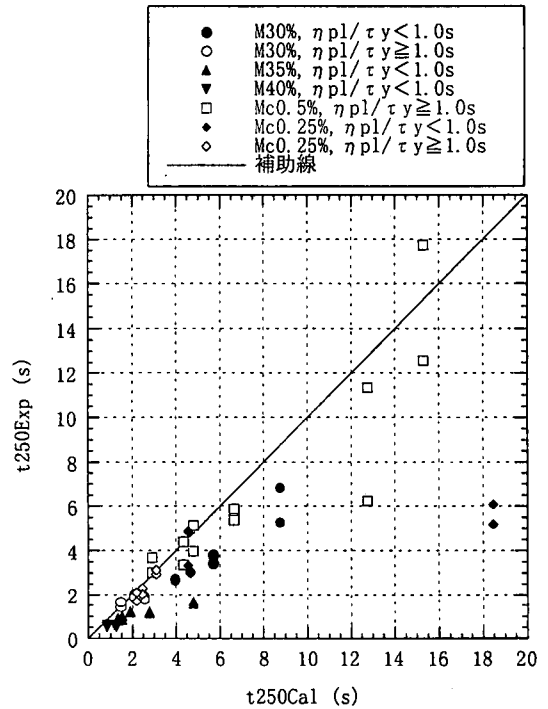


図-13 t_{250Cal} と t_{250Exp} との関係

解析値との比、 t_{250Exp}/t_{250Cal} との関係を図-12に、また、解析値 t_{250Cal} と実験値 t_{250Exp} との関係を図-13に示す。実験値と解析値との差、 $t_{250Exp} - t_{250Cal}$ は、降伏値 τ_y が 40Pa 以下であれば、 ± 2.0 秒以下に収まる。また、実験値と解析値との比 t_{250Exp}/t_{250Cal} は、フロー半径 200mm 到達時間の場合と同様に、 η_{pl}/τ_y が大きくなるに従って 1 に近づくように大きくなっていき、フロー半径 250mm 到達時間の場合には、 η_{pl}/τ_y が 1.0 以上であれば、

一部のデータを除き、 1.0 ± 0.2 の範囲に収まる。そして、図-13 より、 η_{pl}/τ_y が 1.0s 以上であれば、解析値と実験値とは良く一致することが確認される。

したがって、塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比 η_{pl}/τ_y が 1.0s 以上の場合には、解析値は、フロー半径と到達時間との関係を、実験値と比較してかなり高い精度 ($\pm 20\%$) でシミュレートしていることが確認される。

(4) 今後の課題

塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比 η_{pl}/τ_y が 1.0s よりも小さい場合に、解析値と実験値との間に差異が生じる要因として、数値解析に用いた解析条件が実際の高流動モルタルの流動・変形挙動と異なることが考えられる。その要因の分析にあたっては、降伏値 τ_y の大きい領域と小さい領域とに区分して考察する必要があると思われる。現時点で考えられる要因として、

- ①流体モデル：ひずみ速度が小さい領域における Bingham モデルの適用性の限界、
 - ②レオロジー定数：球引上げ試験における、ひずみ速度が小さい領域に対する Ansley らの式(25)の適用性の限界、
- などが挙げられるが、その解明は今後の課題である。

5. 数値流体解析によって与えられるレオロジー定数とフロー半径到達時間との関係

数値解析により求められるフロー半径と到達時間との関係は、塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比 η_{pl}/τ_y が 1.0s 以上の場合、実験値と良く一致することが確認された。したがって、 η_{pl}/τ_y が 1.0s 以上の場合には、降伏値 τ_y および塑性粘度 η_{pl} がフロー到達時間に与える影響を数値解析により定量化することができる。

図-14 は、単位容積質量 ρ が、表-2 に示すモルタル配合のうち水結合材比 W/B が 35% の M35%、Mc0.5%、Mc0.25% の単位容積質量に相当する $2.187 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ の場合について、降伏値 τ_y 、塑性粘度 η_{pl} と、数値解析により求められるフロー半径到達時間との関係を示している。なお、フロー半径到達時間は、ここでも、フロー半径が 110mm に達した時間を 0 として表わしている。

レオロジー定数がフロー半径 200mm 到達時間、 t_{200} に与える影響は塑性粘度 η_{pl} が支配的であり、降伏値 τ_y の影響はあまりみられない。一方、フロー半径 250mm 到達時間、 t_{250} では、塑性粘度 η_{pl} だ

