

# 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

小門 武<sup>1</sup>・細田 尚<sup>2</sup>・宮川豊章<sup>3</sup>・藤井 學<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 新日本製鐵株式会社 技術開発本部 土木建築技術部 (〒292 千葉県富津市新富)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科 土木工学専攻

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学教授 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表わす方程式を流体の基礎式から誘導するとともに、この方程式から、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。

さらに、スランプフロー試験と球引上げ試験を通して、導いた理論式の妥当性を検証する。

**Key Words** : slump flow, flowability, self-placing concrete, rheology, Bingham plastics, yield value

## 1. はじめに

コンクリート工事における施工の省力化・合理化などを目的として、締固め不要コンクリート<sup>1)</sup>などの流動性に優れた自己充填型のコンクリートが開発され、実用化が進められている。これら高流動コンクリートの流動性を表わす指標として、スランプフロー値が実験室、現場を問わず広く用いられている。

一方、フレッシュコンクリートのレオロジーに関する研究は、高流動コンクリートが開発される以前から行なわれてきた。回転粘度計や球引上げ粘度計などを用いたレオロジー定数測定結果から、フレッシュコンクリートのレオロジー特性はビンガム流体としての流動挙動を示すことが報告されている<sup>2),3)</sup>。さらに、コンクリートのスランプ値をレオロジー定数(降伏値、塑性粘度)と関連付けて表わそうとする試みが理論解析、あるいは数値解析を通して行なわれている<sup>4),5),6)</sup>。しかしながら、高流動コンクリートを対象として、スランプフロー値とレオロジー定数との関係に言及した研究は未だ少ない<sup>7),8)</sup>。

スランプフロー値をレオロジー定数の関数として理論的に表わすことができれば、高流動コンクリートの流動性を表わす指標として用いられているスランプフロー値のレオロジカルな位置付けを明確にすることができる。

本研究は、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理論的に考察するとともに、その結果として得られた理論式の妥当性と有用性を、一連のスランプフロー試験および球引上げ試験によって明らかにしたものである。

## 2. 既往の研究

スランプフロー値とレオロジー定数との関係を解析的に求めた提案式に以下のものがある。なお、比較検討しやすいように筆者が記号、単位系、および単位の統一を図っており、原文とは異なっている。

ここに用いる記号は、 $\tau_y$  : 降伏値 (Pa= $g/mm/s^2$ )、 $S_f$  : スランプフロー値 (mm)、 $\rho$  : 単位容積質量 ( $g/mm^3$ )、 $G$  : 重力加速度 ( $mm/s^2$ )、 $V$  : 試料の容積 ( $mm^3$ )、 $\sigma_b$  : 静止後の底面の垂直応力 (Pa) である。

村田・下山<sup>4)</sup>は、スランプコーン内に薄層を考え、自重によりこの薄層が水平方向に変形することにより薄層内の最大せん断応力が減少し、降伏応力に達した時に静止すると考えの下に、底面でのせん断応力からスランプフロー値と降伏値との関係を、底面における水平抵抗を考慮して求めており、式(1)を提案している。

$$\frac{Sf}{2} = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{7\rho GH}{3\tau_y}} \quad (1)$$

ここに、 $r$ ：スランブコーン上面の半径 (50mm)， $H$ ：スランブコーンの高さ (300mm) である。

試料の容積  $V$  はスランブコーンの容積に等しく、次式で与えられる。

$$V = \frac{7\pi^2 H}{3} \quad (2)$$

式(1)と式(2)から  $\tau_y$  と  $Sf$  との関係は、

$$\tau_y = \frac{\rho GV}{\pi Sf^2} \quad (3)$$

と書き直すことができる。

一方、静止後の底面の垂直応力  $\sigma_b$  は均一に分布していると仮定しているので、

$$\sigma_b = \frac{\rho GV}{\pi \left(\frac{Sf}{2}\right)^2} \quad (4)$$

したがって、式(1)を求めるに当り、底面における水平抵抗を考慮しているということは、降伏条件を

$$\tau_y = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_b}{2} \quad (5)$$

と仮定していることになる。

下山<sup>9)</sup>は、比較的軟練りのモルタルを対象に、静止後の試料の形状は円柱状であり、その垂直端面には、合力が静止後の底面摩擦力 (= 降伏値 × 底面積) に等しい指数分布を持つ水平直応力が作用し、変形後の底面部の応力状態が式(6)の示す降伏条件を満足するとの仮定の下で、式(7)を求めている。

$$\tau_y = \frac{\sigma_b}{2} - \frac{\sigma_{rH_0}}{2} \quad (6)$$

$$\tau_y = \frac{1}{2} \times \frac{\rho GV}{\pi \left(\frac{Sf}{2}\right)^2} - \frac{1}{2} \times \frac{\pi(a+1) \left(\frac{Sf}{2}\right)^3}{2V} \tau_y \quad (7)$$

ここに、 $\sigma_{rH_0}$ ：静止後の端面底部の水平直応力 (Pa)， $a$ ：試料の端面に加わると仮定された水平直応力分布を与えるための定数である。

式(7)を書き直すと、降伏値とスランブフロー値との関係は式(8)で表わすことができる。

$$\tau_y = \frac{64\rho GV^2}{32\pi V Sf^2 + \pi^2(a+1)Sf^5} \quad (8)$$

水平直応力がどのような指数分布になるかは、順次計算して実測値に合う分布を仮定する必要があるが、モルタル用のフローコーン (JIS R 5201) を用いたケースでは、4次式と仮定した場合に実測値とほ

