

# 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

小門 武<sup>1</sup>・宮川豊章<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 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)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 京都大学大学院工学研究科 教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

スランプフロー試験におけるフロー到達時間とレオロジー定数との関係を明らかにすることを目的として、高流動モルタルを用いてスランプフロー試験と球引上げ試験とを同時に実施した。この結果、高流動モルタルは Bingham 流体としての流動特性を示すとともに、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  $\eta_{pl}$  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  $\eta_{pl}$  との間に高い相関関係が認められた。したがって、高流動コンクリートが Bingham 流体としての流動特性を示す場合には、400mm フロー到達時間、あるいは 500mm フロー到達時間によって塑性粘度が評価可能であることが示唆される。

**Key Words** : slump flow, high-flow concrete, self-placing concrete, rheology, Bingham plastics, rheological coefficients, yield value, plastic viscosity

## 1. はじめに

コンクリート工事における施工の合理化・省力化などを目的として、自己充填性を有する高流動コンクリート<sup>1),2)</sup>が開発され、実用化が進められている。その適用は、鉄筋などの補強材が高密度に配置されたコンクリート構造物に止まらず、鋼コンクリートサンドイッチ構造沈埋函<sup>3)</sup>やコンクリート充填鋼管構造<sup>4)</sup>などの各種合成構造に及び、さらに、シールドトンネルセグメント<sup>5)</sup>などコンクリート二次製品への適用も進められている。このように、高流動コンクリートを利用して施工の合理化・省力化が進められ、さらに、高流動コンクリートの使用を前提とした新たな構造形式も生まれており、高流動コンクリートは今後さらに広い範囲にわたって活用されていくものと思われる。

コンクリートが高い充填性をもつためには、高い流動性と優れた材料分離抵抗性を併せ持つことが必要である<sup>6)</sup>。高流動コンクリートの流動性を評価する指標として主にスランプフロー値が、また、材料分離抵抗性の評価指標としてフロー到達時間やロート流下時間<sup>7)</sup>などが実験室、現場を問わず広く用い

られている。しかしながら、これらの評価指標と力学上の物理定数との関係は未だ十分に解明されていないため、高流動コンクリートの充填性を定量的に評価することは困難である。

このため、高流動コンクリートを新たな形式の構造物に適用する場合や、使用材料・配合を変更する場合、型枠の隅々まで充填可能であるかどうかをスランプフロー値やフロー到達時間などの評価指標によって定量的に評価することができず、実物大の模型を使った充填実験を行ない、確認する必要がある。さらに、充填実験を通して、これらの評価指標に対する品質管理上の規定値を設定する必要が生じる<sup>7),8)</sup>。充填実験に要する多大な労力と費用軽減の観点から、コンクリート打設時の流動挙動を数値解析によって予測しようとする研究<sup>9)</sup>が進められているが、解析に必要なコンクリートの流動特性を定量的に把握するための情報が不足している<sup>10)</sup>ことが指摘されている。

したがって、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<sup>11)</sup>特性を明らかにするとともに、スランプフロー値やフロー到達時間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は、より合理的な材料選定や配合設計を進める上で、さらに、実構造物への適用を通して得られるスランプフロー値やフロー到達時間などの評価指標に関する膨大なデータを数値流体解析などのコンクリート充填性解析に有効にフィードバックしていく上で、極めて有用であると考えられる。

筆者らは、既報<sup>12)</sup>で、高流動コンクリートの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、スランプフロー試験と球引上げ試験とによって、導いた理論式の妥当性を確認している。本論文では、球引上げ試験を通して高流動コンクリートのレオロジー特性を評価するとともに、スランプフロー試験におけるコンクリートが広がる早さに着目して、フロー到達時間と塑性粘度との関係について考察する。

## 2. 球引上げ粘度計の測定原理

### (1) レオロジー定数測定装置について

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とレオロジー定数との関係を実験によって明らかにするためには、高流動コンクリートのレオロジー定数を正確に測定する必要がある。

従来から、セメントペースト、モルタルも含め、比較的軟らかいコンクリートのレオロジー定数の測定には、主に回転粘度計と球引上げ粘度計とが用いられてきた<sup>13)</sup>。しかしながら、フレッシュコンクリートやモルタルのように、水と、セメントや骨材などの固体との固液分散系にあっては、回転する円筒壁面と接する試料の面が変化しないため、回転に伴って円筒壁面に壁効果<sup>14)</sup>による液体層が形成され、円筒壁面に沿ってすべりが生じる。Tattersall<sup>15)</sup>によって考案された回転翼型粘度計は、翼状の突起を付けたロッドの回転数とトルクとの関係からレオロジー定数を求めるものであり、壁効果によるすべりの影響は解消されるが、レオロジー定数が既知な流体を用いて予め装置定数を求めておくことが必要とされる。一方、球引上げ粘度計は、異なる速度で球を引き上げ、それぞれの引上げ速度と引上げ荷重(=抗力)との関係から、Ansleyらの式<sup>16)</sup>を用いて降伏値と塑性粘度とを求めるものであり、市販の部品を使って比較的容易に装置を製作することができ、モルタルやセメントペーストの測定に適用されている<sup>12), 17), 18)</sup>。

本研究においては、高流動コンクリートのレオロ

ジー定数の測定に球引上げ粘度計を用いる。ここでは、既往の研究結果を引用しながら、球引上げ粘度計によるレオロジー定数の測定原理について考察を加える。

### (2) 球引上げ粘度計の測定原理

直径  $D$  の球が無限に広がる静止流体中を一樣な速度  $v$  で移動するとき、球に作用する流体抵抗、すなわち球の受ける抗力  $F$  は、抗力係数  $C_D$  と運動エネルギー、および球の投影面積との積によって与えられる<sup>19)</sup>。

$$F = C_D \left( \frac{\rho v^2}{2} \right) \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\rho$  : 流体の密度。

Newton 流体の場合、抗力係数  $C_D$  は Reynolds 数  $Re$  の関数となり、Reynolds 数の大きさに応じて次のように表わされる<sup>20)</sup>。

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (Re \leq 2.0) \quad (2)$$

$$C_D = \frac{18.5}{Re^{0.6}} \quad (2.0 < Re \leq 10^3) \quad (3)$$

$$C_D = 0.44 \quad (10^3 < Re \leq 2 \times 10^5) \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (5)$$

ここに、 $\mu$  : 粘性係数。

式(2)は Stokes の公式から、式(4)は Newton の抵抗法則から導かれる<sup>21)</sup>。また、Reynolds 数が 2.0 から  $10^3$  までの遷移域に対しては、式(3)の他に数多くの式が提案されている<sup>22)</sup>。

一方、Bingham 流体の場合には、抗力  $F$  は降伏値  $\tau_y$  の影響も受ける。Ansley ら<sup>16)</sup>は、Bingham 流体中を一定速度  $v$  で移動する直径  $D$  の球に作用する抗力  $F$  と降伏値  $\tau_y$ 、および塑性粘度  $\eta_{pl}$  との関係を表わす式(6)を導くとともに、落球試験の結果から、式(1)で定義される抗力係数  $C_D$  が少なくとも  $10^0 \sim 10^3$  の範囲で式(6)が成り立つことを確認している。

$$F = 3\pi\eta_{pl}vD + \frac{7}{8}\pi^2D^2\tau_y \quad (6)$$

式(6)の右辺を、運動エネルギーと球の移動方向に垂直な面に対する投影面積との積に書き直すと、

$$F = \left( \frac{24}{\frac{\rho v^2}{\eta_{pl} \frac{v}{D} + \frac{7\pi}{24} \tau_y}} \right) \left( \frac{\rho v^2}{2} \right) \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (7)$$

となり、Bingham 流体における抗力係数  $C_D$  は、Ansley らの式(6)から、式(8)で表わされる。

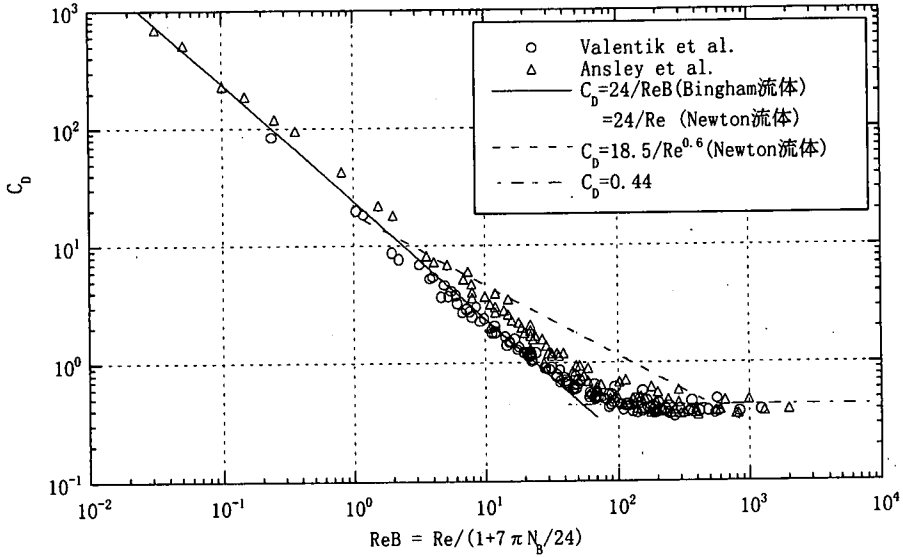


図-1  $ReB$  と抗力係数  $C_D$  との関係

$$C_D = \frac{24}{\left( \frac{\rho v^2}{\eta_{pl} \frac{v}{D} + \frac{7\pi}{24} \tau_y} \right)} \quad (8)$$

