

[29] フレッシュペースト・モルタルの流動性に関する研究

正会員 岸谷孝一（東京大学）

菅原進一（同）

正会員 ○岡 成一（同）

1. まえがき

フレッシュコンクリートの挙動を解明するには、フレッシュペースト・モルタルの流動性を知る事が重要である。従来の経験的な試験に基づいた数値、記号による表現に代って、レオロジー的に定義された定数によって評価しようとする試みがなされてきた。

本研究は、H'ermite によって始められ、水口らによって行なわれた球ひき上げ試験に関して、その解析式について検討を行ない、測定機器の構成を工夫する事によって、より広範囲の水セメント比にわたって測定を行ない、さらにA E 剤のレオロジー定数に及ぼす効果を調べる事を目的としたものである。

2. 解析式の検討

フレッシュペースト・モルタルの流動は少くともニュートン流動ではない事は古くから知られていた。しかし、主として回転粘度計を用いて得られたデータによって、その流動はビンガム流動として近似される事がわかっている。

ビンガム体中をゆっくり運動する球に働く力を定式化する場合のむずかしさは、流れの場の静止域と流動域があらかじめ知られていない事と、静止域と流動域では次式に示す様に現象を記述する方程式が全く異っている点である。

$$\tau > \tau_y \quad \tau = \eta_p \epsilon D + \tau_y \dots\dots\dots ① \quad \tau < \tau_y \quad \tau = 0 \dots\dots\dots ②$$

ここに、 τ : せん断応力、 τ_y : 降伏値、 $\eta_p \epsilon$: 塑性粘度、 D : 速度勾配

①、②式から明らかなようにビンガム体では、慣性力、粘性力の他に降伏力の3つの力が関係する。したがって相互の比をとる事によって3つの無次元量が得られる。球の半径が r で密度 ρ のビンガム体中を一定速度 U で運動する時、3つの無次元量は次式の様に示される。

$$N_1 = (\text{慣性力} / \text{降伏力}) = U^2 \rho / \tau_y \dots\dots\dots ③$$

$$Re = (\text{慣性力} / \text{粘性力}) = 2 r U \rho / N_p \epsilon \dots\dots\dots ④ \quad (\text{ビンガム体でのレイノルズ数})$$

$$N_2 = (\text{降伏力} / \text{粘性力}) = 2 r \tau_y / U \eta_p \epsilon \dots\dots\dots ⑤ \quad (\text{ビンガム数})$$

したがって少くとも④式の Re と⑤式の N_2 の影響を考慮しなければならない。

一方球の受ける抗力 f を抗力係数 C_D という形で⑥式の様に無次元化し、 C_D と Re を用いて得られる無次元量 X を⑦式の様に定義する。

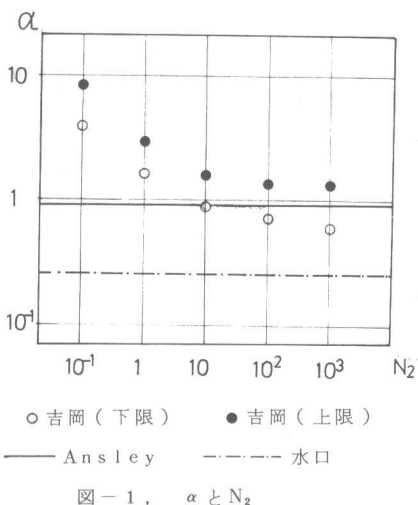
$$C_D = 2 f / \rho U^2 \pi r^2 \dots\dots\dots ⑥$$

$$X = C_D Re / 24 \dots\dots\dots ⑦$$

ここで定義された X を用いると、ビンガム体中を運動する球の受ける力は変数 α を用いて⑧式で表現される。

$$X = 1 + \alpha N_2 \dots\dots\dots ⑧$$

$\alpha = 0$ ならばニュートン流体におけるストークスの定理を示すものである。Ansley¹⁾らは、ほぼ完全なビンガム体と考えられる粘土、カオリンのサスペンションなどを用いて塑性粘度と



降伏値をまとめ、さらに既往のデータを整理する事によって次式を提案した。

$$X = 1 + 7\pi/24 N_2 \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

一方水口²⁾らによって示された式は速度勾配の分布がニュートン流体のそれと全く同一であると仮定して導びかれた式であって、球表面で積分すると $\textcircled{10}$ 式となる。

$$X = 1 + \pi/12 N_2 \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

この式は N_2 の効果を考慮せずに導びいたものである。

さらに、吉岡³⁾らは、静止域と流動域をわける境界を定めると同時に α を計算する過程をくり返し、 α の上限と下限を N_2 の関数として表現した。Ansley⁴⁾、水口、吉岡による α を N_2 をパラメーターとしてプロットすると図-1 の様になる。セメントペーストの場合、 N_2 の値は $10^0 \sim 10^3$ のオーダーであるので、本解析においては Ansley の $\alpha = 7\pi/24$ とする式を採用した。従って $\textcircled{9}$ 式を書き直すと $\textcircled{11}$ 式が得られる。

$$f = (7\pi^2 r^2 / 2) = \eta p \ell (12U / 7\pi r) + \tau y \dots\dots\dots \textcircled{11}$$