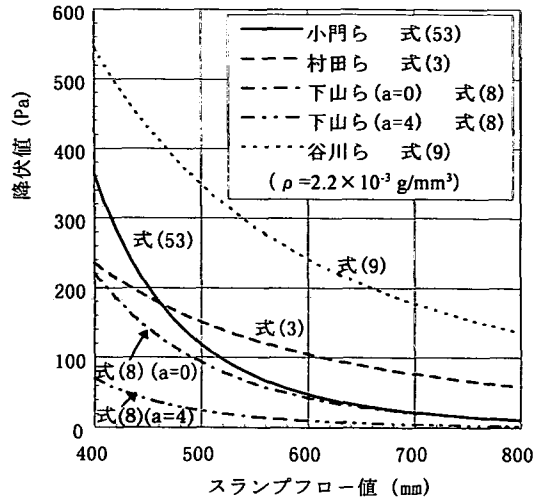


図-1 スランブフロー値と降伏値との関係を与える提案式の比較

ぼ一致し<sup>9)</sup>、また、フロー値が 200mm 以上の高流動域では 0 次式、すなわち水平直応力分布は一定値になる<sup>8)</sup>と報告している。

谷川らは、スランブ試験でコンクリートが停止した状態では底面での偏差応力テンソルの 2 次不変量の平方根  $\sqrt{\sigma_b J_2}$  は降伏値に等しくなる<sup>10)</sup>ことから、静止後の底面の垂直応力  $\sigma_b$  が均等に分布していると仮定した場合の降伏値とスランブフロー値との関係式(9)を求めている<sup>11)</sup>。

$$\tau_y = \sqrt{\sigma_b J_2} = \frac{\sigma_b}{\sqrt{3}} = \frac{\rho GV}{\sqrt{3}\pi \left(\frac{Sf}{2}\right)^2} = \frac{4\rho GV}{\sqrt{3}\pi Sf^2} \quad (9)$$

コンクリートのスランブフロー値と降伏値との関係を表わす提案式、(3)、(8)、(9)の各式を導くにあたり、静止後の底面のせん断応力は降伏値に等しく、また、静止後の底面の垂直応力  $\sigma_b$  は均一に分布している、すなわち、静止後の上面は底面と平行であるとするところは共通している。また、3式とも、降伏値はコンクリートの単位容積質量、試験体の容積、スランブフロー値の関数として表わされる点で一致している。

しかしながら、スランブフロー値と降伏値との関係は、図-1 が示すように、各提案式によりかなり異なる結果となっている。これは、(3)、(8)、(9)それぞれの提案式を導くにあたり、異なる降伏条件、すなわち、式(3)では式(5)を、式(8)では式(6)を、式(9)では  $\tau_y = \sigma_b / \sqrt{3}$  を用いているからである。

### 3. 理論的考察

高流動コンクリートを対象として、平板上で、円錐台状のコーンを用いたスランブフロー試験におけるコンクリートの流動挙動を表わす方程式を、流体の基礎式から誘導するとともに、この方程式から、スランブフロー値と降伏値との関係を表わす理論式を導く。

#### (1) 基礎式

流体の運動は一般に、連続の式と運動方程式によって表わされる。円柱座標系  $(r, \theta, z)$  で、非圧縮性流体の連続の式と運動方程式 ( $r$  成分) とを表わすと次のようになる。

$$\text{連続の式; } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

運動方程式; ( $r$  成分)

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} \right) + g_r \quad (11)$$

ここに、 $v_r, v_\theta, v_z$ : 速度成分,  $\tau_{ij}$ : 応力成分,  $\rho$ : 密度 (単位容積質量),  $p$ : 圧力,  $g_r$ : 外力,  $t$ : 時間, である。

なお、運動方程式(11)中の左辺は慣性項を表わし、右辺第1項は圧力項、第2項は粘性項、第3項は外力項を表わす。

したがって、コーンを引き上げてから静止するまでの、コンクリート試料の任意の点での流動は式(10)、(11)を満足する。

#### (2) 連続の式の積分

連続の式(10)を、底面から流動中の試料表面の高さ  $h$  まで積分する。

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) dz + \int_0^h \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} dz + \int_0^h r \frac{\partial v_z}{\partial z} dz = 0 \quad (12)$$

Leibnitz の規則 (Leibnitz's rule)<sup>12)</sup> を用い、底面は水平であることを考慮すれば、式(12)は式(13)で表わすことができる。

$$\frac{\partial}{\partial r} r \int_0^h v_r dz - rv_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^h v_\theta dz - v_{\theta_s} \frac{\partial h}{\partial \theta} + rv_{z_s} - rv_{z_b} = 0 \quad (13)$$

ここで、速度成分に付けた添字  $s, b$  はそれぞれ表面 (surface), および底面 (bottom) を表わす。

底面から表面までの  $r$  方向, および  $\theta$  方向成分の平均流速をそれぞれ  $u_r, u_\theta$  とすれば、

$$u_r = \frac{1}{h} \int_0^h v_r dz \quad (14)$$

$$u_\theta = \frac{1}{h} \int_0^h v_\theta dz \quad (15)$$

また、自由表面の条件<sup>13)</sup>から、

$$v_{z_s} = \frac{\partial h}{\partial t} + v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{v_{\theta_s}}{r} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (16)$$

式(14)、(15)、(16)を用いて式(13)を整理すると、

$$r \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r h) + \frac{\partial}{\partial \theta}(u_\theta h) - rv_{z_b} = 0 \quad (17)$$

さらに、スランブフロー試験におけるコンクリートの流動 (拡がり) を対象とすることから、原点を中心として放射線状に拡がる軸対称流れであること、また、底面 (平板) からのコンクリートの流出入はないことから、次の各式が成り立つ。

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad (18)$$

$$v_{z_b} = 0 \quad (19)$$

したがって、底面から流動中の試料表面の高さ  $h$  まで積分した連続の式は式(20)となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r h) = 0 \quad (20)$$