式(8)の分母を Reynolds 数  $Re$  と Bingham 数  $N_B$  とを用いて書き直すと、式(8)は次のように表わすことができる。

$$C_D = \frac{24}{\left( \frac{Re}{1 + \frac{7\pi}{24} N_B} \right)} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta_{pl}} \quad (10)$$

$$N_B = \frac{\tau_y D}{\eta_{pl} v} \quad (11)$$

すなわち、Bingham 流体に対する Ansley らの式(6)では、抗力係数  $C_D$  は Reynolds 数  $Re$  だけでなく Bingham 数  $N_B$  の関数として表わされることになる。そして、Newton 流体を対象とした式(2)における  $Re$  数が、式(9)では  $Re/(1 + 7\pi N_B/24)$  に置き換わったと考えることができる。ここで、 $Re/(1 + 7\pi N_B/24)$  を  $ReB$  (Bingham-Reynolds 数) と標記する。

$$ReB = \frac{Re}{1 + \frac{7\pi N_B}{24}} \quad (12)$$

したがって、 $ReB$  を用いると、式(9)は式(13)のように表わされる。

$$C_D = \frac{24}{ReB} \quad (13)$$

なお、降伏値  $\tau_y$  が 0 のとき、すなわち Newton 流体の場合には

$$ReB = Re \quad (14)$$

となり、式(13)は式(2)と同一になる。

Ansley らの式(6)の適用性を確認するために、Valentik ら<sup>23)</sup>の落球試験結果を用いてデータ解析を行なった。Valentik らは、降伏値  $\tau_y$ 、塑性粘度  $\eta_{pl}$ 、および密度  $\rho$  が既知のカオリン懸濁液 6 種類について、直径  $D$  (9.5~57.1mm) および密度  $\rho_s$  ( $1.314 \times 10^3 \sim 8.195 \times 10^3$  g/mm<sup>3</sup>) の異なる球を用いて落球試験を行ない、終末速度<sup>24)</sup>  $v$  (terminal velocity) を求めている。球が静止流体中を沈降する場合、重力加速度を  $g$  とすると、Newton の第 2 法則から抗力  $F$  は、

$$F = \frac{(\rho_s - \rho) \pi g D^3}{6} \quad (15)$$

となる。式(1)と同様に、抗力  $F$  が抗力係数  $C_D$  と運動エネルギー、および球の投影面積との積によって与えられるように抗力係数  $C_D$  を定義すると、式(15)から、落球試験における抗力係数  $C_D$  と終末速度  $v$  との関係が得られる。

$$C_D = \frac{4(\rho_s - \rho)gD}{3\rho v^2} \quad (16)$$

Valentik らの試験結果から、式(12)により  $ReB$  を、また、式(16)により  $C_D$  を求め、Ansley らの試験結果、および降伏値  $\tau_y$  が 0 の場合、即ち Newton 流体の場合の抗力係数  $C_D$  と Reynolds 数  $Re$  との関係式(2)、(3)、(4)を併せてプロットしたものが図-1 である。

ある。Bingham 流体を対象とした Valentik らの試験結果と Ansley らの試験結果とからそれぞれ得られる  $ReB$  と  $C_D$  との関係は、 $C_D$  が少なくとも 1 以上 ( $ReB \leq 24$ ) の範囲で式(13)と良く一致している。

さらに、Bingham 流体では、遷移域の範囲が Newton 流体のように広くはなく、 $ReB$  がほぼ  $10^2$  以上の領域から、 $C_D$  は Newton 流体とほぼ同等の一定値をとるようになる。従って、Bingham 流体では、Newton 流体における Reynolds 数  $Re$  に替わって  $ReB$  を用いることにより、Newton 流体における  $Re$  と  $C_D$  との関係と同様の関係が  $ReB$  と  $C_D$  との間に成り立つことがわかる。そして、Ansley らの式(6)は、Newton 流体における Stokes の公式と同様、球が緩やかに流体中を移動する場合 ( $ReB < 24$ ) の Bingham 流体における球の抗力  $F$  を与えるものであり、球の直径  $D$ 、降伏値  $\tau_y$ 、および塑性粘度  $\eta_{pl}$  が一定の場合には、抗力  $F$  は速度  $v$  に比例するという関係を表わしている。

本研究における高流動コンクリートのレオロジー定数の測定では、終末速度を測定する落球式の粘度計に替えて、球を一定の速度で引き上げる際の抗力を測定する球引上げ粘度計を採用する。そして、球の引上げ速度を変化させて引上げ速度と抗力との関係を求め、その関係が直線関係にあるかどうか、即ち、Bingham 流体として取り扱うことが妥当であるかどうかを検討した上で、引上げ速度と抗力との関係から、Ansley らの式(6)により降伏値と塑性粘度とを求めることとする。なお、球引上げ粘度計を用いて高流動コンクリートのレオロジー定数を測定した例は未だ限られており<sup>12), 18)</sup>、また、高流動コンクリートを対象とした球引上げ粘度計の測定方法およびデータ解析方法も確立されていないため、その試験方法、ならびに試験データの解析方法についてできるだけ詳しく記述する。

### 3. 試験条件

#### (1) 試験概要

スランブフロー試験におけるコンクリートの流動挙動とレオロジー定数との関係を明らかにするために、スランブフロー試験とレオロジー定数の測定とを同時に実施する。試験室の温度は  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  である。

レオロジー定数の測定には、2章で述べたように、比較的軟らかい試料の測定に適した球引上げ粘度計を用いる。なお、球の直径は骨材最大寸法の3倍以上、また、容器の直径は球の直径の5倍以上必要と

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: $3.16 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ ブレン比表面積: $3,270 \text{ cm}^2/\text{g}$
細骨材	高炉スラグ微粉末 (BFS) $\text{SO}_3: 1.9\%$
	密度: $2.89 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ ブレン比表面積: $5,840 \text{ cm}^2/\text{g}$
増粘剤	相馬珪砂 (S)
高性能 AE 減水剤	3号(1.2-2.5mm) : 4号(0.3-1.2mm)
	: 6号(0.074-0.6mm)=1 : 1 : 1 表乾比重: 2.60, F.M.: 2.46
	セルロースエーテル系 (c)
	ポリカルボン酸系 (SP)

表-2 配合表

配合	No.	W/B (%)	S/B (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	OPC	BFS	S	MC	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
	8									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
	8									15.34
Mc0.25%	1	35			269	230	537	1151	0.6725	4.99
	2									5.37
	3									5.75
	4									6.14
	5									5.75
	6									6.90
	7									7.67
P30%	1	30	-	2.0	461	461	1077	-	-	4.61
	2									6.15
	3									7.69
Pc0.5%	1	35			499	428	998	-	2.495	7.13
	2									11.41

される<sup>18)</sup>ことから、装置の大型化を避けるため、骨材として細骨材のみを使用するモルタル、および骨材を含まないセメントペーストで試験を実施する。

#### (2) 使用材料と配合

使用材料の一覧を表-1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) とを質量比 3 : 7 の割合で使用する<sup>25)</sup>。細骨材(S)は相馬珪砂 (シリカサンド) 3号, 4号, 6号を等量混合したものを用いる。モルタルの細骨材結合材比 (S/B) は, 各種高流動コンクリートの配合例<sup>26)</sup>を参考にして, 1.50 で一定とする。

モルタルの配合は, 水結合材比 (W/B) が 30%, 35%および 40%の粉体系 (それぞれ M30%, M35%, M40%と略記する) と, 水結合材比 (W/B) が 35%で増粘剤を水量の 0.5%, および 0.25%添加した増粘剤系 (Mc0.5%, Mc0.25%) の計 5 種類である。また, セメントペーストの配合は, 水結合材比 (W/B) が 30%の粉体系 (P30%) と, 水結合材比が 35%で増粘剤を水量の 0.5%添加した増粘剤系 (Pc0.5%) との 2 種類である。それぞれの配合において, 高性能 A E 減水剤 (SP) の添加量を変えて流動性を変化させている。表-2 にこれらの配合を示す。

練混ぜには 2 軸ミキサ (容量 50l, 回転数 62rpm) を使用し, 結合材, 増粘剤系の場合には増粘剤, そして細骨材の順に投入後空練り 15 秒, その後, 水と高性能 A E 減水剤を投入して 3 分間練り混ぜる。

### (3) スランプフロー試験

#### a) 試験要領

スランプフロー試験は球引上げ試験の開始時と終了直後にそれぞれ行ない, スランプフロー値と試料の広がる早さを測定する。なお, 球引上げ試験の終了直後に行なう試験では, 球引上げ試験に供していた試料を使用する。試験方法は JSCE-F503 (コンクリートのスランプフロー試験方法) に準拠し, JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法) に規定されたスランプコーンと, 水平に設置された 1,000mm×1,000mm の鋼製の平板とを用いる。平板は, JIS B 0601 (表面粗さ) に規定される算術平均粗さ(Ra)が 1.60 μmRa 相当に磨き仕上げされた SUS304 ステンレス鋼板を用いる。なお, 黒皮付きの SS400 鋼板と磨き仕上げされた SUS304 ステンレス鋼板とを用いて事前に実施したスランプフロー試験では, スランプフロー値, ならびに試料が広がる早さともほとんど差異は認められなかったが, 平板表面の仕上げの程度が明確なものを用いることとする。

スランプコーンは平板の中央部に設置する。また, スランプコーン内に試料を詰める際には, 試料は自重だけで充填される高流動域を対象としているので, 突き棒で突くことはしない。

#### b) 測定方法

スランプコーン引上げ後の試料の流動挙動は, 比

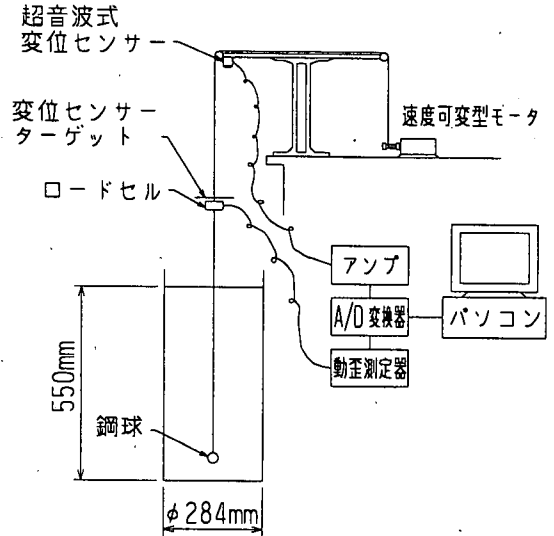


図-2 球引上げ粘度計の構成図

デモ撮影をして記録する。平板には予め半径方向に 10mm ピッチにマークを付けておく。そして, 1/30 秒の分解能を持つビデオ再生機を使って, 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を, スランプコーン引上げ開始直後から試料が停止するまで測定する。なお, スランプコーンが動き始める瞬間をもって, スランプコーンの引上げ開始時刻とする。また, 流動中の試料の中心から先端部までの長さ (10mm 単位) を『フロー半径』, その長さに到達する時間を『フロー半径到達時間』と呼ぶ。

スランプフロー試験に供した試料 (以後, 試験体と呼ぶ) が完全に停止した後, スランプフロー値と静止後のフロー半径とを 1mm 単位で測定する。その後, 試験体の重量を測定して試験体の容積を求める。なお, 試験体の重量から容積を求める際には, 表-2 に示す配合表から算定される単位容積質量  $\rho$  を用いる。