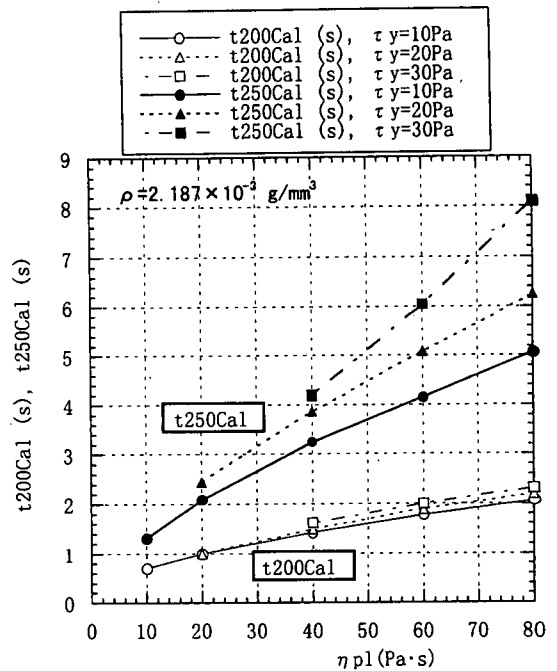


図-14 数値解析によって与えられるレオロジー定数とフロー半径到達時間との関係

けでなく降伏値 τ_y の影響も大きくなることがわかる。

以上により、フロー半径到達時間、あるいはフロー到達時間は、塑性粘度 η_{pl} だけでなく降伏値 τ_y の影響も受けることが定量的に明らかにされた。したがって、高流動コンクリートの配合設計や現場での品質管理にフロー半径 250mm 到達時間、あるいは 500mm フロー到達時間¹⁾を用いる場合には、降伏値も考慮に入れて評価する必要がある。

6. スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価

Bingham 流体としてほぼ近似可能な高流動モルタルは、塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比 η_{pl}/τ_y が 1.0s 以上の場合、フロー半径と到達時間との関係を数値流体解析により高い精度でシミュレートできることが確認された。

粗骨材を含む高流動コンクリートの場合でも Bingham 流体としての流動挙動を示すのであれば、フロー半径と到達時間との関係から、数値流体解析によって高流動コンクリートのレオロジー定数を評価することは可能であると考えられる。

この章では、フロー半径と到達時間との関係から、数値解析により、高流動コンクリートのレオロジー

表-4 使用材料

結合材 (B)	普通ポルトランドセメント (OPC) 密度: $3.16 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ フレン比表面積: $3,270 \text{ cm}^2/\text{g}$
	高炉スラグ微粉末 (BFS) SO_3 : 2.5% 密度: $2.89 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ フレン比表面積: $6,120 \text{ cm}^2/\text{g}$
細骨材	千葉県天羽産山砂 (S) 表乾比重: 2.58 吸水率: 1.43% 実積率: 66.5% F.M.: 2.52
粗骨材	栃木県葛生産硬質砂岩碎石 2005 (G) 表乾比重: 2.66 吸水率: 0.41% 実積率: 60.5% F.M.: 6.75
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系 (SP)

定数を評価する方法を提示する。

(1) 試験概要

高流動コンクリートは、通常のコンクリートと比較して、一般に単位水量の影響を受けやすい。そこで、骨材表面水の変動によって高流動コンクリートの粘性がどの程度変化するかを、理論式⁹⁾と数値流体解析とによって定量的に明らかにすることを試みる。

(2) 使用材料と配合

使用材料の一覧を表-4 に示す。結合材 (B) は、普通ポルトランドセメント (OPC) と高炉スラグ微粉末 (BFS) とを使用し、高炉スラグ微粉末の置換率 (SR) は 70% で一定とする。細骨材 (S) には千葉県天羽産の山砂を、粗骨材には栃木県葛生産の硬質砂岩碎石 2005 を使用する。高流動コンクリートの配合は、粉体系高流動コンクリートの配合例^{18), 19), 20)}を参考にして設定した基本配合 C32% と、基本配合 C32% において細骨材表面水率を実際よりも +2% 大きく設定したことにはほぼ相当する C29% との 2 種類である。表-5 に高流動コンクリートの配合を示す。