#### (3) 運動方程式の積分

##### a) 慣性項

運動方程式(11)中の慣性項を、連続の式(10)を用いて整理すると、式(21)となる。

$$\text{慣性項} = \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(v_r v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(v_r v_z) - \frac{v_\theta^2}{r} \quad (21)$$

慣性項を、底面から流動中の試料表面の高さ  $h$  まで積分する。

$$\int_0^h (\text{慣性項}) dz = \int_0^h \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(v_r v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(v_r v_z) - \frac{v_\theta^2}{r} \right) dz \quad (22)$$

連続の式と同様に、Leibnitz の規則, および式(14)、(16)、(18)、(19)を用いて計算すると式(23)となる。

$$\int_0^h (\text{慣性項}) dz = \frac{\partial}{\partial t}(u_r h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \int_0^h v_r^2 dz \quad (23)$$

ここで、運動量係数<sup>14)</sup>  $\beta$  を用いた式(24)

$$\frac{1}{h} \int_0^h v_r^2 dz = \beta u_r^2 \quad (24)$$

を代入すれば、式(23)は式(25)となる。

$$\int_0^h (\text{慣性項}) dz = \frac{\partial}{\partial t}(u_r h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\beta u_r^2 h) \quad (25)$$

b) 圧力項

次に、圧力項を高さ方向に積分する。

$$\int_0^h (\text{圧力項}) dz = -\frac{1}{\rho} \int_0^h \frac{\partial p}{\partial r} dz \quad (26)$$

Leibnitz の規則により、

$$\int_0^h (\text{圧力項}) dz = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h p dz + \frac{1}{\rho} p_s \frac{\partial h}{\partial r} \quad (27)$$

底面からの高さ  $z$  における圧力  $p$  を静圧分布と仮定すれば、

$$p = \rho G(h - z) \quad (28)$$

また、試料表面では、

$$p_s = 0 \quad (29)$$

であることから、底面から流動中の試料表面の高さ  $h$  まで積分した圧力項は式(30)となる。

$$\int_0^h (\text{圧力項}) dz = -Gh \frac{\partial h}{\partial r} \quad (30)$$

c) 粘性項

同様に、粘性項を高さ方向に積分する。

$$\begin{aligned} & \int_0^h (\text{粘性項}) dz \\ &= \frac{1}{\rho} \int_0^h \left( \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\tau_{rr}}{r} \right) dz \quad (31) \end{aligned}$$

Leibnitz の規則を用いて計算すると、

$$\begin{aligned} \int_0^h (\text{粘性項}) dz &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h \tau_{rr} dz - \frac{1}{\rho} \tau_{rr_s} \frac{\partial h}{\partial r} \\ &+ \frac{1}{\rho r} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^h \tau_{\theta r} dz - \frac{1}{\rho r} \tau_{\theta r_s} \frac{\partial h}{\partial \theta} \\ &+ \frac{\tau_{zr_s}}{\rho} - \frac{\tau_{z\theta_s}}{\rho} - \frac{1}{\rho r} \int_0^h \tau_{\theta\theta} dz + \frac{1}{\rho r} \int_0^h \tau_{rr} dz \quad (32) \end{aligned}$$

表面には応力が働かない、即ち、表面に作用する応力ベクトルは0であるから、

$$\tau_{zr_s} - \tau_{rr_s} \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{1}{r} \tau_{\theta r_s} \frac{\partial h}{\partial \theta} = 0 \quad (33)$$

となる。また、式(18)から、

$$\frac{1}{\rho r} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^h \tau_{\theta r} dz = 0 \quad (34)$$

さらに、底面が水平であることから、底面に作用する応力ベクトルの  $r$  方向成分を  $\tau_{br}$  とすると、

$$\tau_{br} = \tau_{zr_s} \quad (35)$$

よって、

$$\begin{aligned} \int_0^h (\text{粘性項}) dz &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h \tau_{rr} dz - \frac{1}{\rho r} \int_0^h \tau_{\theta\theta} dz \\ &+ \frac{1}{\rho r} \int_0^h \tau_{rr} dz - \frac{\tau_{br}}{\rho} \quad (36) \end{aligned}$$

垂直応力成分  $\tau_{rr}$  と  $\tau_{\theta\theta}$  は、非圧縮性流体の場合、式(37)、(38)で表わされる。

$$\tau_{rr} = 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} \quad (37)$$

$$\tau_{\theta\theta} = 2\eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) \quad (38)$$

ここに、 $\eta$  : 粘度である。

式(37)、(38)を式(36)に代入すると、

$$\begin{aligned} \int_0^h (\text{粘性項}) dz &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} dz \\ &- \frac{1}{\rho r} \int_0^h 2\eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) dz + \frac{1}{\rho r} \int_0^h 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r} dz - \frac{\tau_{br}}{\rho} \quad (39) \end{aligned}$$

フレッシュコンクリートがビンガム流体としての流動挙動を示す場合、粘度は定数となり、塑性粘度で表わされる。塑性粘度を  $\eta_{pl}$  として、式(14)、(18)、および Leibnitz の規則を用いて計算すると、式(39)は式(40)となる。

$$\begin{aligned} \int_0^h (\text{粘性項}) dz &= \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (u_r h) - \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \\ &- \frac{2\eta_{pl}}{\rho r^2} u_r h + \frac{2\eta_{pl}}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} (u_r h) - \frac{2\eta_{pl}}{\rho r} v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{\tau_{br}}{\rho} \quad (40) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} & - \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - \frac{2\eta_{pl}}{\rho r} v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} \\ &= - \frac{2\eta_{pl}}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad (41) \end{aligned}$$

$$- \frac{2\eta_{pl}}{\rho r^2} u_r h + \frac{2\eta_{pl}}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} (u_r h) = \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_r h}{r} \right) \quad (42)$$