### (4) 球引上げ試験

#### a) 球引上げ粘度計の構成・諸元

図-2 に示す球引上げ粘度計を用いて球引上げ試験を行なう。鋼球 (JIS B 1501 (玉軸受用鋼球)) の直径  $D$  は 31.75mm, 容器の直径は 284mm である。試料は, 容器の底から 550mm の高さまで入れる。試験の開始は, 練上り後スランプフロー値が安定し始める 15 分後とする<sup>12)</sup>。

#### b) 球引上げ試験の手順

球を容器の底から約 50mm の高さにセットし, 球が試料表面に現われるまで一定の速度で球を引き上

げる。球を引き上げたあと球の表面に付着しているモルタルは、水洗後乾いた布で拭き取る。そしてまた球を容器の底から約 50mm の高さにセットする、という手順を繰り返す。なお、球の引上げによって球が通過した近傍の試料の均一性が乱されている可能性があること、および、静止状態に置かれた試料のコンシステンシー<sup>27),28)</sup> がそのチキソトロピー性<sup>11)</sup> によって変化していくことを避けるため、球を1回引き上げる毎にハンドミキサーによって 2~3 秒間試料を攪拌する。

c) 測定要領

図-2 に示すように、超音波式変位センサーにより球の変位  $y(t)$  を、また、ロードセルにより球の引上げに伴う抗力  $F(t)$  を測定し、測定データをパソコンに取り込む。球の引上げ距離が約 1mm 毎に測定データをパソコンに取り込めるよう、球の引上げ速度に合わせてデータを取り込む頻度を設定しておく。

d) 球の引上げ速度のパターン

球の引上げ速度のパターンは次の二つのパターン、(u,d: up and down) と (d+: down plus 8, 6, 4, 2 mm/s) の何れかによるものとする。なお、1回目の測定とそれ以降の測定とにおける試料の条件ができるだけ同じになるよう、1回目の測定に入る前にダミーの測定を1回行なっている。

パターン (u,d) :

(10mm/s:dummy)→[start] 10mm/s→20 mm/s→30 mm/s  
→40 mm/s→50 mm/s→60 mm/s→60 mm/s→50 mm/s  
→40 mm/s→30 mm/s→20 mm/s→10 mm/s [end]

パターン (d+) :

(60mm/s:dummy)→[start] 60mm/s→50 mm/s→40 mm/s  
→30 mm/s→20 mm/s→10 mm/s→8 mm/s→6 mm/s→  
4 mm/s→2 mm/s [end]

したがって、一つの試料につき、パターン (u,d) ではダミーを除いて計 12 回、パターン (d+) では同じくダミーを除いて計 10 回の測定を行なう。

4. 試験結果

(1) スランプフロー試験結果

a) スランプフロー値

球引上げ試験の開始時 (start) および終了直後 (end) にそれぞれ実施されたスランプフロー試験から得られたスランプフロー値  $S_f_s$ ,  $S_f_e$  と試験体容積  $V_s$ ,  $V_e$  とを表-3 に示す。球引上げ試験開始時と終了直後のスランプフロー値  $S_f$  の差 ( $=|S_f_e - S_f_s|$ ) は、最大で 22mm, 平均で 10mm であり、大きな経

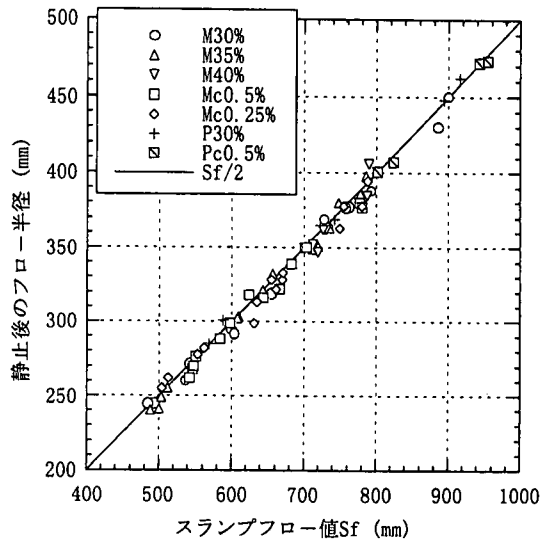


図-3 スランプフロー値と静止後のフロー半径との関係

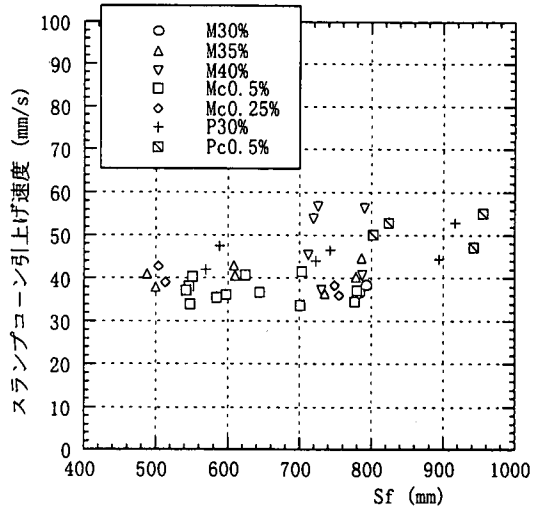


図-4 スランプコーン引上げ速度

時変化のない状態で球引上げ試験は実施されている。

b) スランプフロー値と静止後のフロー半径との関係

スランプフロー値  $S_f$  と静止後のフロー半径との関係を図-3 に示す。図-3 から、静止後のフロー半径はスランプフロー値  $S_f$  のほぼ 1/2 であり、スランプフロー試験において試料はほぼ軸対称に流動していることが確認される。

c) スランプコーンの引上げ速度

スランプコーンの引上げ速度ができるだけ等しくなるよう、全ての試験にわたり一人の試験者がスランプコーンの引上げを担当した。図-4 は、ビデオ再生画面でスランプコーンの引上げ速度が測定可能なものについて、その測定結果を示したものである。

表-3 試験結果一覧表

配合	No.	スランブフロー試験					球引上げ試験					
		球引上げ試験開始時		球引上げ試験終了直後		Sfe-Sfs (mm)	引上げ 速度の パターン	試験 時間 (分)	降伏値 $\tau_y$ (Pa)	塑性粘度 $\eta_{pl}$ (Pa·s)	相関 係数 R	
		Sfs (mm)	Vs ( $\times 10^6 \text{mm}^3$ )	Sfe (mm)	Ve ( $\times 10^6 \text{mm}^3$ )							
M30%	1	493	5.088	484	5.064	-9	(u, d)	25	121	60	0.983	
	2	542	5.208	537	5.202	-5	(u, d)	23	83	41	0.986	
	3	599	5.302	604	5.284	5	(d+)	25	45	37	0.999	
	4	653	5.343	654	5.339	1	(u, d)	20	34	28	0.997	
	5	732	5.377	728	5.374	-4	(u, d)	20	19	23	0.994	
	6	761	5.382	758	5.375	-3	(d+)	22	13	22	0.995	
	7	793	5.374	783	5.376	-10	(d+)	22	10	21	0.997	
	8	900	5.411	885	5.394	-15	(u, d)	21	2.8	14	0.997	
M35%	1	500	5.154	488	5.060	-12	(u)	14	102	33	0.992	
	2	512	5.096	503	5.105	-9	(d)	13	106	18	0.958	
	3	610	5.296	608	5.292	-2	(u, d)	18	44	17	0.990	
	4	656	5.319	643	5.327	-13	(d+)	25	32	15	0.998	
	5	712	5.367	719	5.369	7	(d+)	25	19	13	0.996	
	6	735	5.372	748	5.347	13	(u, d)	20	15	11	0.993	
	7	778	5.391	786	5.393	8	(u, d)	18	12	9.8	0.990	
M40%	1	730	5.354	712	5.363	-18	(d+)	28	19	6.8	0.995	
	2	726	5.359	719	5.367	-7	(u, d)	17	17	6.8	0.990	
	3	790	5.394	787	5.381	-3	(u, d)	20	10	4.7	0.986	
Mc0.5%	1	546	5.083	542	5.058	-4	(d+)	34	57	7.6	0.969	
	2	551	5.152	548	5.057	-3	(d+)	29	80	7.4	0.990	
	3	584	5.127	598	5.096	14	(u, d)	24	53	61	0.990	
	4	624	5.150	644	5.139	20	(u, d)	21	35	53	0.994	
	5	666	5.278	683	5.316	17	(d+)	27	28	45	0.999	
	6	701	5.250	703	5.226	2	(u, d)	21	24	42	0.989	
	7	777	5.327	780	5.316	3	(d+)	27	11	33	0.999	
Mc0.25%	1	504	5.051	513	5.112	9	(u, d)	23	112	44	0.952	
	2	562	5.207	553	5.112	-9	(d+)	30	72	43	0.991	
	3	635	5.187	631	5.218	-4	(d+)	25	38	32	0.995	
	4	670	5.286	655	5.244	-15	(d+)	23	30	29	0.998	
	5	671	5.248	661	5.255	-10	(u, d)	19	33	29	0.995	
	6	749	5.308	755	5.276	6	(u, d)	21	14	24	0.997	
	7	780	5.326	788	5.324	8	(u, d)	20	12	21	0.995	
P30%	1	588	5.243	569	5.233	-19	(d+)	35	44	11	0.997	
	2	722	5.361	742	5.389	20	(d+)	29	15	6.6	0.984	
	3	894	5.440	916	5.439	22	(d+)	28	4.2	3.1	0.996	
Pc0.5%	1	802	5.240	824	5.284	22	(d+)	29	9.0	14	0.996	
	2	943	5.314	955	5.307	12	(d+)	28	2.5	9.5	0.996	

スランブコーンの引上げ速度は、モルタルの場合はM40%の一部のデータを除き全て30mm/sから50mm/sの範囲にあり、ペーストの場合は全て40mm/sから60mm/sの範囲に入っている。スランブコーン引上げ速度の平均値は、モルタルの場合が40mm/s、ペーストの場合が48mm/sである。

#### d) フロー半径と到達時間

スランブフロー試験において、スランブコーンを引上げた後、試料が放射線状に広がっていく早さは、流動中の試料の中心から先端部までの長さ(=フロー半径)とその到達時間との関係によって表わされる。10mmピッチで測定されるフロー半径の到達時間(=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のものをそれぞれ3ケースずつ

