

[75] プレーンフレッシュコンクリートのレオロジー定数, コンシステンシー試験値間の関係

正会員 水口裕之(徳島大学工学部)

1. 序 言

フレッシュコンクリートの流動特性を的確に把握し、それを利用して合理的なコンクリート施工をするためには、その流動特性をコンクリート工事の現場で測定することが必要である。このため、フレッシュモルタルやコンクリートの流動特性を測定する方法が数多く提案されてきた。しかし、これらの測定法は、その測定値の意味が不明確であったり、測定方法が複雑であったりして決定的な方法は、まだ開発されていない。

現在、流動特性の測定方法としてよく使用されているものとしては、スランプ試験、VB試験、CF試験、フロー試験などがある。これらの方法は、測定装置や方法が比較的簡単な半面その測定値の意味が不明確であるといわれている。一方、近年、フレッシュモルタルやコンクリートをビンガム物体と仮定し、そのレオロジー定数を求め、物理的な意味を持った数値でコンクリートの流動特性を表そうと試みられている。しかし、現在のレオロジー定数の測定方法は、装置も大型でその測定法も複雑であって、現場での測定には向いていない。

これらを解決するためには、(1)現場で使用できるレオロジー定数の測定装置を開発する(2)レオロジー定数に関連する数値を測定できる簡便な装置を開発する(3)現在用いられているコンシステンシー試験のレオロジー的意義を検討する という方法が考えられる。(1)の解決方法は、コンクリートを均一材料と見なし得るだけの試料寸法が必要なことから装置の大型化が避けがたい。(2)の方法は、Tattelsalt¹⁾がTwo-point methodとして提案し、かなりの成果を得ている。(3)の方法としては、コンクリートのコンシステンシー試験中の流動の解析や実験によってコンシステンシー試験値とレオロジー定数との関係を検討することが考えられる。

本研究では、現在よく用いられているスランプ値、フロー値およびVB値のレオロジー的意義を検討するため、これらのコンシステンシー試験値とビンガム物体と仮定したフレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー定数すなわち、降伏値および塑性粘度との関係ならびにレオロジー定数間の関係を実験的に求め、考察した。

2. 実験の方法

2.1 使用材料

すべての配合とも普通ポルトランドセメントを用いた。モルタルでは、比重3.15~3.16、フロー値244~250のセメント、コンクリートでは、比重3.15~3.16、フロー値244~255のものを使用した。

モルタル用の細骨材は、比重が2.60~2.63の範囲の表-1に示す粗粒率0.94~3.31の計12種の天然砂とした。細骨材は、表乾状態になるべく近づけておき、含水率を補正して用いた。

コンクリート用の骨材としては、細骨材に比重2.62~2.64、粗粒率2.63~3.22の川砂を使用した。粗骨材は、比重2.61および2.68の川砂利と比重2.61の砂岩碎石を用いた。粗骨材粒度は、実験シリーズによって、表-2に示すように5~10mm、10~15mmあるいは5~15mmと変えた。粗骨材は表乾状態で使用した。

2.2 モルタルおよびコンクリートの配合

モルタルおよびコンクリートとも混和材料を用いないプレーンの配合とした。配合要因は、セメントペースト中のセメント体積濃度 $v_c (=c/(w+c))$ 、モルタル中の細骨材の体積濃度 $v_s (=s/(w+c+s))$ およびコンクリート中の粗骨材の体積濃度 $v_g (=g/(w+c+s))$ で表し、空気量については無視した。

表-1 モルタルの配合

実験シリーズ	セメント体積濃度 v_c (W/C)	細骨材体積濃度 v_s (C/S)	細骨材(天然砂)の種類	配合数
A	0.300-0.375(0.74-0.53)の4種	0.0 - 0.60(1/0.0-1/4.2)の12種	F.M.=2.74, 実粗粒率=63.7%の1種	48
B	0.40(0.48)の1種	0.375-0.575(1/1.8-1/1.4)の17種	F.M.=0.94-3.00, 実粗粒率=57.9-66.0%の5種	33
C	0.375-0.450(0.53-0.39)の4種	0.425-0.550(1/2.0-1/3.9)の6種	F.M.=1.67-3.31, 実粗粒率=59.7-67.0%の4種	52
D	0.350-0.450(0.59-0.39)の5種	0.40-0.60(1/1.8-1/5.1)の5種	F.M.=2.10-3.22, 実粗粒率=60.2-66.3%の3種	70

注) $v_c=c/(w+c)$, $v_s=s/(w+c+s)$.