と整理する。したがって、底面から流動中の試料表面の高さ  $h$  まで積分した粘性項は式(43)で表わすことができる。

$$\begin{aligned} \int_0^h (\text{粘性項}) dz &= \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (u_r h) + \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_r h}{r} \right) \\ &- \frac{2\eta_{pl}}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - \frac{\tau_{br}}{\rho} \quad (43) \end{aligned}$$

d) 高さ方向に積分した運動方程式

スランプフロー試験では、コーンを引き上げてからはコンクリートには外力は作用しないため、外力項は0である。したがって、底面から流動中の試料表面の高さ  $h$  まで積分した運動方程式は式(44)で表わすことができる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (u_r h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \beta u_r^2 h) = -Gh \frac{\partial h}{\partial r} \\ & + \frac{2\eta_{pl}}{\rho} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} (u_r h) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_r h}{r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r v_{r_s} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \right) \end{aligned}$$

$$-\frac{\tau_b}{\rho} \quad (44)$$

#### (4) 理論式の提案

コンクリートが流動後静止した状態に着目すると、

$$u_r = 0 \quad (45)$$

$$v_r = 0 \quad (46)$$

また、静止後の底面のせん断応力は降伏値  $\tau_y$  に等しいと考えられるので、

$$\tau_b = \tau_y \quad (47)$$

したがって、高さ方向に積分した運動方程式(44)中の慣性項と、粘性項の一部とは0となり、スランプフロー試験でコンクリートが流動後静止した状態では、式(48)が成り立つ。

$$-Gh \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (48)$$

式(48)を積分し、境界条件

$$r=L; h=0 \quad (49)$$

ここに、 $L$ ：試験体の中心から端部までの距離。

を与えると、スランプフロー試験でコンクリートが流動後静止した状態における試験体の高さ分布を表わす理論式(50)が導かれる。

$$\frac{h^2}{2} = (L-r) \frac{\tau_y}{\rho G} \quad (50)$$

式(50)は、スランプフロー試験における試験体の高さ分布は放物線を描くことを示す(図-2)

また、試験体中央部( $r=0$ )の高さを  $h_0$  とすると式(51)が導かれ、コンクリートの降伏値は  $L$  と  $h_0$  とによって与えられることになる。

$$\tau_y = \frac{\rho G h_0^2}{2L} \quad (51)$$

さらに、式(50)、(51)を用いると、試験体の容積  $V$  は式(52)で表わされる。

$$V = \int_0^{h_0} \pi r^2 dh = \frac{8\pi L^2 h_0}{15} \quad (52)$$

したがって、式(51)と式(52)とから、コンクリートの降伏値  $\tau_y$  は、スランプフロー値  $Sf (=2L)$  の関数として、式(53)によって表わされることになる。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho G V^2}{4\pi^2 Sf^5} \quad (53)$$

## 4. 実験条件

### (1) 実験概要

コンクリートのスランプフロー値と降伏値との関

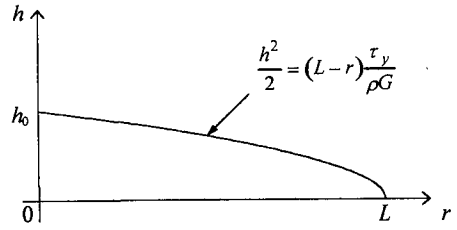


図-2 理論式(50)より導かれる試験体の高さ分布

係を表わす理論式(53)の適合性を評価するために、スランプフロー値とレオロジー定数の測定を同時に実施した。

レオロジー定数の測定には、比較的軟らかい試料の測定に適した球引上げ粘度計<sup>15)</sup>を用いた。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倍以上必要とされている<sup>16)</sup>ことから、装置の大型化を避けるために、骨材として細骨材のみを使用するモルタルで実験を行なった。

### (2) 使用材料と配合

使用材料の一覧を表-1に示す。結合材は、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の割合で使用した<sup>17)</sup>。細骨材は相馬砂(シリカサンド)3号、4号、6号を等量混合したものを用いている。細骨材-結合材比(S/C)は、各種高流動コンクリートの配合例<sup>18)</sup>を参考にして、1.50で一定とした。

配合は、水-結合材比(W/C)が35%および40%の粉体系と、水-結合材比が35%で増粘剤を水量の0.25%添加した増粘系の計3種類である。流動性はそれぞれの配合において、高性能AE減水剤(SP)の添加量を変化させて調整した。表-2はこれらの配合表を示す。なお、モルタルの混練には2軸ミキサ(容量50l、回転数62rpm)を使用し、結合材と細骨材を投入後空練り15秒、その後、水と高性能AE減水剤を投入して2分間混練する方法を採用した。

図-3は、それぞれの配合でSP添加量( $\text{kg/m}^3$ )が10.06(粉体系35%)、7.44(粉体系40%)、および11.61(増粘系35%)の場合のスランプフロー値の経時変化を示している。この図から、何れの配合においても、練上がり後15分位からスランプフロー値は安定し始め、その後45分までの30分間はスランプフロー値の変化はほとんど見られない。

### (3) スランプフロー試験

#### a) 試験方法

JIS A 1101に規定されたスランプコーンと、水平に

表-1 使用材料

結合材	普通ポルトランドセメント (OPC) 密度: $3.16 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ アレン比表面積: $3,270 \text{ cm}^2/\text{g}$ 高炉スラグ微粉末 (BFS) $\text{SO}_3$ : 2.0% 密度: $2.89 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ アレン比表面積: $6,020 \text{ cm}^2/\text{g}$
細骨材	相馬砂 (S) 3号:4号:6号=1:1:1 密度: $2.60 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ , F.M.: 2.47
増粘剤	セルロースエーテル系 (MC)
高性能AE減水剤	[粉体系] ナフタレンスルホン酸系 (SP1) [増粘系] ポリカルボン酸系 (SP2)