練混ぜは $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室で行なう。練混ぜには 2 軸ミキサ (容量 50l, 回転数 62rpm) を使用し、結合材、細骨材、粗骨材の順に材料を投入後空練り 15 秒、その後、水と高性能 AE 減水剤を投入して 3 分間練り混ぜる。

(3) 試験方法

コンクリート混練後試料が安定する 15 分後⁹⁾にミキサーから試料を排出し、土木学会規準¹⁾に準拠

表-5 高流動コンクリートの配合

配合	No.	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	OPC	BFS	S	G	SP
C32%	1									10.94
	2									10.99
	3									10.99
	4	32	50.9		175	164	383	801	798	11.05
	5									11.05
	6									11.05
	7									11.21
	8									11.21
	9				3.0					
C29%	1									13.55
	2									13.55
	3									13.66
	4	29	51.3		161	166	387	824	806	13.66
	5									13.66
	6									13.83
	7									13.83
	8									13.83

して、スランブフロー試験、V ロート試験、U 形充填装置を用いた間隙通過性試験、および空気量の測定を実施する。スランブフロー試験では、ビデオ撮影によって、試料先端部が 10mm ピッチに付けられたマークに到達していく時間 (フロー半径到達時間) を測定⁹⁾する。また、スランブフロー値を測定後、スランブフロー試験体の高さ分布を、試験体の中心から半径方向に 20mm ピッチに測定する。V ロート試験は、吐出口が 75mm の V₇₅ ロートを 2 基用いて試験を実施する。U 形充填装置は流動障害が R2 タイプのものを用いる。今回用いた U 形充填装置の最大充填高さ B_{h-max} は 367mm である。

(4) 試験結果

a) 試験結果一覧

スランブフロー値、空気量、フロー半径到達時間、V₇₅ ロート流下時間、および U 形 (R2) 充填高さの測定結果の一覧を表-6 に示す。フロー半径到達時間は、フロー半径がそれぞれ 110mm, 200mm, 250mm に到達する時間と、さらに、フロー半径が 110mm に達した時間を 0 として表わされるフロー半径 200mm 到達時間 t_{200Exp} 、およびフロー半径 250mm 到達時間 t_{250Exp} とを記載している。

b) フロー半径到達時間

図-15 は、10mm ピッチに測定されるフロー半径到達時間の測定例を、スランブフロー値がほぼ同等 (640mm~650mm) である C32% (C32%-5, C32%-6) と C29% (C29%-3, C29%-4, C29%-5) について示す。スランブフロー値がほぼ同等の場合、フロー半径到達時間は、C32% と C29% とで明らかに異

表-6 試験結果一覧 (1)

配合	No.	スランプフロー値 S_f (mm)	空気量 (%)	フロー半径到達時間			V_{75} ロート 流下時間		U形(R2) 充填高さ (mm)		
				110mm 到達時間	200mm 到達時間	250mm 到達時間	t200Exp (s)	t250Exp (s)		1回目 (s)	2回目 (s)
C32%	1	560	2.8	1.37	3.13	7.00	1.76	5.63	8.9	10.2	311
	2	605	4.9	0.40	2.07	4.50	1.67	4.10	9.7	9.3	337
	3	605	3.5	0.87	2.60	4.60	1.73	3.73	9.9	9.2	340
	4	633	4.2	1.10	2.73	5.10	1.63	4.00	8.9	8.7	342
	5	640	3.4	1.00	2.57	4.23	1.57	3.23	8.9	8.2	361
	6	650	3.3	0.87	2.30	3.97	1.43	3.10	7.8	8.9	341
	7	680	4.2	0.87	2.43	4.20	1.56	3.33	8.0	8.2	362
	8	683	3.2	0.43	1.87	3.67	1.44	3.24	8.9	8.2	362
	9	730	3.5	0.47	1.83	3.20	1.36	2.73	6.7	7.3	360
C29%	1	620	3.4	1.30	3.67	7.10	2.37	5.80	17.3	17.0	322
	2	630	2.8	1.53	3.67	6.97	2.14	5.44	17.2	18.5	345
	3	648	3.7	1.10	3.63	6.93	2.53	5.83	18.1	16.1	347
	4	650	2.9	1.43	3.63	6.70	2.20	5.27	15.8	15.5	348
	5	650	2.7	1.27	3.63	6.70	2.36	5.43	13.8	13.2	358
	6	670	3.0	1.60	3.97	7.27	2.37	5.67	14.8	16.0	357
	7	675	3.0	1.37	3.70	6.97	2.33	5.60	16.3	17.3	360
	8	683	2.7	0.97	3.23	5.70	2.26	4.73	14.4	15.5	360