$\textcircled{11}$ 式より縦軸に $12U/7\pi r$ 、横軸に $f/(7\pi^2 r^2/2)$ をプロットすれば、得られる直線の傾きの逆数が塑性粘度であり、横軸との切片が降伏値となる。

3. 実験概要

使用した材料は普通ポルトランドセメント、川砂（最大粒径 5 mm、 $f \cdot m = 2.73$ 、表乾比重 2.6、相模川産）で、A E 剤（ヴィンゾル原液）はセメント重量の 0.03 % を水に希釈して用いた。まず川砂を表乾状態とし、強制練りミキサーで 1 バッチ 40 L 程度練り混ぜて試料を作製した。ミキサーへの材料の投入順序は、1 砂、2 セメント、3 水及び混和剤の順である。練り上り温度は、練り混ぜ水の温度を変える事により $20 \pm 1^\circ\text{C}$ とし、実験は加水後 40 以内に終了する様にした。実験に先立って、練り上り温度、フロー、空気量、比重を測定した。作成した試料は内径約 40 cm、深さ約 40 cm の円筒容器に入れる。その試料中を 4 種の径の異なる鋼球（半径 3.18 cm、2.54 cm、1.90 cm、1.27 cm）をスピードコントロールモーターと無段変速機を用いて減速し定速で引き上げた。測定に用いた機器の構成は 図-2 の通りであり、球をひき上げる速度を直線速度変換機でチェックした。球をひき上げる速度は、 $0.08 \text{ cm/sec} \sim 1.35 \text{ cm/sec}$ の間を 6 段階に分割して用いた。球にかかる力は、容量 1 kg または 2 kg のロードセルに定電圧電源を接続しておき、球の重量をある程度、うちけしておき、降伏力と粘性力を増巾してペンレコーダーで速度とともに検出した。

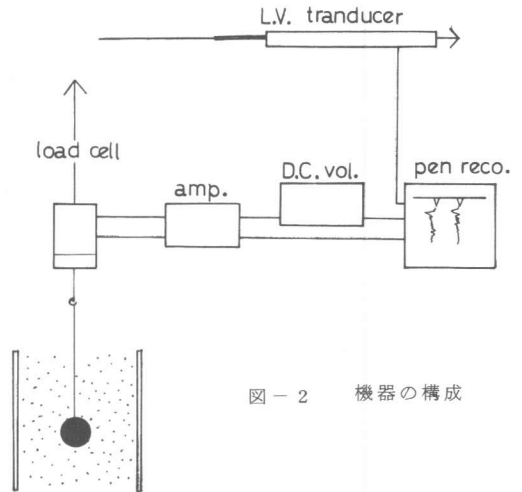


図-2 機器の構成

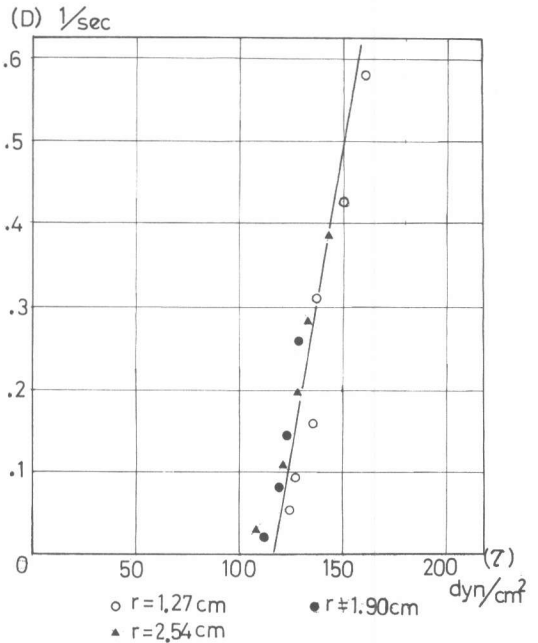


図-3 測定結果の一例

4. 実験結果及び考察

得られたデータを④式に基いてプロットした典型的な例が図-3である。これは水セメント比50%で川砂の体積率が20%のモルタルである。この場合水口も同様の実験で示したように、球径の差による影響はほとんど無視しうるように思われる。また図中の各点もほぼ直線と近似してよいと思われる。しかし、水セメント比が大きくなるにしたがって、特にペーストの降伏値の存在が不明確となる傾向を示す。また、モルタルの体積率が大きくなるにしたがい N_2 の値が大きくなる傾向を示し塑性粘度の正確な測定はむずかしいものとなる。