選んで、図-5と図-6に示す。図-5は、M30%-4(Sfs=653mm, Sfe=654mm), M35%-4(Sfs=656mm, Sfe=643mm), および Mc0.5%-4(Sfs=624mm, Sfe=644mm)におけるフロー半径と到達時間との関係を表わす。同様に、図-6は、M30%-7(Sfs=793mm, Sfe=783mm), M40%-3(Sfs=790mm, Sfe=787mm), および Mc0.5%-7(Sfs=777mm, Sfe=780mm)におけるフロー半径と到達時間との関係を表わす。フロー半径が200mm程度までは、配合により勾配は異なるものの、フロー半径は時間の経過とともにほぼ直線的に増加していく。さらに、フロー半径が200mmを越えると、試料の広がる早さは徐々に低減し、その程度はスランブフロー値がほぼ同等であっても配合によって大きく異なっている。試料の広がる早さ

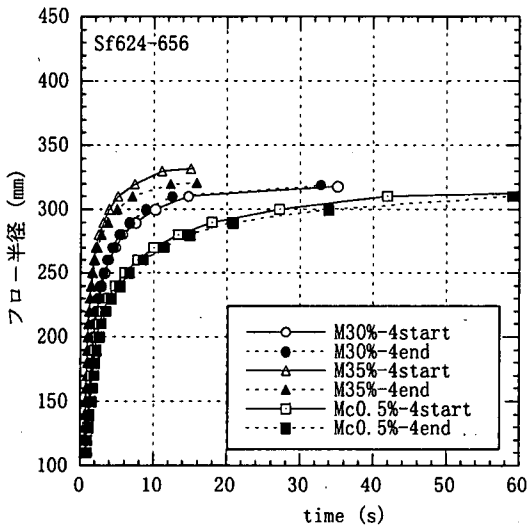


図-5 フロー半径到達時間の測定例  
(M30%-4, M35%-4, Mc0.5%-4)

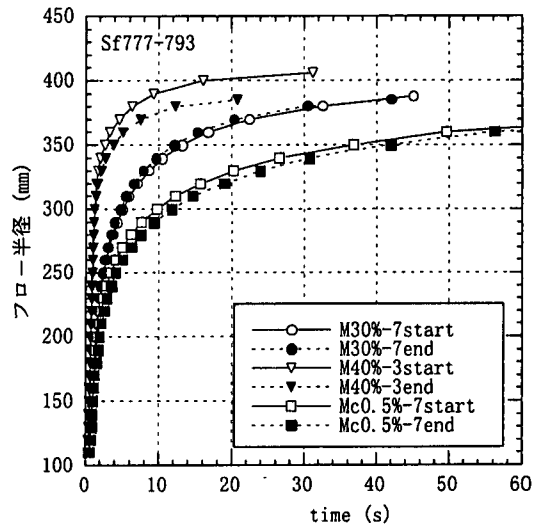


図-6 フロー半径到達時間の測定例  
(M30%-7, M40%-3, Mc0.5%-7)

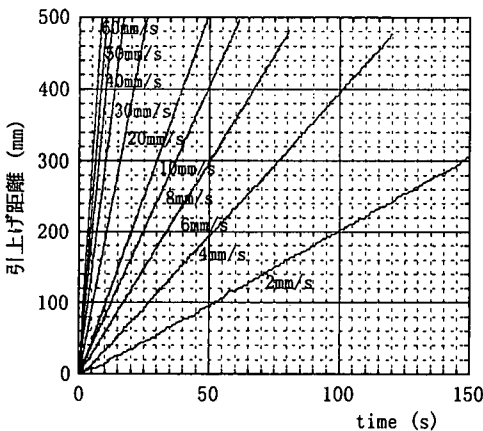


図-7 時間と引上げ距離との関係 (M30%-3)

表-4 球の引上げ速度の比較

目標速度	100~150mm			150~200mm			250~300mm		
	N	v (mm/s)	相関係数 R	N	v (mm/s)	相関係数 R	N	v (mm/s)	相関係数 R
60mm/s	44	57.8	0.996	41	59.7	0.993	42	59.1	0.992
50mm/s	37	48.5	0.992	35	48.3	0.995	35	47.1	0.993
40mm/s	42	39.6	0.994	44	37.9	0.994	43	40.0	0.990
30mm/s	41	29.7	0.994	46	28.9	0.995	42	29.6	0.993
20mm/s	43	19.1	0.994	45	19.1	0.996	44	19.7	0.997
10mm/s	44	10.2	0.995	45	10.2	0.993	45	10.3	0.996
8mm/s	48	7.9	0.997	49	8.1	0.995	47	8.0	0.997
6mm/s	47	6.0	0.995	50	6.0	0.995	46	5.8	0.996
4mm/s	48	4.0	0.995	50	4.0	0.995	50	3.9	0.996
2mm/s	45	2.1	0.993	50	2.1	0.996	49	2.0	0.997

とレオロジー定数との関係については、球引上げ試験から求められるレオロジー定数を用いて、次章で詳しく考察する。

## (2) 球引上げ試験データの解析方法に関する検討

球引上げ試験により得られた測定データの解析方法について検討する。

### a) 引上げ速度の回帰区間に関する検討

球の引上げを開始してからの時間と引上げ距離との関係は、図-7 にその一例 (M30%-3) を示すように、それぞれの引上げ速度 (目標速度) においてほぼ直線的であることが認められる。表-4 は、M30%-3 の測定結果から、引上げ距離が 100~150mm, 150~200mm, および 250~300mm のそれぞれにおける球の引上げ速度  $v$  を直線回帰により求めた結果を示

す。目標速度は予め無負荷の状態を設定されているため、試料の入った状態での実際の引上げ速度  $v$  は目標速度を多少下回るものがあり、また、回帰区間により若干の変動が認められるものの、時間と引上げ距離との関係はそれぞれの回帰区間で相関係数  $R$  がすべて 0.990 以上の高い相関性が認められる。したがって、引上げ速度の回帰区間に関する制約は特になく、次に述べる抗力の回帰区間に対応して、時間と引上げ距離との関係から直線回帰によって球の引上げ速度を求めるものとする。

### b) 抗力の回帰区間に関する検討

抗力の測定例を図-8 から図-10, および図-14 から図-16 に示す。なお、図-8 から図-10 は、球の引上げ速度パターン (u,d) の down curve (引上げ速度; 60mm/s → 10mm/s) における抗力の測定例を、ま



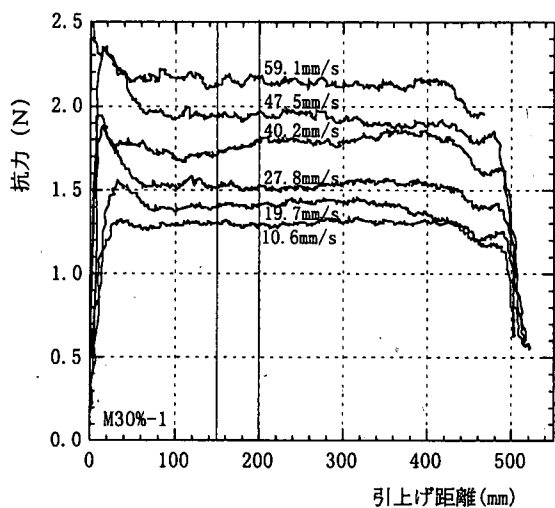


図-8 引上げ距離と抗力との関係 (M30%-1)

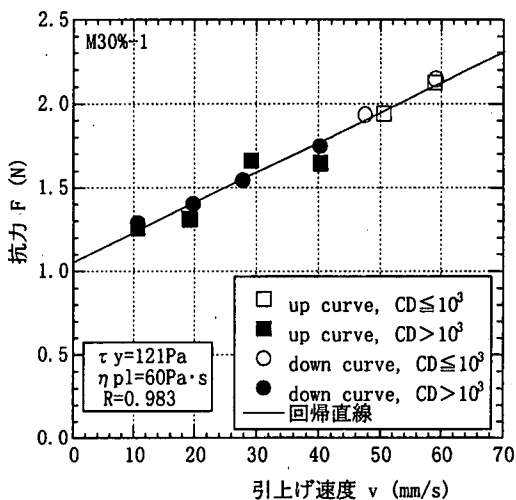


図-11 引上げ速度と抗力との関係 (M30%-1)

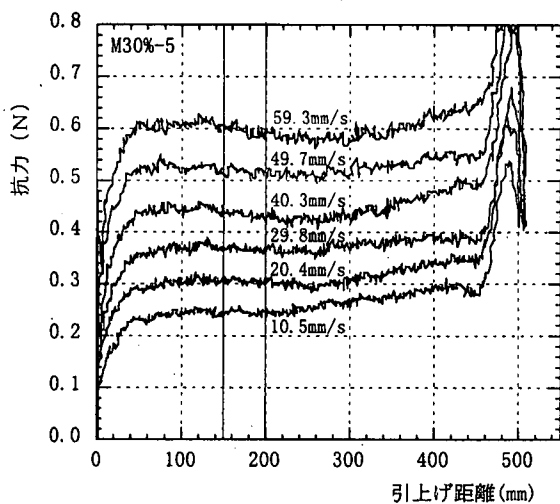


図-9 引上げ距離と抗力との関係 (M30%-5)

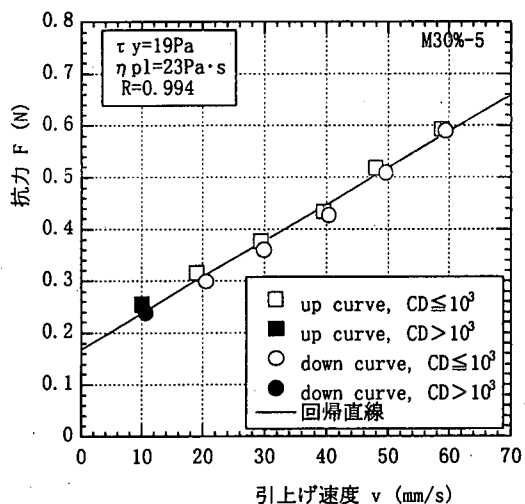


図-12 引上げ速度と抗力との関係 (M30%-5)