モルタルの配合は、表-1に示すような水セメント比W/Cが0.39~0.74、セメント砂比C/Sが1/0(ペースト)~1/5.1、フロー値が110~251となる計203種類とした。コンクリートの配合は、表-

表-2 コンクリートの配合

実験シリーズ	セメント体積濃度 v_c (W/C)	細骨材体積濃度 v_s	粗骨材体積濃度 v_g (S/A,%)	粗骨材の種類	配合数
I	0.40 - 0.45 (0.48 - 0.39)の3種	0.50の1種	0.0 - 0.40 (100 - 43)の10種	砕石 5-10, 10-15, 5-15mm, 川砂利 5-15mmの4種	75
II	0.40 (0.48)の1種	0.50の1種	0.0 - 0.40 (100 - 43)の7種	砕石 5-15mm, 川砂利 5-15mm = 0-100:100:0の6種	42
III	0.38 - 0.42 (0.52 - 0.44)の3種	0.45 - 0.55の3種	0.0 - 0.40 (100 - 40)の5種	砕石 5-15mmの1種	43
IV	0.38 - 0.42 (0.52 - 0.44)の3種	0.45 - 0.55の3種	0.0 - 0.40 (100 - 40)の7種	砕石 5-15mmの1種	60
V	0.35 - 0.50 (0.59 - 0.32)の7種	0.50の1種	0.0 - 0.40 (100 - 43)の9種	砕石 5-10, 10-15, 5-15mm, 川砂利 5-15mmの4種	98

(1) $v_c=c/(w+c)$, $v_s=s/(w+c+s)$, $v_g=g/(w+c+s+g)$.

2に示す318種で、水セメント比W/Cの範囲は0.32~0.59、細骨材率は100(モルタル)~40%,スランブ値は0.6~24.5cmのものとした。

2.3 スランブ値、フロー値およびVB値の測定

コンクリートのスランブ値およびモルタルのフロー値は、それぞれJISの規定に従って測定した。なお、フローコーンを取り除いた直後の静定フロー値 FL_0 も求めた。モルタルのスランブ値は、コンクリート用の1/2の寸法のスランブコーン、径8mmの突き棒を用いてJISの方法と同様にして測定した。

VB試験は、振動数3600rpm、最大加速度2gの振動台を持つ装置を用いて行い、コンクリートではBS1881:Part2の方法に従って測定した。モルタルでは、コンクリート用の1/2の寸法のコーン、突き棒、容器および透明円板(全質量578g)とコンクリート用と同じ振動台を用いて、コンクリートと同様の方法でVB値を測定した。

2.4 レオロジー定数の測定

フレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー定数は、既報²⁾と同じ平行板ブラストメータを用いて測定した。この装置は、試料に一定荷重をかけ、その時の試料高さの時間的変化を測定し、荷重の大きさ、試料高さおよびその高さ変化から流動曲線を描き、レオロジー定数を求めるものである。

測定方法は、既報²⁾と同じとし、試料はうすい円板状のもので、モルタルでは直径30cm、高さ約3cm、コンクリートでは直径60cm、高さ約6cmとした。試料高さは、5/1000mmまで0.4s間隔で測定し、岡の式³⁾を用いて流動曲線を描いた。その直線部分の傾きから塑性粘度 η_{pl} 、せん断応力軸との切片から降伏値 τ_y を求めた。なお、以上すべての測定では、試料温度を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とし、練り混ぜ、コンシステンシー試験の手順を同一として、注水後約8minでレオロジー定数の測定を開始した。また、測定は同一条件について日を変えて2回以上行い、その平均を測定値とした。