4・1 ペースト

ペーストの降伏値と塑性粘度を水セメント比(重量)をパラメーターとしてプロットしたのが図-4である。水セメント比の増大にしたがって、降伏値、塑性粘度ともに減少する傾向がある。また水セメント比の小さな範囲ではそれらの変動が急であって、水量の変動に非常に敏感である。ペーストの場合、図に見るように N_2 もかなり大きいものである。

4・2 測定方法とレオロジー定数

ペーストのレオロジー定数に関するデータは既にかなり蓄積されている。ペーストをビンガム体とした場合のレオロジー定数を他の測定法と比較してみる。選んだ測定法は、上述の球ひき上げ試験、平行板ブラストメータ、回転粘度計の3種である。回転粘度計に関しては、国際的にも基本的なデータとされるIsh-Shalom⁴⁾のものを用い、平行板ブラストメータは水口のデータを用いた。横軸にセメントと水の体積比縦軸に降伏値、塑性粘度をとったものが図-5aと図-5bである。降伏値を見ると3者はほぼ同様の値を示しているといえる。しかし、塑性粘度に関しては、球ひき上げ試験は平行板ブラストメータとほぼ同一の値をとっているが、回転粘度計の値は、球ひき上げ試験の値の1/100程度であってオーダーが異なっている。

4・3 ペーストとAE剤

ペーストに及ぼすAE剤の影響を調べるため、ブレンの同一の水セメント比のペーストの降伏値塑性粘度を基として、AEペーストの相対的な降伏値、塑性粘度を示したものが図-6である。エアメーターによって測定された空気量は4~5%であった。降伏値

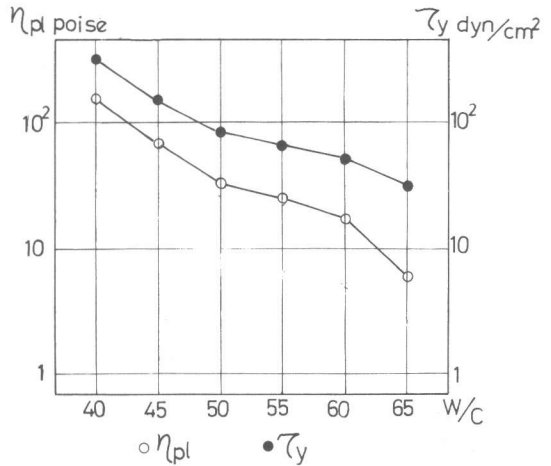


図-4 ペーストのレオロジー定数とW/C

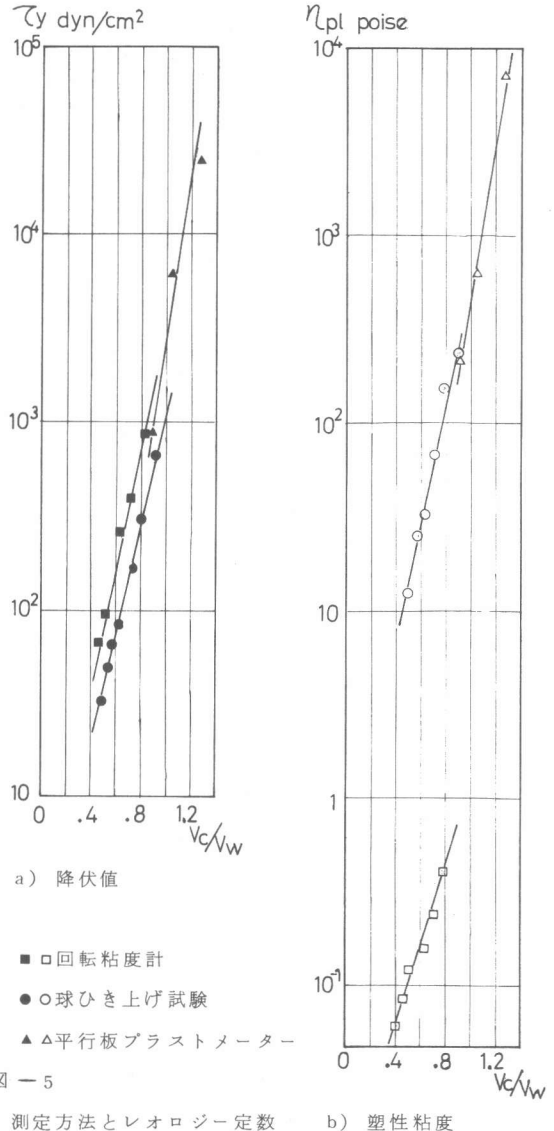


図-5

測定方法とレオロジー定数

b) 塑性粘度

塑性粘度とも大きくなる傾向を示している。特に降伏値が大きくなる事は、ペーストのような N_2 が大きい材料ではより降伏値の寄与が大きくなると考えられ、T. C. Powers⁵⁾ のエントレインドエアがペーストの硬さを増大させるという意見を裏づけていると思われる。