表-2 配合表

配合No.	W/C (%)	S/C	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP
				W	OPC	BFS	S	MC	
粉体系 35%	1								6.966
	2								7.740
	3	35			271	232	542	1161	8.514
	4								10.062
	5								11.610
粉体系 40%	1								2.232
	2								3.720
	3	40	1.5	2.15	298	223	521	1116	5.952
	4								7.440
	5								8.184
増粘系 35%	1							0.678	7.740
	2	35			271	232	542	1161	11.610
	3								15.480
	4								19.350

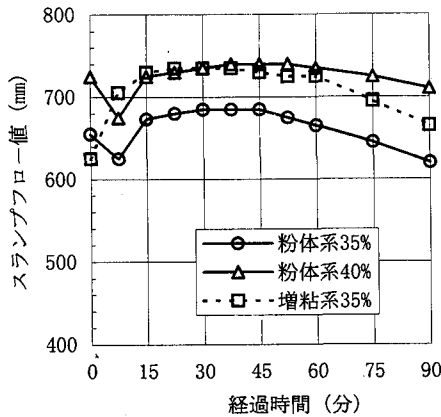


図-3 スランプフロー値の経時変化

設置された長さ1,000mm, 幅1,000mmの鋼製の平板とにより, JSCE-F503 に準拠してスランプフロー試験を行なった。ただし, スランプコーン内に試料を詰める際, 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。

また, コーンを引き上げた後コーンの内面に付着したモルタルが試験体上に滴り落ちるのを防ぐため

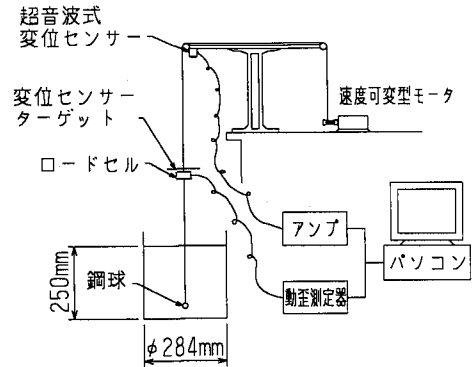


図-4 球引上げ粘度計

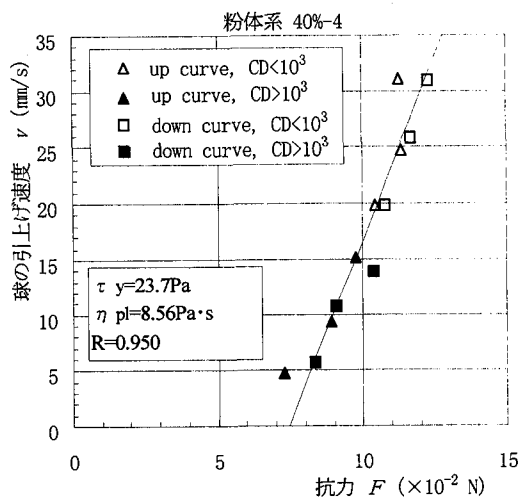


図-5 球引上げ試験結果の一例

に, コーンを引き上げた後滴り落ちる試料は皿で受けた。

スランプフロー値は mm の単位まで測定した。また, スランプフロー値を測定したラインに沿って 20mm ピッチで試験体の高さ分布 ( $r, h$ ) を測定した。さらに, 試験体の重量を測定して試験体の容積を求めた。

事前に行なったスランプフロー値の経時変化測定結果 (図-3) から, 試験の開始は, 練上がり後試料が安定し始める 15分後とした。

#### b) データ解析方法

スランプフロー値と試験体容積とを理論式 (53) に代入して, 降伏値  $\tau_{yF}$  を求めた。また, 試験体の高さ分布 ( $r, h$ ) の測定値から, 試験体の高さ分布は放物線によって与えられるとの式 (50) の理論解析結果に基づき,  $L$  と  $\tau_y$  とをフィットパラメータとして

表-3 実験結果一覧表

配合 No.	スランブフロー試験					高さ分布の回帰分析				球引上げ試験
	スランブフロー値 $S_f$ (mm)	試験体中央 部高さ $h_0$ (mm)	試験体容積 $V$ ( $\times 10^6 \text{ mm}^3$ )	降伏値 $\tau_y F$ (Pa)	相関係数 $R$	$2L$ (mm)	降伏値 $\tau_y R$ (Pa)	$h_{0R}$ (mm)	降伏値 $\tau_y D$ (Pa)	
粉体系 35%	1	458	51.6	4.775	139.5	0.979	454	132.9	52.8	132.9
	2	468	48.5	4.684	120.5	0.976	464	115.9	49.9	107.5
	3	550	35.3	4.699	54.1	0.979	554	49.5	35.6	55.5
	4	673	27.5	4.866	21.1	0.988	672	22.8	26.6	31.0
	5	835	16.0	4.609	6.5	0.995	840	6.8	16.4	15.1
粉体系 40%	1	425	66.3	5.429	256.5	0.964	430	260.1	71.1	240.4
	2	508	45.1	4.950	87.4	0.983	502	86.9	45.5	88.9
	3	663	26.9	5.031	23.8	0.985	664	22.9	26.8	29.5
	4	730	24.3	5.071	15.0	0.988	728	15.5	23.1	23.7
	5	810	20.6	5.041	8.8	0.993	804	9.9	19.4	12.2
増粘系 35%	1	543	31.0	4.173	45.5	0.983	538	41.5	31.7	55.5
	2	740	18.5	4.404	10.8	0.984	750	10.7	19.3	19.5
	3	823	15.5	4.482	6.6	0.991	822	6.9	16.2	11.4
	4	905	14.0	4.689	4.5	0.991	914	4.6	14.0	4.3