3. 実験結果および考察

注水後の経過時間や試料温度の違いによって、フレッシュコンクリートの性質が変化することはよく知られている。本実験においては、前述したように同一手順、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の試料温度としたので、これらの違いの影響は小さいとして、以下の結果および考察では無視した。

3.1 降伏値と塑性粘度との関係

Tattersall⁴⁾は、ビンガム物体と仮定したフレッシュコンクリートの流動曲線は、配合によってその傾きや切片が異なるので、直線と考えられるこの流動曲線を表すには、2つの値すなわち降伏値と塑性粘度とが必要であると述べている。ところが、配合要因を変えて降伏値および塑性粘度を測定してみると、降伏値が大きい配合では塑性粘度も大きい。そこで、モルタルおよびコンクリートの降伏値と塑性粘度との関係を示すと図-1~図-3となる。図-3は、各コンクリート中のモルタルの降伏値および塑性粘度でそれぞれ除した相対降伏値 τ_r と相対粘度 η_r との関係である。

図-1に見られるようにモルタルにおいては、実験シリーズの違いにかかわらず降伏値 τ_y Paと塑性粘度 η_{pl} Pa·sとの間には高い相関関係があり、次式が得られている。

$$\eta_{pl} = 8.37 \times 10^{-3} \tau_y^{1.196} \quad (r = 0.986) \quad (1)$$

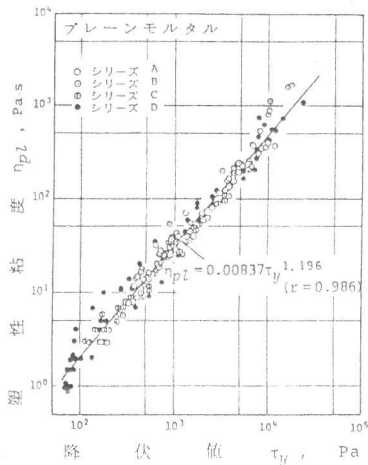


図-1 モルタルの降伏値と塑性粘度との関係

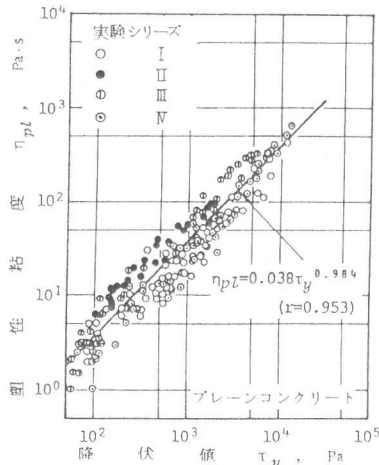


図-2 コンクリートの降伏値と塑性粘度との関係

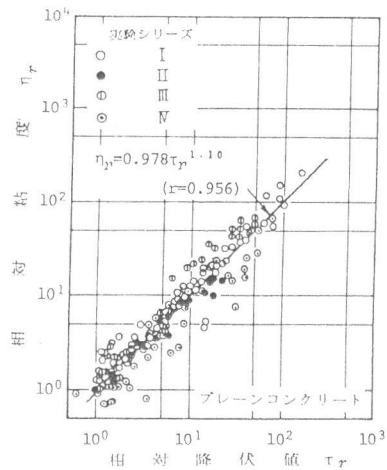


図-3 コンクリートの相対降伏値と相対粘度との関係

コンクリートにおいては、図-2に示されているようにモルタルの場合よりは、相関が若干悪く、また実験シリーズによる違いが見える。図-2と図-3とでは、図-3の相対レオロジー定数の場合の方が、実験シリーズによる違いが少なくなっている。しかし、コンクリートにおいても全般的には、高い相関があり次の式が得られている。