4・4 モルタル

モルタルは上述の川砂の体積率をパラメーターとして、降伏値と塑性粘度をプロットしたものが 図-7 である。砂の体積率の増大にもなって降伏値は増大するが、塑性粘度はそれほど変動しない。したがって、砂の体積率が 60 名の測定の場合には、降伏値の影響が大となって、 N_2 の値が大きくなり塑性粘度の測定はできなかった。

4・5 モルタルと A E 剤

モルタルに及ぼす A E 剤の影響を調べた。A E 剤によって導入された空気量は 5 名程度であった。同一調査とのブレンモルタルとの相対的な塑性粘度と降伏値を砂の体積率をパラメーターとして示したのが 図-8 である。A E 剤は砂の体積率の小さな範囲ではレオロジー定数を減少させる効果はなく、砂の体積率が増大すると降伏値が減少する傾向をみせる。これは変形を起こす場合、骨材粒子の相互干渉が大きくなる状況(ダイラタンシーを伴なうと思われる)においては、連行空気によってレオロジー定数が減少するためと思われる、その結果ワーカビリティの改善につながる。

5. 結 語

本研究の範囲内で得られた結果は次の様である。

- ペーストの降伏値・塑性粘度は水セメント比の増大により減少する。
- モルタルの降伏値は砂の体積率の増大とともに増大する。
- A E 剤の添加はペーストの場合、降伏値、塑性粘度ともにブレンのものに比して大きくなるが、モルタルの場合砂率が高くなると降伏値はブレンのものに比して小さくなる。

6. 参考文献

- 1) Ansley: Motion of Spherical Particle in a Bingham Plastic
AICHE Journal '67-11
- 2) 水口: フレッシュモルタルのレオロジー定数の測定法 セメ技 '73
- 3) 吉岡: 粘塑性流体の球を過ぎる遅い流れについて 化工 '71-10
- 4) Ish-Shalom: The Rheology of Fresh Portland Cement '62
- 5) T. C. Powers: The Properties of Fresh Concrete P467

本実験にあたっては、住友セメント中央研究所齊藤一範氏の御協力を得ました。ここに謝意を表します。

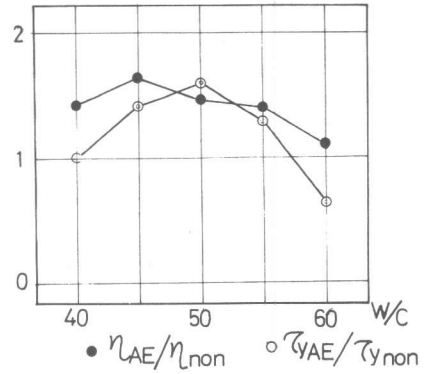


図-6 A E 剤とペースト

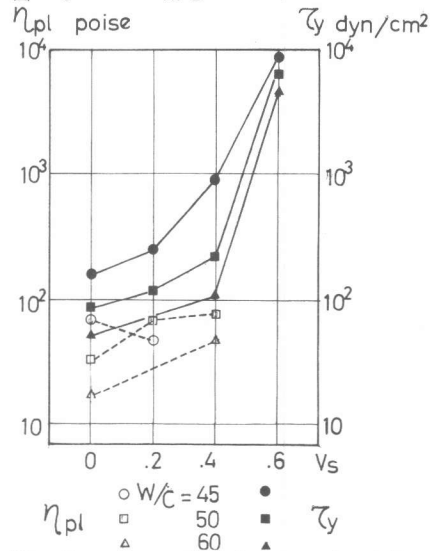


図-7 モルタル砂率とレオロジー定数

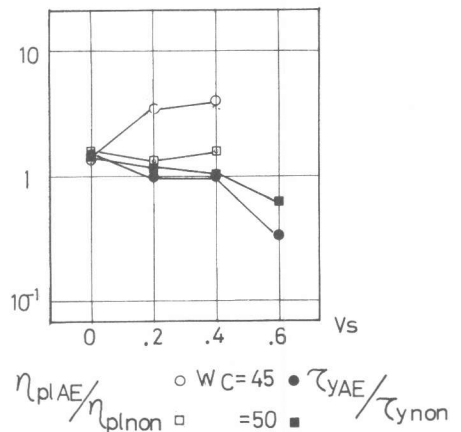


図-8 A E 剤とモルタル