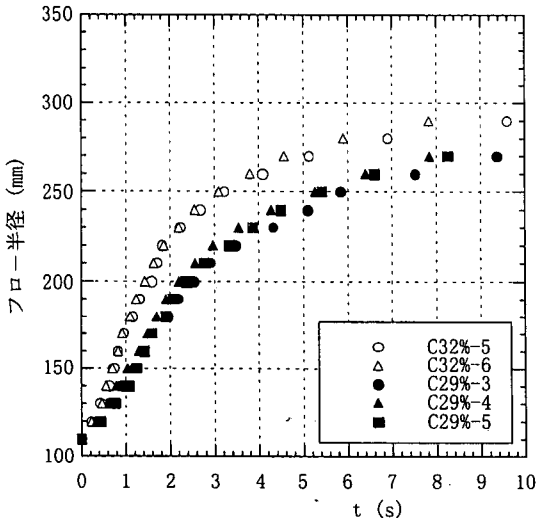


図-15 フロー半径到達時間の測定例

(C32%-5, C32%-6, C29%-3, C29%-4, C29%-5)

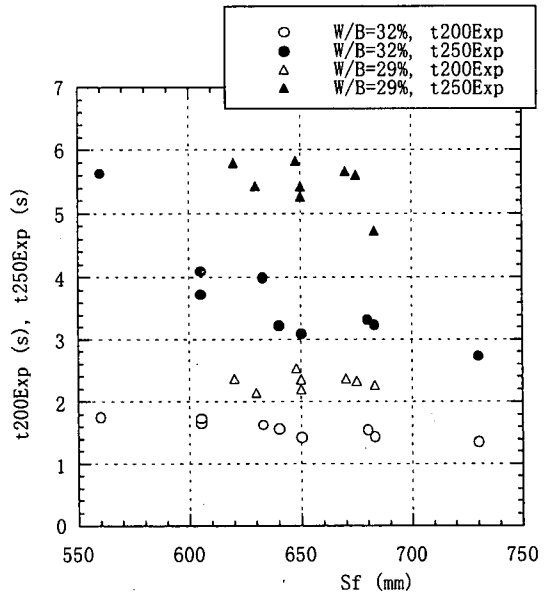


図-16 スランプフロー値とフロー半径到達時間 (t200Exp, t250Exp) との関係

なっていることが認められる。図-16 は、スランプフロー値 S_f と、フロー半径 200mm 到達時間 t_{200Exp} 、およびフロー半径 250mm 到達時間 t_{250Exp} との関係を示す。フロー半径到達時間 (t_{200Exp} , t_{250Exp}) は、水結合材比 W/B が 32% の C32% と水結合材比 W/B が 29% の C29% との間に明瞭な差のあることが確かめられる。また、今回の試験の範囲では、C32%、C29% とともに、高性能 AE 減水剤の添加量を除き配合