$$\eta_{pl} = 3.80 \times 10^{-2} \tau_y^{0.984} \quad (r = 0.953) \quad (2)$$

$$\eta_r = 9.78 \times 10^{-1} \tau_r^{1.10} \quad (r = 0.956) \quad (3)$$

ただし、 η_r は相対粘度、 τ_r は相対降伏値である。

したがって、フレッシュモルタルやコンクリートにおいては、降伏値か塑性粘度のどちらか一方がわかれば、もう一方の値はだいたい推定できることになる。しかし、図-2に示されているように、同じ降伏値に対する塑性粘度の値は、最大3倍位の違いがあるものもあり、この違いが施工上必要な情報として、どのような意味を持つかについては今後検討する必要がある。

3.2 モルタルのコンシステンシー試験値とレオロジー定数との関係

モルタルのコンシステンシー試験値とレオロジー定数との関係の1例を図-4～図-6に示す。

図-4に見られるように、JISによるフロー値 FL_{15} と塑性粘度 η_{pl} Pa·sの対数との間には線形関係がある。降伏値 τ_y Paとの関係も3.1で述べたように塑性粘度と降伏値との間に高い相関関係があるので、同様の結果となり次の関係式が得られている。

$$\tau_y = 6.23 \times 10^5 \exp[-0.0326 FL_{15}] \quad (r = 0.956) \quad (4)$$

$$\eta_{pl} = 1.59 \times 10^5 \exp[-0.0431 FL_{15}] \quad (r = 0.962) \quad (5)$$

このように、フロー値 FL_{15} はモルタルのレオロジー定数のよい指標となる。一方、静定フロー値 FL_0 は、図-4に示されているように相関関係はあるものの変化が少なく、レオロジー定数の指標とはしにくい。モルタルのスランプ値 $SI_{1/2}$ cmと降伏値 τ_y Paとの関係は、図-5のようになり、若干実験シリーズによる違いがあるものの、全般的にはかなり高い相関関係がある。塑性粘度 η_{pl} Pa·sの場合も同様の結果となり、

$$\tau_y = 8.06 \times 10^3 \exp[-0.392 SI_{1/2}] \quad (r = 0.960) \quad (6)$$

$$\eta_{pl} = 2.93 \times 10^2 \exp[-0.337 SI_{1/2}] \quad (r = 0.971) \quad (7)$$

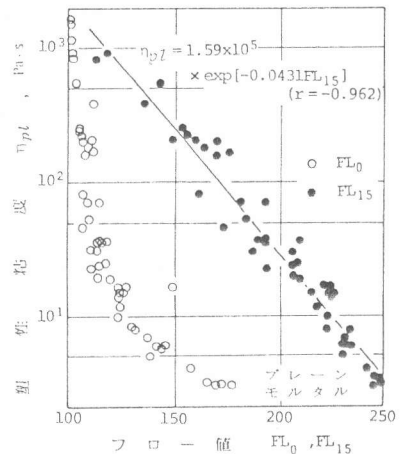


図-4 モルタルのフロー値と塑性粘度との関係

の関係式が得られている。

図-6のモルタルのVB値と塑性粘度との関係は、VB値の小さいところでは、塑性粘度の変化に対してVB値の変化が少なく、VB値の大きいところでは、塑性粘度のばらつきが大きい。この結果は降伏値の場合も同様である。したがって、コンクリートに対する村田のVB値は塑性粘度と密接な関係があるという指摘とは異なり、VB値はレオロジー定数の指標としては不適当となる。