回帰分析を行なった。

#### (4) 球引上げ試験

##### a) 試験方法

モルタル試料のレオロジー定数の測定に用いる球引上げ粘度計の構成を図-4 に示す。鋼球 (JIS B 1501) の直径  $D$  は 19.05mm, 容器の直径は 284mm である。試料は, 容器の底から 250mm の高さまで入れ, 試験は, スランブフロー試験と同様に練上がり後 15 分後から開始し, 20 分以内に完了するようにした。球の引上げは, 容器の底から 50mm の高さから始めた。1 回の測定での引上げ速度は一定とし, 超音波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んだ。球の引上げ距離 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測定頻度を設定した。球の引上げ速度が各々およそ 5mm/s, 10mm/s, 15mm/s, 20mm/s, 25mm/s, 30mm/s となるようにモータの回転速度を予め設定しておき, 5mm/s から始めて 5mm/s ずつ速度を上げて 30mm/s までの測定を行ない, さらに, 30mm/s から 5mm/s ずつ速度を下げて 5mm/s まで測定を行なった。すなわち, 1 つの試料につき計 12 回の測定を 20 分以内に行なった。

各引上げ速度での測定データのうち, 球の引上げを開始してから引上げ距離が 50mm~100mm の間の測定値 (N 数: 約 50) から, 抗力  $F$  と球の引上げ速度  $v$  との関係求めた。

##### b) データ解析方法

Ansley ら<sup>19)</sup>は, ビンガム流体中を一定速度で移動する球に作用する抗力  $F$  と降伏値  $\tau_y$ , 塑性粘度  $\eta_{pl}$  との関係を表わす式(54)を導くとともに, 落球試験の結果から, 式(55)に示す抗力係数  $C_D$  が少なくとも  $10^0 \sim 10^3$  の範囲で式(54)が成り立つことを確認している。

$$F = 3\pi D^2 \left( \eta_{pl} \frac{v}{D} + \frac{7\pi}{24} \tau_y \right) \quad (54)$$

$$C_D = \frac{8F}{\rho v^2 \pi D^2} \quad (55)$$

今回の実験の場合, 抗力係数  $C_D$  は  $10^2 \sim 10^5$  の範囲であり, 球の引上げ速度が遅い領域では抗力係数  $C_D$  が  $10^3$  を越える測定値も含まれる。しかしながら, 図-5 に示すように, 抗力係数  $C_D$  が  $10^3$  を越えても, 抗力  $F$  と球の引上げ速度  $v$  との間には比例関係が保たれることが確認された。したがって, 同一試料につき計 12 個の  $F$  と  $v$  の測定値から, 式(54)に基づき, 最小二乗法により直線回帰して降伏値  $\tau_{yD}$  と塑性粘度  $\eta_{plD}$  とを求めることとした。

#### 5. 実験結果の考察と理論式の評価

スランブフロー試験と球引上げ試験との結果を, 高さ分布の回帰分析結果と併せて, 表-3 に示す。

これらの実験結果を用いて, 理論式の妥当性とその有効性との検討を行なう。

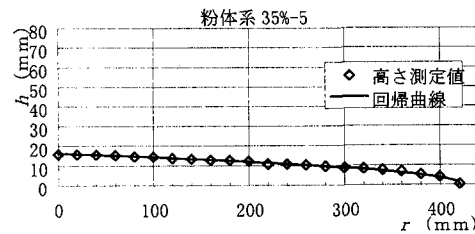
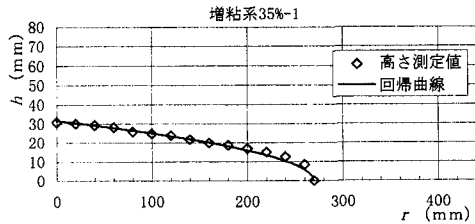
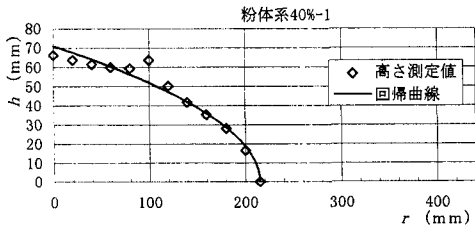


図-6 高さ分布の回帰曲線

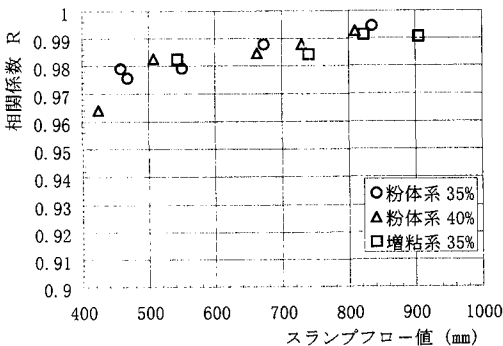


図-7 スランプフロー値と相関係数との関係

(1) 試験体の高さ分布

スランプフロー試験から得られた試験体の高さ分布の回帰曲線の一部を図-6 に示す。スランプフロー値が 425mm である粉体系 40%-1 では、試験体中央部 ( $r=0$ ) から半径 100mm の間で高さ測定値と回帰曲線とが一致しない部分があるが、スランプフロー値が 450mm 以上の試験体であれば、高さ測定値と回帰曲線とはよく一致している。