が一定の場合、フロー半径 200mm 到達時間 t_{200Exp} はスランプフロー値の変化に対してあまり影響を受けないことが認められる。

c) V ロート流下時間

図-17 は、スランプフロー値 S_f と V ロート流下時間との関係を表わす。C32% と C29% とでは、V ロ

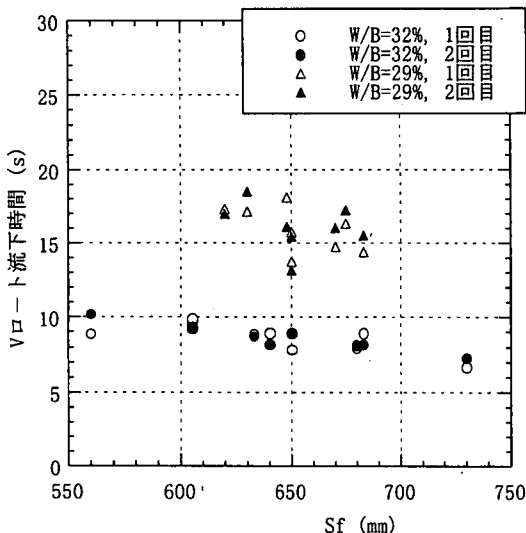


図-17 スランプフロー値とVルート流下時間との関係

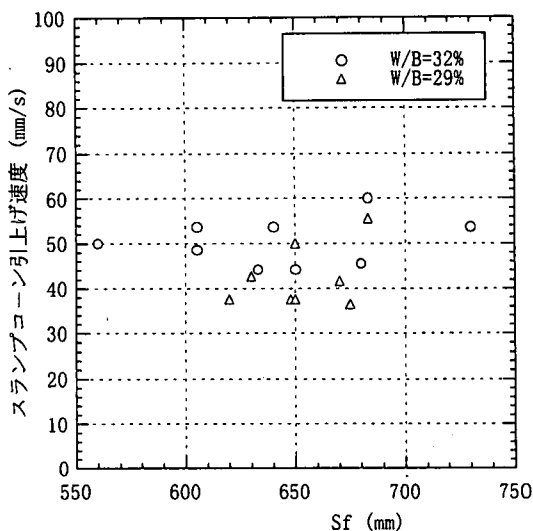


図-19 スランプフロー値とスランプコーン引上げ速度との関係

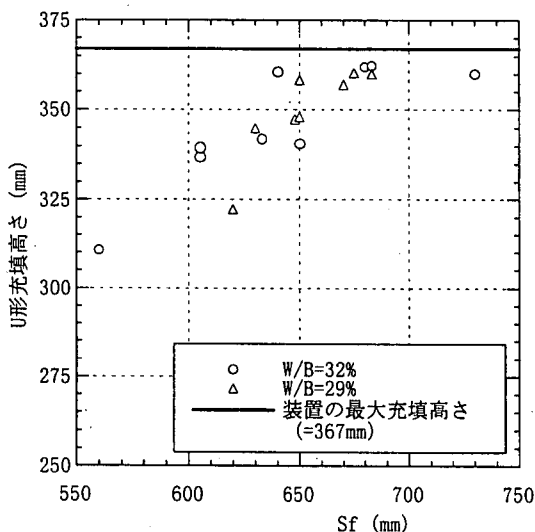


図-18 スランプフロー値とU形充填高さとの関係

験の範囲では C32%, C29%とも良好な空隙通過性を有していると判断される。

e) スランプコーンの引上げ速度

図-19 は、スランプコーンの引上げ速度をビデオ再生画面で測定した結果である。多少ばらつきが見られるが、高流動コンクリートにおけるスランプコーンの引上げ速度は、高流動モルタル⁴⁾と同様に、ほぼ40~60mm/sの範囲にある。

(5) 降伏値の評価

スランプフロー値 S_f とスランプフロー試験体容積 V とを、スランプフロー試験における降伏値とスランプフロー値との関係を表わす理論式⁵⁾(28)に代入して、降伏値 τ_{yF} が求められる。

$$\tau_{yF} = \frac{15^2 \rho g V^2}{4\pi^2 S_f^5} \quad (28)$$

ここに、 τ_{yF} : スランプフロー値から求められる降伏値 (Pa), S_f : スランプフロー値 (mm), ρ : 密度 (=単位容積質量) (g/mm^3), g : 重力加速度 (mm/s^2), V : 試験体容積 (mm^3)。

一方、スランプフロー試験体の中心から半径方向に20mmピッチに測定した高さ分布 (r, z) の測定値から、試験体の高さ分布を表わす理論式⁵⁾(29)によって、 L と τ_{yH} とをフィットパラメータとした回帰分析を行ない、降伏値 τ_{yH} が求められる。

$$\frac{z^2}{2} = (L-r) \frac{\tau_{yH}}{\rho g} \quad (29)$$

ここに、 τ_{yH} : スランプフロー試験体の高さ分布から求められる降伏値 (Pa), L : 試験体の中心から

ート流下時間に明確な差が認められる。また、Vルート流下時間は、C29%では多少ばらつきが見られるが、C32%ではほぼ7秒から10秒の間にあり、t200Exp.と同様に、スランプフロー値の変化に対してあまり影響を受けないことが確認される。これは、Vルート試験では、ひずみ速度が比較的大きな領域でのコンクリートの流動特性を評価しており、同じようにひずみ速度が比較的大きな領域の流動特性を評価するt200Expと同様の傾向が顕れたものと推察される。

d) U形充填高さ

図-18 は、スランプフロー値 S_f とU形充填高さとの関係を表わす。何れのスランプフロー値においてもU形充填高さは300mm以上であり、今回の試

表-7 試験結果一覧(2)