3.3 コンクリートのコンシステンシー

試験値とレオロジー定数との関係

コンクリートのスランブ値 $S1$.cmと降伏値 τ_y Paとの関係は、図-7に示されているようにモルタルの場合と同様に、実験シリーズによって若干異なった傾向となっているが、全般的にはかなりの相関があり、次式が得られている。

$$\tau_y = 9.12 \times 10^{-3} \exp[-0.192 S1.] \quad (r=0.948) \quad (8)$$

このように、スランブ値は降伏値をある程度推定する指標とできる。

しかし、同じスランブ値に対して降伏値が3~4倍異なる場合もあり、これが施工上どのような意味を持つかについては今後の検討課題である。

VB値と塑性粘度との関係は、図-8に見られるようにモルタルの場合と同様の結果で、VB値はレオロジー定数の指標としにくい。

4. 結 語

以上述べてきたように、フレッシュモルタルおよびコンクリートにおいては、降伏値と塑性粘度との間には高い相関があり、一方の値からもう一方の値をある程度推定できる。モルタルではフロー値とスランブ値、コンクリートではスランブ値から、それらのレオロジー定数をある程度推定できる。しかし、これらの推定には誤差がかなりあるので、この誤差が施工上必要な情報として、どのような意味を持つかは今後の検討課題である。

また、以上の結果はブレーンの配合の場合であり、混和材料を用いた配合では異なる結果も考えられる。

参考文献

- 1) Tattersall, 他; The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, 1983, pp.76-17
 4. 2) 水口, 他; フレッシュコンクリートに関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1983, pp.17-24. 3) 岡; 材料 Vol.12, 1963, pp.314-316. 4) 1)と同じ, pp.175-191. 5) 村田; コンクリートジャーナル, Vol.10, No.12, 1972, p.4.

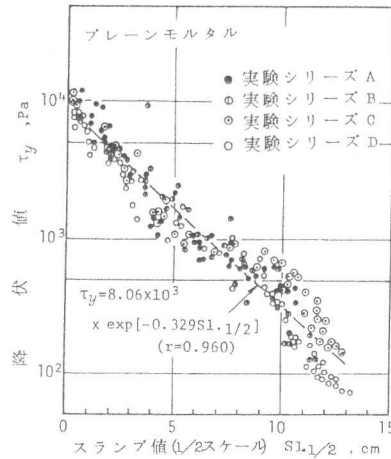


図-5 モルタルのスランブ値と降伏値との関係

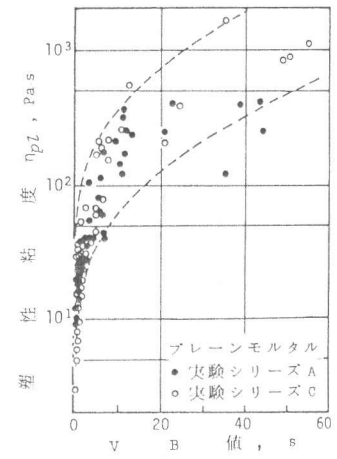


図-6 モルタルのVB値と塑性粘度との関係

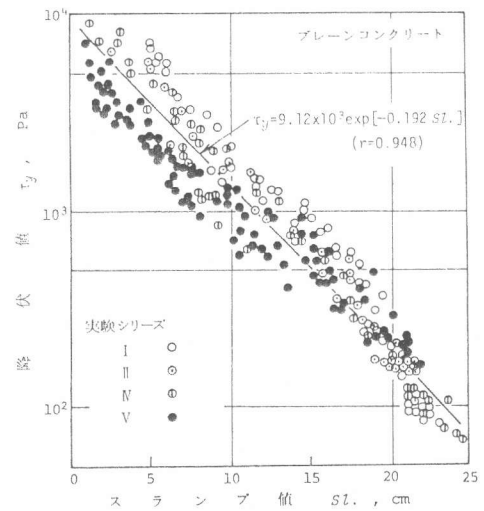


図-7 コンクリートのスランブ値と降伏値との関係

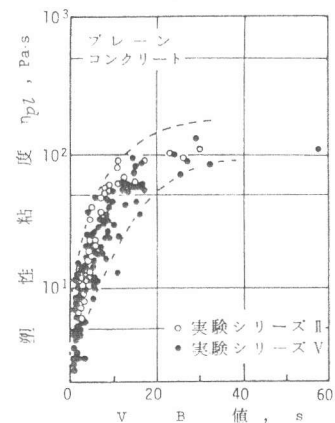


図-8 コンクリートのVB値と塑性粘度との関係