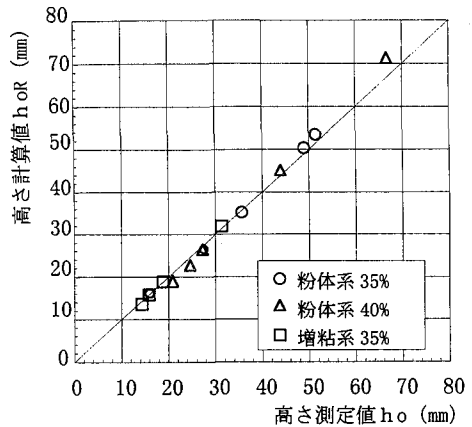


図-8 試験体中央部高さの測定値と計算値との比較

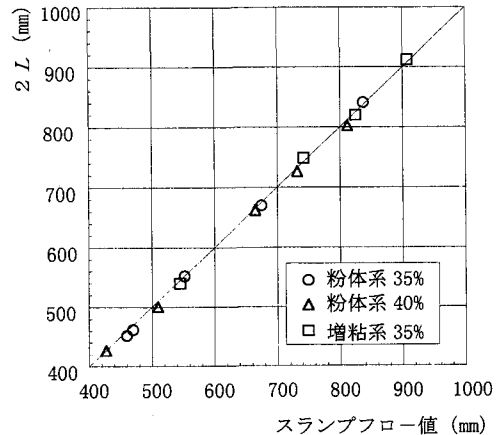


図-9 スランプフロー値と  $2L$  との比較

スランプフロー値と相関係数との関係は、図-7 が示すように、スランプフロー値が 450mm 以上あれば、試験体の高さ分布はかなり高い相関 (相関係数  $R \geq 0.98$ ) を持って放物線で近似できることがわかる。また、試験体中央部の高さ測定値 ( $h_0$ ) と、回帰分析から得られた  $L$  と降伏値  $\tau_{yR}$  とを式(50)に代入して得られる  $r=0$  における試験体高さの計算値 ( $h_{0R}$ ) とは、図-8 が示すように、粉体系 40%-1 のケースを除いてよく一致している。さらに、スランプフロー値と  $2L$  とは、図-9 が示すように、すべてのケースでよく一致している。

したがって、スランプフロー試験における試験体の高さ分布を、理論解析より導かれた式(50)に基づいて回帰分析した結果は、スランプフロー値が 450mm 以上の場合、実測値とよく一致することが検証された。



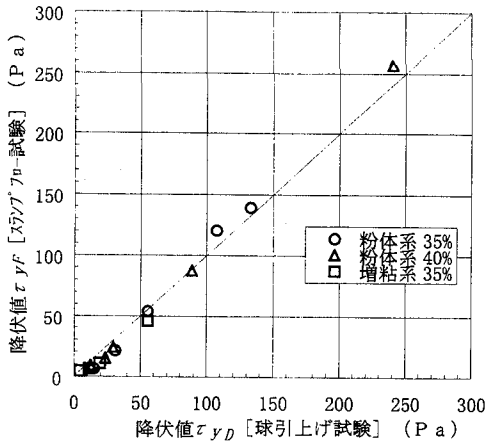


図-10 降伏値測定結果の比較

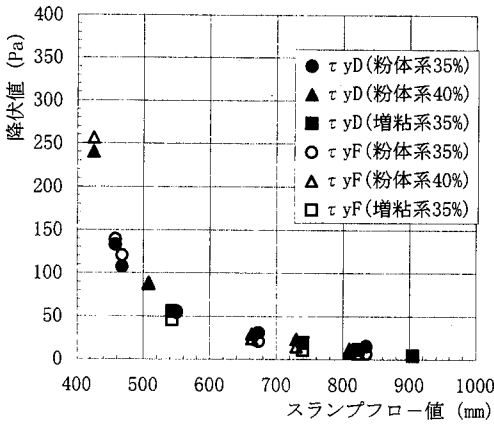


図-11 スランプフロー値と降伏値との関係

### (2) 球引上げ試験結果との比較

スランプフロー値と試験体容積とを用いて理論式(53)から求めた降伏値  $\tau_{yF}$  と、球引上げ試験から求めた降伏値  $\tau_{yD}$  との関係を図-10 に示す。降伏値が 100Pa 以下の領域では  $\tau_{yD}$  は  $\tau_{yF}$  に比し若干大きめの値をとり、一方、100Pa 以上の領域では  $\tau_{yF}$  が  $\tau_{yD}$  に比しやや大きめの値をとる傾向がみられるものの、0 から 250Pa 程度までの広い範囲にわたって  $\tau_{yF}$  と  $\tau_{yD}$  とは実用上十分な精度で一致している。

したがって、スランプフロー試験で得られるスランプフロー値と試験体容積とから、かなり高い精度で降伏値が求められることが示された。

### (3) スランプフロー値の正規化

スランプフロー値と、上で求めた降伏値  $\tau_{yF}$  と

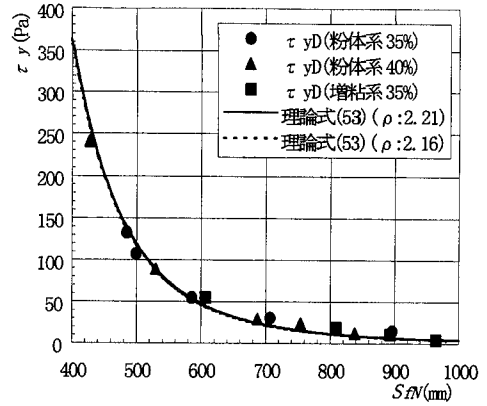


図-12 正規化されたスランプフロー値と降伏値との関係

$\tau_{yD}$  との関係を図-11 に示す。しかしながら、式(53)から求められる降伏値  $\tau_{yF}$  は、スランプフロー値の関数だけでなく、試験体容積の関数ともなっている。今回実施したスランプフロー試験では、試料として粗骨材を含まないモルタルを使用したこともあって、スランプコーンを引き上げた後コーンの内面に付着したモルタルが試験体上に滴り落ちるのを防ぐために、滴り落ちてくる試料は皿で受け止めている。このため、試験体の容積は、表-3 が示すように、コーンに付着したモルタルの分だけスランプコーンの容積よりも小さく、また、試験体の容積はスランプフロー試験毎に多少異なる。そこで、試験体の容積が一定 (=スランプコーンの容積) とした場合のスランプフロー値と降伏値との関係を求めるため、および、その結果を式(3), (8), (9)と比較するために、式(53)を参照して求められる式(56)によりスランプフロー値の正規化を図った。