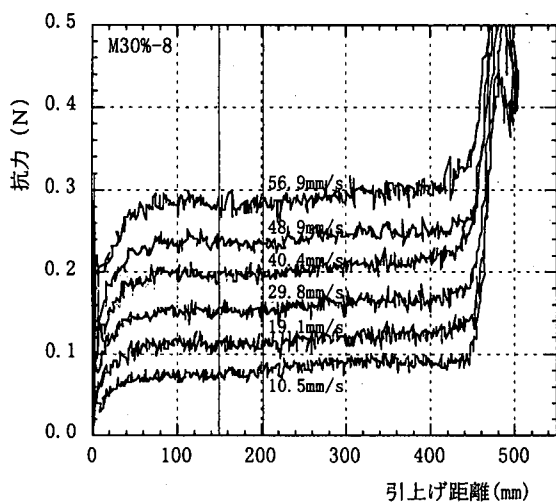


図-10 引上げ距離と抗力との関係 (M30%-8)

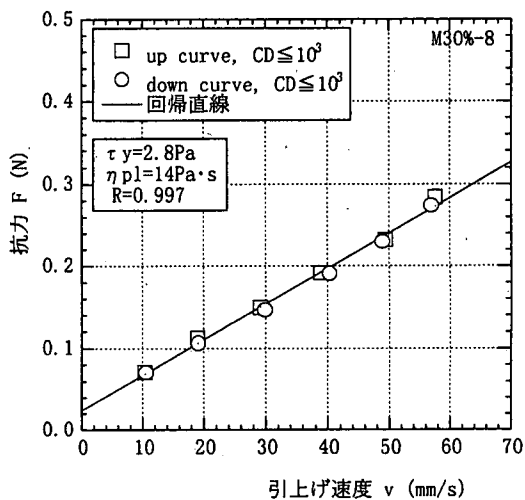


図-13 引上げ速度と抗力との関係 (M30%-8)

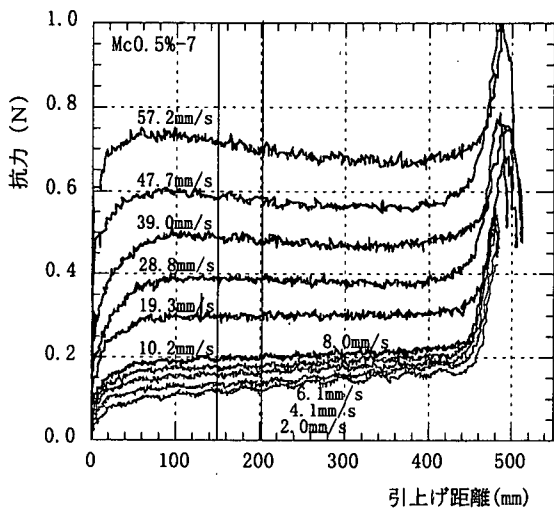


図-14 引上げ距離と抵抗力との関係 (Mc0.5%-7)

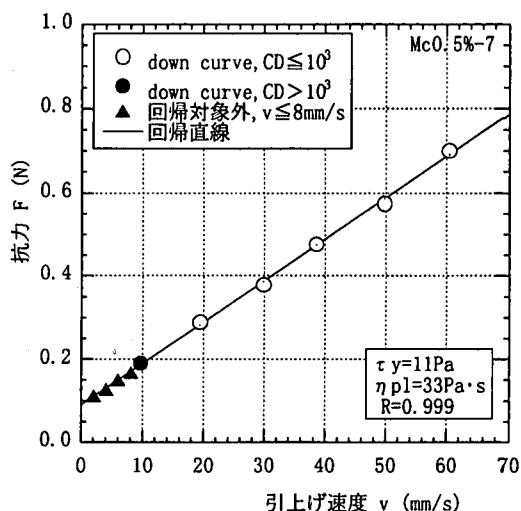


図-17 引上げ速度と抵抗力との関係 (Mc0.5%-7)

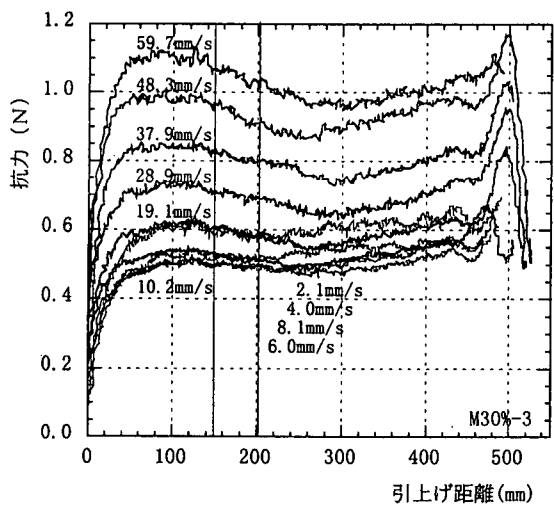


図-15 引上げ距離と抵抗力との関係 (M30%-3)

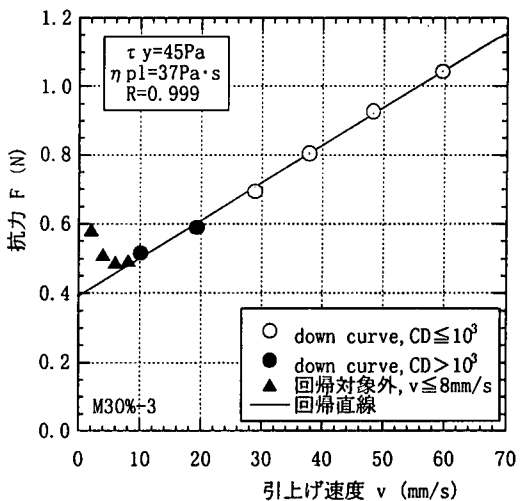


図-18 引上げ速度と抵抗力との関係 (M30%-3)

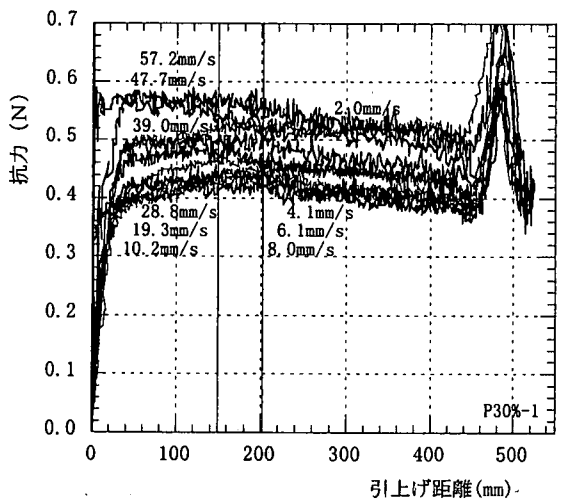


図-16 引上げ距離と抵抗力との関係 (P30%-1)

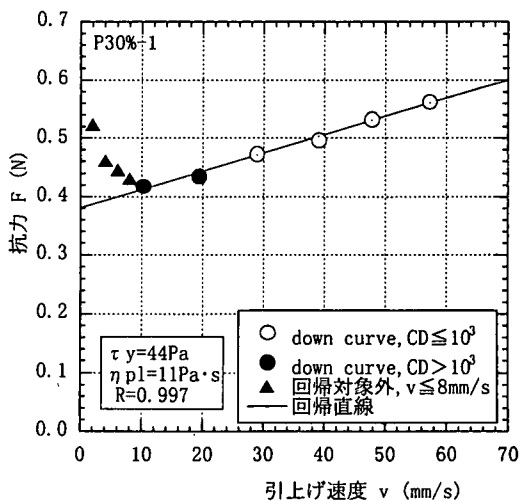


図-19 引上げ速度と抵抗力との関係 (P30%-1)

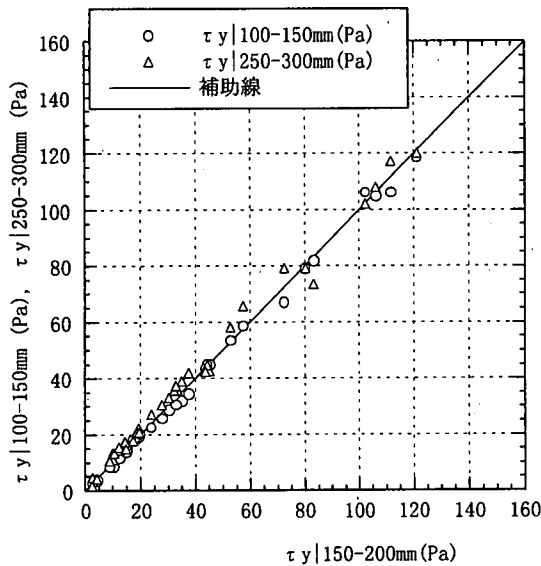


図-20 回帰区間による降伏値 $\tau_y$ の比較

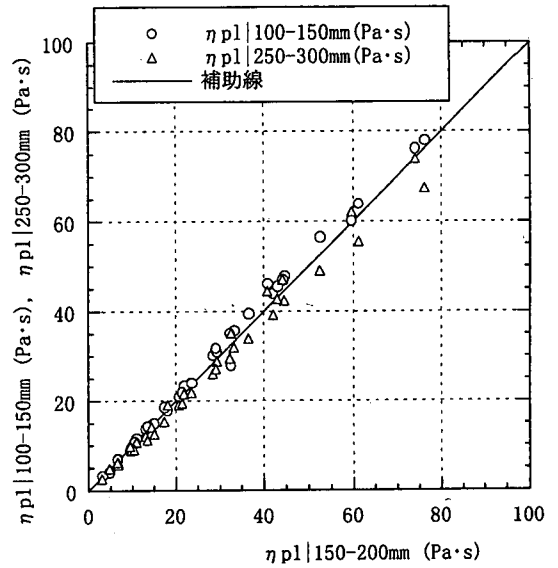


図-21 回帰区間による塑性粘度 $\eta_{pl}$ の比較

た、図-14 から図-16 は、パターン (d+) における抗力の測定例である。

M30%-1 のようにスランプフロー値が小さい場合、引上げ速度が大きいと、抗力は定常値に達する前に極大値を示すストレスオーバーシュート<sup>29)</sup>の現象が現れるが、引上げ距離が 100mm ないし 150mm を越えればほぼ定常値になる。また、球の引上げ速度が 10mm/s 以上であれば、引上げ速度が小さくなるに従い抗力が低減していく明確な傾向が認められる。

図-20 と図-21 は、球の引上げ速度 10mm/s 以上に於いて、回帰区間を①100~150mm、②150~200mm、③250~300mm、の 3 種類としてそれぞれ求めた抗力と引上げ速度から、Ansley らの式(6)により直線回帰して求められる降伏値と塑性粘度とを比較したものである。回帰区間を 100~150mm とした場合、回帰区間を 150~200mm とした場合と比較して、降伏値をやや小さく、塑性粘度をやや大きく評価する傾向にある。一方、回帰区間を 250~300mm とした場合には、回帰区間を 150~200mm とした場合と比較して、降伏値をやや大きく、塑性粘度をやや小さく評価する傾向にある。しかしながら、それぞれの差は有意なものではない。したがって、本研究では、抗力と引上げ速度の回帰区間を 150~200mm で一定とする。