配合	No.	スランプフロー値	スランプフロー試験体容積	正規化されたスランプフロー値	スランプフロー値から求められる降伏値	試験体の高さ分布から求められる降伏値	
		S_f (mm)	V ($\times 10^6 \text{mm}^3$)	S_{fN} (mm)	τ_{yF} (Pa)	τ_{yH} (Pa)	相関係数 R
C32%	1	560	5.316	568	67	68	0.982
	2	605	5.335	612	46	46	0.987
	3	605	5.330	613	46	43	0.939
	4	633	5.370	638	37	45	0.946
	5	640	5.374	646	35	31	0.988
	6	650	5.373	656	32	34	0.980
	7	680	5.381	686	26	24	0.975
	8	683	5.341	690	25	22	0.982
	9	730	5.376	736	18	18	0.984
C29%	1	620	5.353	627	41	37	0.966
	2	630	5.334	638	38	34	0.966
	3	648	5.329	656	33	31	0.940
	4	650	5.328	658	32	33	0.922
	5	650	5.337	658	32	28	0.988
	6	670	5.334	678	28	26	0.979
	7	675	5.348	683	27	25	0.983
	8	683	5.339	691	25	24	0.938

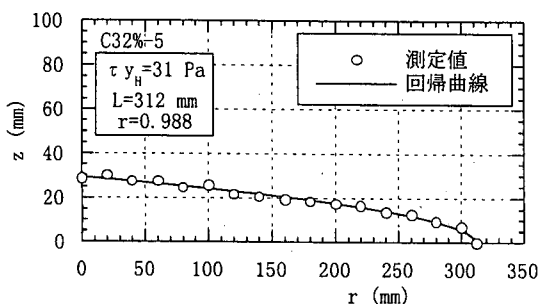


図-20 高さ分布の測定値と回帰曲線の一例

端部までの距離 (mm)。

スランプフロー試験体の高さ分布, および, 高さ分布の測定値から求められた回帰曲線の一例を図-20に示す。

表-7に, スランプフロー値から求められる降伏値 τ_{yF} と, スランプフロー試験体の高さ分布から求められる降伏値 τ_{yH} とを一覧表にして示す。また, 図-21は, τ_{yF} と τ_{yH} との関係を表わしている。C29%の配合では, τ_{yF} の方が τ_{yH} と比較して多少大きな値となる傾向が見られるものの, 両者はほぼ一致している。

(6) 数値流体解析による塑性粘度の評価

基本配合 C32%と, 基本配合 C32%において細骨材表面水率を実際よりも+2%大きく設定してしまっ

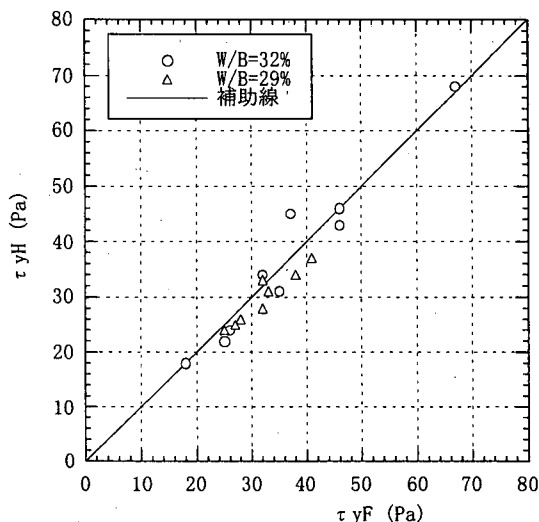


図-21 τ_{yF} と τ_{yH} との関係

た場合にほぼ相当する C29%とでは, 高流動コンクリートの塑性粘度がどの程度異なるのかを, 数値流体解析により定量的に表わすことを試みる。

a) 解析の前提

解析の対象は, 図-15に示した, スランプフロー値がほぼ同等 (640~650mm) の C32%-5, C32%-6, および C29%-3, C29%-4, C29%-5とする。

表-5に示す配合表から算定される単位容積質量は, C32%が $2.321 \times 10^3 \text{g/mm}^3$, C29%が 2.344×10^3