$$Sf_N = \left( \frac{V_N}{V} \right)^{\frac{2}{3}} \times Sf \quad (56)$$

ここに、 $Sf_N$  : 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 ( $1.75\pi \times 10^6 \text{ mm}^3$ ) である。

正規化されたスランプフロー値  $Sf_N$  と降伏値との関係を図-12 に示す。スランプフロー値を正規化することにより、スランプフロー値と降伏値との関係を理論式(53)により連続的に、また、的確に表わすことができる。

さらに、図-1 が示すように、式(8)において  $a=0$  とした場合、スランプフロー値が 600mm 以上の領域で式(53)とよく一致している。

## 6. まとめ

### (1) 理論式の提案

連続の式と運動方程式から、スランプフロー試験におけるコンクリートの流動挙動を表わす方程式(式(44))を誘導した。そして、コンクリートが流動後静止した状態に着目して、誘導した方程式から、スランプフロー試験における試験体の高さ分布を表わす理論式(式(50))と、スランプフロー値と降伏値との関係を表わす理論式(式(53))を導いた。

### (2) 実験による検証

モルタルによるスランプフロー試験と球引上げ試験を行なった結果、以下のことが検証された。

- a) スランプフロー試験における試験体の高さ分布を理論式(50)に基づいて放物線で回帰した結果は、スランプフロー値が450mm以上の場合、実測値とよく一致する。
- b) 理論式(53)を用いてスランプフロー値から求めた降伏値( $\tau_{yf}$ )と、球引上げ試験から求めた降伏値( $\tau_{yD}$ )とは実用上十分な精度で一致している。

したがって、スランプフロー値のレオロジカルな位置付けと、スランプフロー値から降伏値が容易に求められることが明らかとなった。

### (3) 今後の課題

理論式(50)および式(53)は、ビンガム流体の流動挙動を表わす方程式から導かれており、粗骨材を含まないモルタルに関してその適用性が立証された。粗骨材を含む場合でも、その流動挙動がビンガム流体として取り扱える範囲においては、これらの理論式が適用可能であると推察されるが、その検証については今後の課題としたい。

さらに、本研究で誘導したコンクリートの流動挙動を表わす方程式(44)を利用して、スランプフロー試験におけるコンクリートの拡がり速さから塑性粘度を評価する研究に取り組んでいく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、球引上げ粘度計によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数測定法については、明石工業高等専門学校角田忍教授から有益な御助言を頂いたことをここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 小沢一雅, 前川宏一, 岡村 甫: ハイパフォーマンスコンクリートの開発, コンクリート工学年次論文報

告集, Vol.11, No.1, pp.699-704, 1989.

- 2) Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G.: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, 1983.
- 3) 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.
- 4) 村田二郎, 下山善秀: 静的荷重によるフレッシュコンクリートの変形, セメント技術年報XXX, pp.270-273, 1976.
- 5) 水口裕之: フレッシュコンクリートの流動特性に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1984.2.
- 6) 森 博嗣, 谷川恭雄: 粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析, 日本建築学会構造系論文集, No.374, pp.1-9, 1987.4.
- 7) 小門 武, 細田 尚: 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提案, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.1002-1003, 1995.9.
- 8) 藤原浩巳, 下山善幸, 遠藤秀紀: 高流動コンクリートにおけるモルタル部レオロジー特性の評価法の検討, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.306-307, 1994.9.
- 9) 下山善幸: フレッシュコンクリートの変形に関する基礎的研究, 東京都立大学博士論文, pp.117-127, 1988.
- 10) 谷川恭雄, 森 博嗣, 黒川善幸, 小村理恵: フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察, コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集, pp.43-48, 1992.5.
- 11) 黒川善幸, 谷川恭雄, 森 博嗣, 小村理恵: フレッシュコンクリートのスランプ試験およびスランプフロー試験に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.437-442, 1994.
- 12) C.R.ワイリー (富久泰明訳): 工業数学(上), プレイン図書, pp.273n, 1962.5.
- 13) 椿東一郎: 水理学I, 森北出版, pp.41-42, 1973.
- 14) 岩佐義朗: 水理学, 朝倉書店, pp.84-85, 1967.
- 15) 明石外世樹ほか: 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, 土木学会, pp.190-192, 1986.3.
- 16) 吉野 公: 流動性コンクリートのワーカビリティ評価に関する研究, 名古屋大学博士論文, pp.32-37, 1994.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.

(1996.10.21 受付)

## STUDY ON A METHOD OF EVALUATING A YIELD VALUE OF FRESH CONCRETE WITH A SLUMP FLOW VALUE

Takeshi KOKADO, Takashi HOSODA, Toyoaki MIYAGAWA and Manabu FUJII

Authors derive an equation, which gives a yield value of fresh concrete from a slump flow value, on the supposition that the flow of fresh concrete shows a Bingham Plastic.

Making experiments of slump flow tests and ball drag tests, a yield value of fresh concrete obtained from a slump flow test shows similar value from a ball drag test.

Consequently, a yield value of fresh concrete is able to be obtained by a slump flow value.