#### c) データ解析の対象とする球の引上げ速度に関する検討

球の引上げ速度が 10mm/s 以上の領域では、何れのケースにおいても、引上げ速度と抗力とはほぼ直線の関係にある。パターン (u,d) における例として図-11 から図-13 に、また、パターン (d+) の例

として図-17 から図-19 に、それぞれ図-8 から図-10、および図-14 から図-16 において、回帰区間を 150~200mm とし求められる抗力と引上げ速度との関係を示す。抗力係数  $C_D$  が  $10^3$  以上であっても、引上げ速度が 10mm/s 以上の領域では、引上げ速度と抗力とはほぼ直線関係にあり、Bingham 流体として取り扱うことは妥当であるものと判断される。

しかしながら、引上げ速度が 10mm/s 未満の領域でも引上げ速度と抗力との関係が直線関係を保つのは、パターン (d+) のうち Mc0.5%-5 と Mc0.5%-7、および Pc0.5%-1 と Pc0.5%-2 の 4 ケースだけである。即ち、増粘剤を水量の 0.5% 添加した配合系で、かつ、スランプフロー値が 680mm 以上でない、モルタルであってもセメントペーストであっても、引上げ速度が 10mm/s 未満の領域で、引上げ速度と抗力との関係は直線関係を保持し得ない。逆に、図-18 と図-19 とから明らかなように、引上げ速度が低下するにつれて抗力が增大していく現象が現れた。Tattersall ら<sup>19)</sup>は、低せん断速度領域ではフレッシュコンクリートは Bingham モデルから外れ、せん断速度が低い程荷重(トルク)が大きくなる現象が現れる可能性を示唆しており、今回、一部のデータを除き、引上げ速度が 10mm/s 未満の領域で現れた現象と一致する。この現象は、極めてゆっくりとした変形の過程では、骨材、あるいは粉体の粒子同士の接触による摩擦力が卓越するようになるものと考えられ、その限界は、降伏値と塑性粘度双方の影響を受けるようである。

図-22 は、回帰区間：150~200mm、球の引上げ速度：10mm/s 以上、の条件の下で求められる降伏

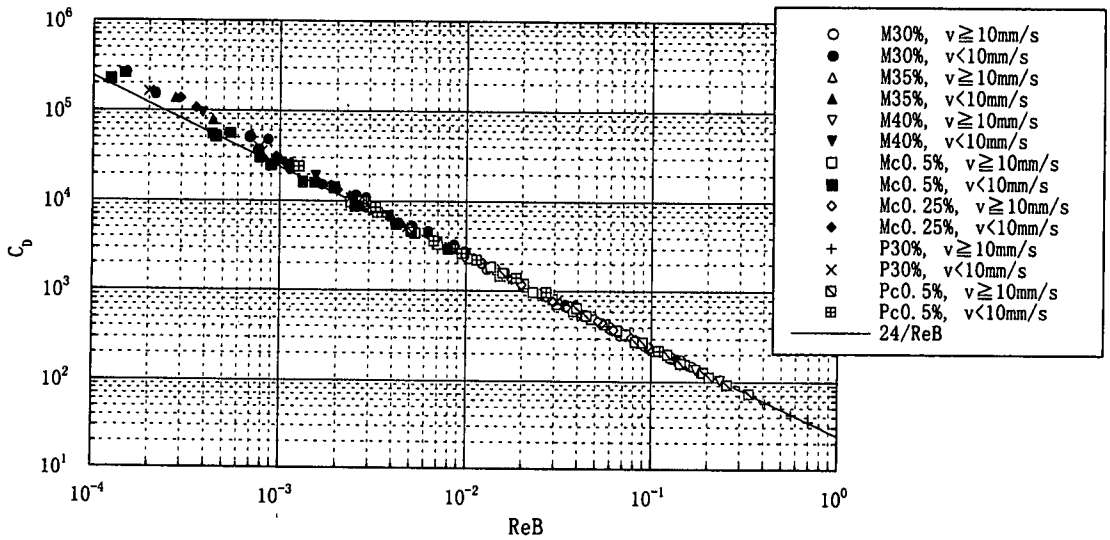


図-22 全ての試験データに関する  $Re_B$  と抗力係数  $C_D$  との関係

値と塑性粘度とを用いて求められる、全ての試験ケースに関する  $Re_B$  と、式(1)から求められる抗力係数  $C_D$  との関係を示したものである。  $C_D$  が  $10^4$  以下であれば、引上げ速度が 10mm/s 未満であっても  $C_D$  は  $24/Re_B$  とほぼ一致するが、  $C_D$  が  $10^4$  を越えると、配合系によっては式(1)から求められる  $C_D$  が  $24/Re_B$  と一致しなくなる。そして、引上げ速度が 10mm/s 以上のものは、何れの配合においても  $C_D$  は  $10^4$  未満であり、  $C_D$  と  $24/Re_B$  とは良く一致している。したがって、球の引上げ速度が 10mm/s 以上であれば、何れの試験データにおいても Bingham 流体としての取り扱いが可能であり、 Ansley らの式(6)が適用できるものと判断されるため、本研究では、引上げ速度 10mm/s 以上のデータを用いて降伏値と塑性粘度とを求めるものとする。

### (3) 球引上げ試験結果

#### a) 球引上げ試験データ解析方法の設定

前節での検討結果を踏まえ、球引上げ試験データの解析方法を以下の通り設定する。

##### ① 回帰区間：150~200mm

球の引上げ速度、および抗力の回帰区間は、球の引上げ距離が 150mm~200mm の間とする。引上げ速度  $v$  は、時間と引上げ距離との関係から直線回帰により求める。抗力  $F$  は、回帰区間のデータを平均して求める。データ数 ( $N$ ) はおよそ 40~50 個である。

② 球の引上げ速度：球の引上げ速度が 10mm/s 以上の引上げ速度  $v$  と抗力  $F$  とから、 Ansley らの式(6)を用いて、直線回帰により降伏値  $\tau_y$  と塑性粘度

$\eta_{pl}$  とを求める。

#### b) 球引上げ試験結果

上記解析方法に基づいて求められた球引上げ試験結果を、先に述べたスランプフロー試験結果と併せて表-3 に示している。スランプフロー値が 600mm 以下の試験ケースの中には、引上げ速度  $v$  と抗力  $F$  との相関係数  $R$  が多少低いものも含まれているが、スランプフロー値が 600mm 以上であれば、その値は全て 0.98 以上であり、引上げ速度  $v$  と抗力  $F$  との間には高い相関のあることが認められる。

なお、全ての試験ケースにおいて、球引上げ試験は試験開始後 35 分以内 (混練完了後 50 分以内) に完了している。

## 5. 考察

球引上げ試験の開始時および終了直後に実施されたスランプフロー試験から得られたスランプフロー値ならびにフロー到達時間と、球引上げ試験から得られたレオロジー定数との関係について考察する。

#### (1) スランプフロー値と降伏値との関係

球引上げ試験の開始時および終了直後のスランプフロー値  $S_f$  と、球引上げ試験から得られた降伏値  $\tau_y$  との関係を図-23 に示す。配合系が異なっても、また、モルタルとセメントペーストとの違いに拘わらず、スランプフロー値と降伏値との間には高い相関関係が認められる。

さらに、実験値は、図-24 に示すように、スラン

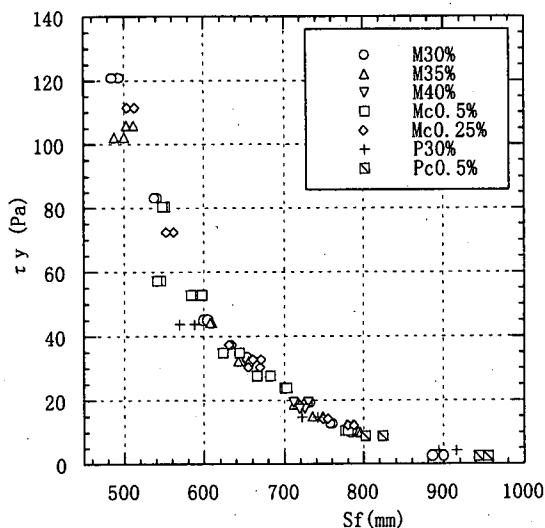


図-23 スランプフロー値  $S_f$  と降伏値  $\tau_y$  との関係

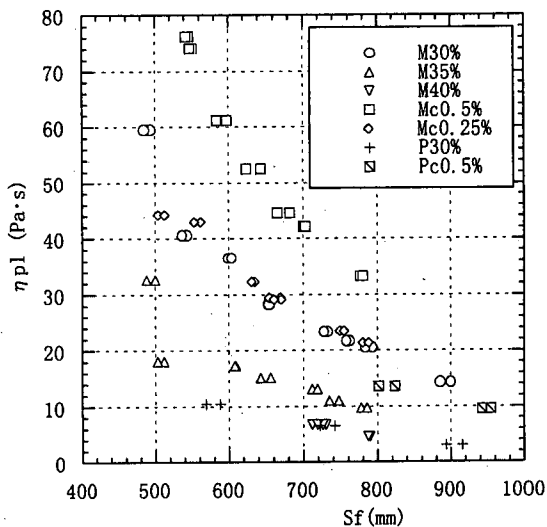


図-25 スランプフロー値  $S_f$  と塑性粘度  $\eta_{pl}$  との関係

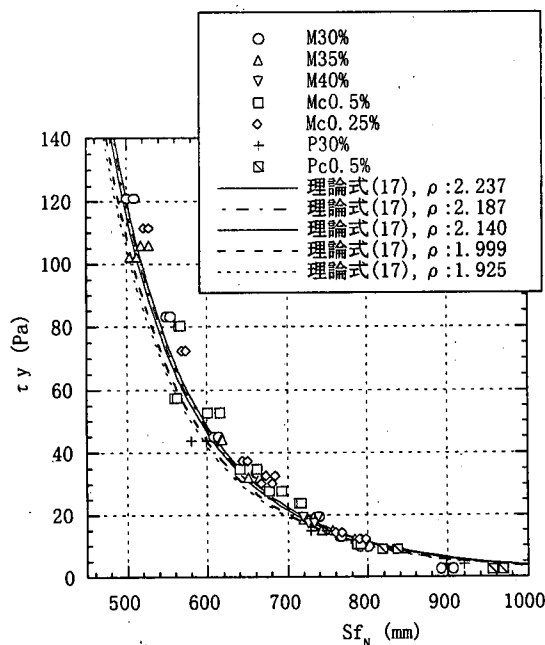


図-24 正規化されたスランプフロー値  $S_{fN}$  と降伏値  $\tau_y$  との関係

プフロー値と降伏値との関係を表わす理論式<sup>12)</sup>(17)と良く一致している。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho g V^2}{4\pi^2 S_f^5} \quad (17)$$

ここに、 $\tau_y$  : 降伏値 (Pa),  $S_f$  : スランプフロー値 (mm),  $\rho$  : 単位容積質量 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ ),  $g$  : 重力加速度 ( $\text{mm}/\text{s}^2$ ),  $V$  : 試験体容積 ( $\text{mm}^3$ ) .