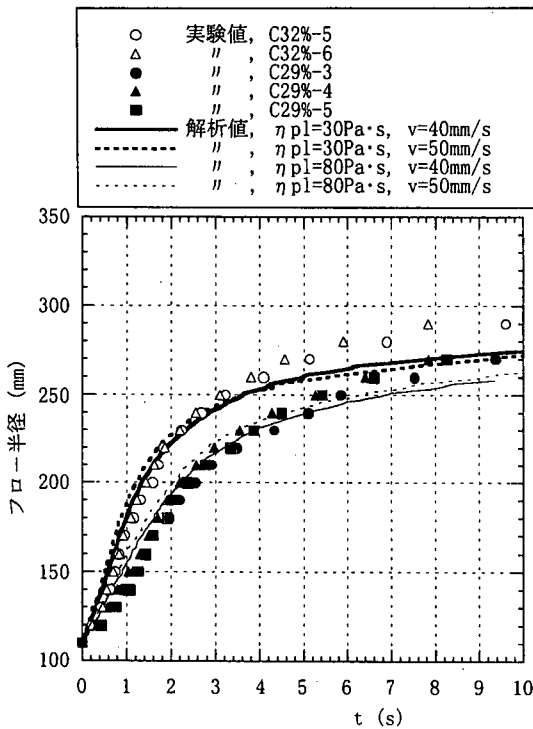


図-22 フロー半径と到達時間との関係

g/mm^3 である。C32%の単位容積質量とC29%の単位容積質量とは1%程度しか違わないため、数値解析に用いる高流動コンクリートの単位容積質量は $2.321 \times 10^3 \text{g}/\text{mm}^3$ とする。

表-7 が示すように、C32%-5, C32%-6, および C29%-3, C29%-4, C29%-5 の、スランブフロー値から式(26)によって求められる降伏値 τ_{yF} は 32~35Pa, スランブフロー試験体の高さ分布から式(27)によって求められる降伏値 τ_{yH} は 28~34Pa である。そこで、数値解析に用いる高流動コンクリートの降伏値は 30Pa で一定とする。

スランブコーンの引上げ速度の測定値は、

C32%-5 : 54mm/s, C32%-6 : 44mm/s,

C29%-3 : 38mm/s, C29%-4 : 38mm/s, C29%-5 : 50mm/s, である。したがって、スランブコーンの引上げ速度 v は、40mm/s と 50mm/s の2通りについて解析する。その他の解析条件は、3章に示した数値解析条件を用いる。

b) 解析結果

図-22 に、塑性粘度 η_{pl} を 30Pa·s とした解析ケース、および 80Pa·s とした解析ケースのフロー半径と到達時間との関係を、実験値とともに示す。フロー半径と到達時間との関係は、フロー半径が 250mm を超える領域では、高流動モルタルの場合にも一部見られたように、実験値の方が拡がる早さがやや早

くなる傾向が見られるものの、フロー半径が 250mm 以下の領域では、それぞれのケースで、実験値と解析値とが良く一致している。したがって、C32%-5 および C32%-6 の塑性粘度はおおよそ 30Pa·s, また、C29%-3, C29%-4 および C29%-5 の塑性粘度はおおよそ 80Pa·s と同定される。

今回実施した事例では、高流動コンクリートの細骨材表面水率を実際よりも+2%大きく設定してしまった場合、スランブフロー値がほぼ同等であっても塑性粘度は約 2.7 倍も大きくなるが、スランブフロー試験におけるフロー半径と到達時間との関係、および数値流体解析を通して明らかとなった。

7. まとめ

本研究では、スランブフロー試験における高流動コンクリートの流動挙動を数値流体解析によってシミュレートすることの妥当性とその限界が高流動モルタルを用いた実験値との比較を通して明らかにされるとともに、数値流体解析を通して、レオロジー定数（降伏値、塑性粘度）がフロー半径到達時間に与える影響、さらに、スランブフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法が示された。

研究の成果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 変形速度の大きい高流動コンクリートを対象として数値解析する場合には、スランブコーンが引き上げられる途上でのスランブコーン側壁の影響をモデル化する必要がある。
- (2) 塑性粘度 η_{pl} と降伏値 τ_y との比 η_{pl}/τ_y が 1.0s 以上の場合には、数値解析によって得られる解析値は、高流動モルタルのフロー半径と到達時間との関係を実験値と比較してかなり高い精度 ($\pm 20\%$) でシミュレートしている。