なお、図-24 では、実験値と理論式(17)とを比較するため、横軸は、スランプフロー値  $S_f$  と試験体容

積  $V$  とから求められる正規化されたスランプフロー値<sup>12)</sup>  $S_{fN}$  で表わしている。

$$S_{fN} = \left( \frac{V_N}{V} \right)^{\frac{2}{5}} \times S_f \quad (18)$$

ここに、 $S_{fN}$  : 正規化されたスランプフロー値 (mm),  $V_N$  : スランプコーンの容積 ( $1.75\pi \times 10^6 \text{ mm}^3$ ) ;

また、理論式(17)から正規化されたスランプフロー値  $S_{fN}$  と降伏値  $\tau_y$  との関係を求める際には、単位容積質量  $\rho$  は、表-2 に示される配合表から算定される値を用いる。すなわち、モルタルの単位容積質量  $\rho$  は、水結合材比 (W/B) が 35% の M35%, Mc0.5%, および Mc0.25% を  $2.187 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$ , 水結合材比 (W/B) が 30% の M30% を  $2.237 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$ , 水結合材比 (W/B) が 40% の M40% を  $2.140 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$  とする。また、セメントペーストの単位容積質量  $\rho$  は、水結合材比 (W/B) が 35% の P30% を  $1.999 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$ , 水結合材比 (W/B) が 35% の Pc0.5% を  $1.925 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$  とする。

## (2) スランプフロー値と塑性粘度との関係

球引上げ試験の開始時および終了直後のスランプフロー値  $S_f$  と、球引上げ試験から求められた塑性粘度  $\eta_{pl}$  との関係を、図-25 に示す。

水結合材比がそれぞれ 30%, 35%, 40% の粉体系のモルタル M30%, M35%, M40% を比較すると、水結合材比が小さくなるに従い塑性粘度が高くなることが判る。

また、水結合材比を 35% で一定とした増粘剤系では、増粘剤を添加すると当然のことながら塑性粘度

は高くなり、増粘剤を水量の 0.25%添加したモルタル Mc0.25%は水結合材比が 30%の M30%とほぼ同等の塑性粘度となっており、増粘剤の添加量が水量の 0.5%である Mc0.5%はさらに粘性が高くなっている。

同じ水結合材比、あるいは増粘剤添加率でモルタルとセメントペーストとを比較すると、セメントペーストの方が塑性粘度は低くなる。

さらに、何れの配合においても、高性能 AE 減水剤添加量の増大に伴ってスランプフロー値が大きくなるに従い、塑性粘度は低下していく。そして、スランプフロー値と塑性粘度との間には、それぞれの配合に固有の関係のあることが認められる。

### (3) 塑性粘度とフロー半径 250mm 到達時間との関係

高流動コンクリートの粘性や材料分離抵抗性の評価指標の一つとして、スランプフロー試験における流動中のコンクリートの直径が 500mm に到達する時間 (=500mm フロー到達時間<sup>1)</sup>) が用いられているが、到達時間とレオロジー定数との関係は未だ十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、フロー半径が 250mm に到達する時間 (=フロー半径 250mm 到達時間) に着目して、フロー半径 250mm 到達時間と球引上げ試験から得られた塑性粘度  $\eta_{pl}$  との関係について考察する。なお、今回の実験では、流動中の試料の直径ではなく半径を測定しているが、スランプフロー試験における軸対称流れを対象としており、図-3 が示すように、流動後静止した状態におけるフロー半径 (=静止後のフロー半径) はスランプフロー値のほぼ 1/2 であることが確認されていることから、フロー半径 250mm 到達時間と 500mm フロー到達時間とは同価なものとして取り扱うことができる。

図-26 は、塑性粘度  $\eta_{pl}$  がほぼ同等の Mc0.5%-5 ( $Sfs=666\text{mm}$ ,  $Sfe=683\text{mm}$ ,  $\eta_{pl}=45\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) および Mc0.25%-1 ( $Sfs=504\text{mm}$ ,  $Sfe=513\text{mm}$ ,  $\eta_{pl}=44\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) の、フロー半径と到達時間との関係を表わす。フロー半径が 200 から 210mm 程度までは到達時間はほぼ等しいものの、それよりも大きなフロー半径になるに従い、スランプフロー値が 600mm 未満の Mc0.25%-1 の方の到達時間が増大していき、到達時間が 25 秒から 30 秒の間で、試料は流動を停止する。同様に、図-27 は、Mc0.5%-6 ( $Sfs=701\text{mm}$ ,  $Sfe=703\text{mm}$ ,  $\eta_{pl}=42\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) および Mc0.25%-2 ( $Sfs=562\text{mm}$ ,  $Sfe=553\text{mm}$ ,  $\eta_{pl}=43\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) の、フロー半径と到達時間との関係を表わす。この二つの試験ケースでは、フロー半径が 230mm までは到達時間にほとんど差異はない。しかし、それ以降、徐々に到達時間に差

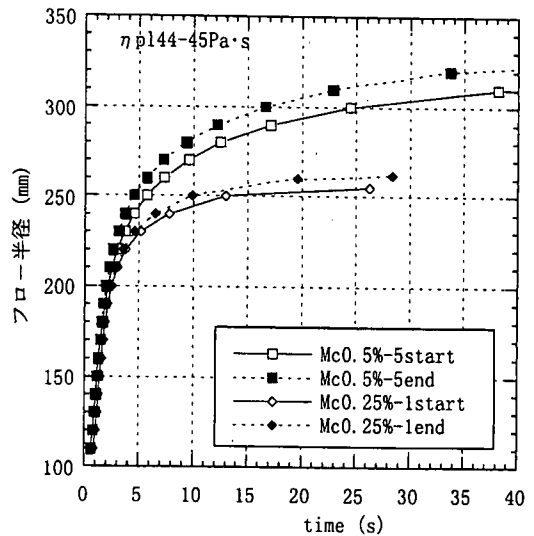


図-26 フロー半径と到達時間との関係 (Mc0.5%-5, Mc0.25%-1)

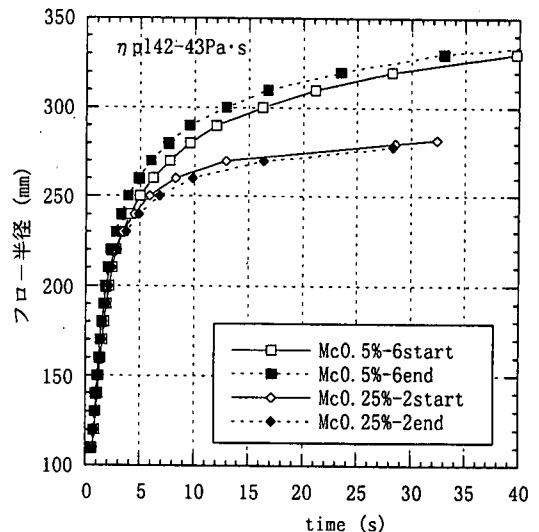


図-27 フロー半径と到達時間との関係 (Mc0.5%-6, Mc0.25%-2)

異が生じていく。フロー半径が 250mm の時点では、まだその差は小さいものの、フロー半径 260mm で比較すると、到達時間に 2 倍近くの差が生ずるようになる。

先に示した、スランプフロー値がほぼ同等の測定結果を比較した図-5 (M30%-4 ( $\eta_{pl}=28\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), M35%-4 ( $\eta_{pl}=15\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), Mc0.5%-4 ( $\eta_{pl}=53\text{Pa}\cdot\text{s}$ )), ならびに図-6 (M30%-7 ( $\eta_{pl}=21\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), M40%-3 ( $\eta_{pl}=4.7\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), Mc0.5%-7 ( $\eta_{pl}=33\text{Pa}\cdot\text{s}$ )) では、流動初期の段階からフロー速度に差が見られ、塑性粘度がほぼ同等の測定結果を比較した図-26 や図-27