ただし、 η_{pl}/τ_y が 1.0s よりも小さい場合には、解析値と実験値との間に差違が生じる。その要因として、数値解析に用いた解析条件が実際の高流動モルタルの流動・変形挙動と異なることが考えられる。その要因の分析にあたっては、降伏値 τ_y の大きい領域と小さい領域とに区分して考察する必要があると思われる。現時点で考えられる要因として、

- ① 流体モデル：ひずみ速度が小さい領域における Bingham モデルの適用性の限界、
- ② レオロジー定数：球引上げ試験における、ひずみ速度が小さい領域に対する Ansley らの式(25)の適用性の限界、

などが挙げられるが、その解明は今後の課題である。

(3) レオロジー定数がフロー半径 200mm 到達時間に与える影響は塑性粘度が支配的であるが、フロー半径 250mm 到達時間では塑性粘度だけでなく降伏値の影響も大きい。

(4) 粗骨材を含む高流動コンクリートの場合でも Bingham 流体としての流動挙動を示すのであれば、フロー半径と到達時間との関係から、数値流体解析によって高流動コンクリートのレオロジー定数を評価することができる。

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998。
- 2) 建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）・同解説，1997。
- 3) 小野木重治：化学者のためのレオロジー，化学同人，1982。
- 4) 小門 武，宮川豊章：スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.113-129，1999.11。
- 5) 小門 武，細田 尚，宮川豊章，藤井 學：スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.19-29，1997.11。
- 6) Fung, Y.C. (大橋義夫，村上澄男，神谷紀生共訳)：連続体の力学入門，培風館，pp.225-226，1980。
- 7) 八田夏夫：流れの計算，森北出版，pp.82-117，1994。
- 8) Harlow, F.H. and Welch, J.E.：Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, *the Physics of Fluids*, Vol.8, No.12, 1965。
- 9) 数値流体力学編集委員会編：非圧縮性流体解析，東京大学出版会，pp.86-98，1995。
- 10) 小谷勝昭，神田 亨：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，Vol.21, pp.103-108，1985.7。
- 11) 谷川恭雄，森 博嗣：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，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.481-482，1985.10。
- 12) 鍋田克巳，町田篤彦，岩下和義，佐々木尊廣：個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.479-484，1994。
- 13) 石黒和浩，富谷潤一：フレッシュコンクリートの流動シミュレーション，土木学会第 50 回年次学術講演会，pp.1028-1029，1995。
- 14) 山田義智，大城 武，枘田佳寛：フレッシュコンクリート流動解析への MAC 法の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.1, pp.131-136，1998。
- 15) Roache, P.J. (高橋亮一他訳)：コンピュータによる流体力学 <上>，構造計画研究所，pp.94-99，1978。
- 16) Ansley, R.W. and Smith, T.N.：Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic, *AIChE Journal*, Vol.13, No.6, pp.1193-1196，1967.11。
- 17) 土木学会：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（案），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，pp.175-198，1986.3。
- 18) 小門 武，三宅正人：スラグ系締固め不要コンクリートの基礎特性と充填性実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13, No.1, pp.875-880，1991。
- 19) 横山正史，柄川伸一，田中充夫，松岡 彰，小門 武：鋼殻構造の沈埋トンネル最終継手部への超流動コンクリートの適用性検討，土木学会第 48 回年次学術講演会概要集，第 VI 部，pp.248-249，1993。
- 20) 小門 武，鈴木雄三，輪湖建雄，佐藤正一：沈埋トンネル・フルサンドイッチ構造部への充填を対象とした粉体系高流動コンクリートの諸特性について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.191-196，1995。

(1999. 5. 19 受付)

STUDY ON A METHOD OF OBTAINING RHEOLOGICAL COEFFICIENTS OF HIGH-FLOW CONCRETE WITH NUMERICAL ANALYSIS

Takeshi KOKADO, Takashi HOSODA and Toyoaki MIYAGAWA

Numerical analysis was attempted to make clear the relationship between flow behavior in the slump flow test and rheological coefficients of high-flow concrete. Compared with experimental data, it was ascertained that numerical analysis simulates flow behavior in the slump flow test accurately, if plastic viscosity-yield value ratio, η_{pl}/τ_y , exceeds 1.0sec. Then the influence of plastic viscosity and yield value on reaching time in 200mm and 250mm radius, and also a method of obtaining rheological coefficients of high-flow concrete were demonstrated by using numerical analysis.