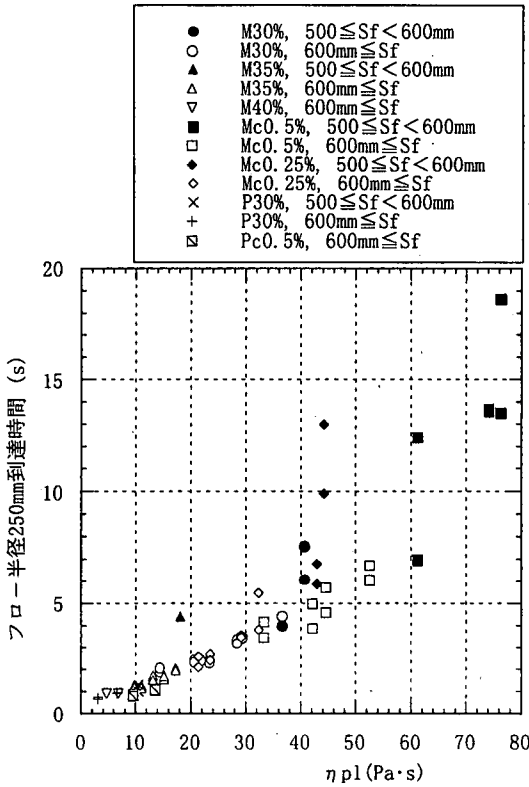


図-28 塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 250mm 到達時間との関係

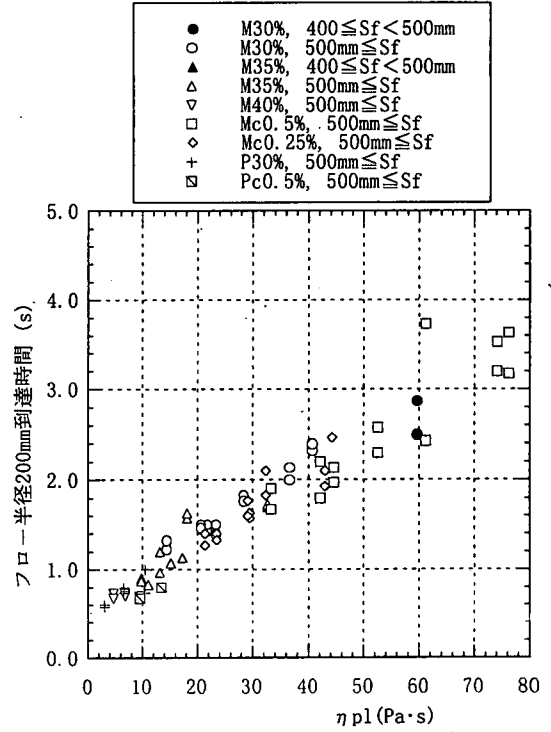


図-29 塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 200mm 到達時間との関係

とは異なる傾向にある。

図-28 は、塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 250mm 到達時間との関係を、スランプフロー値が 600mm 以上のものと 600mm 未満のものに区分してプロットしたものである。スランプフロー値が 600mm 以上の場合には、塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 250mm 到達時間との間に高い相関関係が認められる。しかし、スランプフロー値が 600mm 未満の場合には、スランプフロー値が 600mm 以上の場合に認められる塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 250mm 到達時間との関係から外れ、Mc0.25%-1 や Mc0.25%-2 のように、フロー半径 250mm 到達時間が増大するケースが数多く見られる。

これは、スランプフロー値が 600mm 以上の場合には、フロー半径が 250mm に到達する時点では試料全体がまだ高い流動速度を保持しているに対し、スランプフロー値が 600mm 未満の場合には、フロー半径が 250mm に到達する時点で既に降伏値の影響を受け、試料の内、流動を停止している部分が存在するケースが多いものと考えられる。その結果として、スランプフロー値が 600mm 未満の場合、スランプフロー半径 250mm の到達時間が塑性粘度の

関数として表われてこないケースが多いものと推論される。

したがって、低せん断速度領域を除き Bingham 流体としての流動特性を示す高流動モルタルの塑性粘度は、スランプフロー値が 600mm 以上の場合、500mm フロー到達時間によって評価することができる。ただし、スランプフロー値が 600mm 未満の場合には、500mm フロー到達時間によって塑性粘度を評価することは、塑性粘度を過大に評価する危険性が高いため、避けるべきである。

#### (4) 塑性粘度とフロー半径 200mm 到達時間との関係

塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 200mm 到達時間との関係を図-29 に示す。図-29 が示すように、塑性粘度  $\eta_{pl}$  とフロー半径 200mm 到達時間との間には、すべてのケースにおいて良い相関が認められる。なお、今回実施した試験では、スランプフロー値の最小値は 484mm である。したがって、スランプフロー値が少なくとも 500mm 以上であれば、400mm フロー到達時間によって塑性粘度を評価することができる。ただし、スランプコーンを引上げてからの到達時間が短く、スランプコーンの引上げ速度等の

影響を受け易いことを考慮しておく必要がある。

#### (5) コンクリートへの適用性について

今回の試験では、球引上げ試験装置の大型化を避けるため、骨材として細骨材のみを使用するモルタル、および骨材を含まないセメントペーストで試験を実施している。粗骨材を含む高流動コンクリートの場合でも、Bingham 流体としての流動特性を示すのであれば、フロー到達時間によって塑性粘度を評価することが可能であると考えられる。

ただし、フロー到達時間には、塑性粘度だけでなく単位容積質量も影響を与えることから、重量骨材や軽量骨材を用いる場合には、特にその影響を考慮する必要がある。

#### 6. まとめ

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とレオロジー定数との関係を明らかにすることを目的として、高流動モルタルおよびセメントペーストを用いてスランブフロー試験と球引上げ試験とを同時に実施し、試験データの解析を行なった。この結果、以下の結論が得られた。

(1) Bingham 流体を対象とした Valentik らの落球試験結果を用いてデータ解析を行なった結果、抗力係数  $C_D$  が少なくとも  $10^0 \sim 10^3$  の範囲で、Ansley らの式(6)の Bingham 流体への適合性が確認された。

(2) モルタルが 5 種類、セメントペーストが 2 種類の配合を用いて球引上げ試験を実施した結果、球の引上げ速度が  $10 \sim 60 \text{mm/s}$  の範囲で引上げ速度と抗力とはほぼ直線関係にあり、Bingham 流体としての取扱いが可能であることが確認された。したがって、球の引上げ速度が  $10 \sim 60 \text{mm/s}$  の範囲における引上げ速度と抗力とから、Ansley らの式(6)を用いて、直線回帰により降伏値と塑性粘度とが求められる。

ただし、球の引上げ速度が  $10 \text{mm/s}$  未満の領域では、引上げ速度の低下に伴い抗力が増大するケースも見られた。これは、極めてゆっくりとした変形の過程では、骨材、あるいは粉体の粒子同士の接触による摩擦力が卓越するようになり、その境界は、降伏値と塑性粘度双方の影響を受けるものと考えられる。

(3) スランブフロー値が  $600 \text{mm}$  以上の場合には、フロー半径  $250 \text{mm}$  到達時間と塑性粘度  $\eta_{pl}$  との間に高い相関関係が認められた。したがって、Bingham 流体としての流動特性を示す高流動モルタルの塑性

粘度は、スランブフロー値が  $600 \text{mm}$  以上の場合、 $500 \text{mm}$  フロー到達時間によって評価することができる。

(4) さらに、スランブフロー値が  $500 \text{mm}$  以上の場合には、フロー半径  $200 \text{mm}$  到達時間と塑性粘度  $\eta_{pl}$  との間に高い相関関係が認められ、 $400 \text{mm}$  フロー到達時間によって塑性粘度を評価することができる。

(5) したがって、高流動コンクリートが高流動モルタルと同様に Bingham 流体としての流動特性を示すのであれば、スランブフロー値が  $500 \text{mm}$  以上の場合には  $400 \text{mm}$  フロー到達時間によって、また、スランブフロー値が  $600 \text{mm}$  以上の場合には  $500 \text{mm}$  フロー到達時間によって塑性粘度が評価可能であることが示唆される。

(6) スランブフロー値と降伏値との間には高い相関関係が認められ、さらに、スランブフロー値と降伏値との関係を表わす理論式(17)とも良く一致した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998.7.
- 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) 小島朗史，城代高明，中島由貴，小澤敬二：港島トンネル鋼サンドイッチ構造沈埋部の高流動コンクリートの施工，コンクリート工学，Vol.34，No.8，pp.21-28，1996.8.
- 4) 雑喉良介，詫摩賢治：コンクリート充填鋼管構造の利用技術開発，製鉄研究，第 335 号，pp.58-64，1989.
- 5) 山口隆志，三谷 清，福盛省一，高浦孝夫，八記孝夫：超流動コンクリートの嵌合注入方式合成セグメントへの適用，トンネル工学研究論文・報告書，Vol.6，pp.279-284，1996.11.
- 6) 岡村 甫・前川宏一・小沢一雅：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，pp.6-7，1993.9.
- 7) 有馬 勇，金沢克義，佐藤孝一，櫻井重英：二成分系低発熱型高流動コンクリートの実用化研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.63-68，1992.
- 8) 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.
- 9) 森 博嗣，谷川恭雄：フレッシュコンクリートの流動解析技術の現状，コンクリート工学，Vol.32，No.12，pp.30-40，1994.12.
- 10) 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，pp.125，1996.4.



- 11) 小野木重治：化学者のためのレオロジー，化学同人，1982.9.
- 12) 小門 武，細田 尚，宮川豊章，藤井 學：スランブ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.
- 13) 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.
- 14) Reiner, M. : Deformation, Strain and Flow, *H. K. Lewis Co. Ltd.*, pp.275-276, 1960.
- 15) Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G. : The Rheology of Fresh Concrete, *Pitman Advanced Publishing Program*, pp.65-102, 1983.
- 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) 岸谷孝一，岡 成一：フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定，日本建築学会論文報告集，第305号，pp.1-7，1981.
- 18) 吉野 公：流動性コンクリートのワーカビリティー評価に関する研究，名古屋大学博士論文，pp.32-68，1994.
- 19) 湯川秀樹，田村松平：物理学通論・上巻，大明堂，pp.254-255，1955.11.
- 20) Zabrodsky, S.S. : Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds, *The M.I.T.Press*, pp.27, 1966.
- 21) Plessis, M.P. and Ansley, R.W. : Settling Parameter in Solids Pipelining, *Journal of the Pipeline Division, Proceedings of the ASCE*, Vol.93, No.PL 2, pp.1-17, 1967.7.
- 22) White, F.M. : Viscous Fluid Flow, *McGraw-Hill, Inc.*, pp.200-210, 1974.
- 23) Valentik, L. and Whitmore, R.L. : The Terminal Velocity of Spheres in Bingham Plastics, *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol.16, pp.1197-1203, 1965.
- 24) 伊藤四郎：流体力学，科学技術社，pp77-78，1972.5.
- 25) 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.
- 26) 小門 武：高流動化のための材料-粉体材料-，コンクリート工学，Vol.32，No.7，pp.60-63，1994.7.
- 27) スコットブレアー，G.W.：入門レオロジー，岡 小天，東 健彦訳，朝倉書店，pp.50，1970.10.
- 28) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），pp.1，1994.5.
- 29) 日本レオロジー学会：講座・レオロジー，高分子子刊行会，pp.246-247，1992.

(1999. 1. 12 受付)

## STUDY ON A METHOD OF OBTAINING RHEOLOGICAL COEFFICIENTS OF HIGH-FLOW CONCRETE FROM SLUMP FLOW TEST

Takeshi KOKADO and Toyooki MIYAGAWA

To make clear the relationship between flow behavior in the slump flow test and rheological coefficients of high-flow concrete, slump flow tests and sphere drag tests were carried out simultaneously, and then analytical research was made on the test results. As a result of this research, it was ascertained that a high mutual relation exists between reaching time in 250mm radius and plastic viscosity,  $\eta_{pl}$ , if slump flow is at least 600mm. Consequently, plastic viscosity,  $\eta_{pl}$ , can be obtained by reaching time in 500mm flow in the slump flow test, if slump flow is at least 600mm.