

正員 水口 裕文 (徳島大学工学部)

正員 近藤 明生 (徳島大学大学院)

1. まえがき

本研究は、フレッシュコンクリートをビンガム物体と仮定し、さらに、モルタルと粗骨材とから成る二相材料と考え、インフレーションである粗骨材の量、粒度および粒形がレオロジー定数に及ぼす影響をマクロ的に観察するとともに、これらの粗骨材要因を表わす指標について検討を加えたものである。また、現在フレッシュコンクリートのコンシステンシーを測定する方法として現場で広く用いられているスランプ試験が、レオロジー的どのような意義をもちかについて考察したものである。

2. 実験の概要

(1) 使用材料および配合 比重3.16, ブレーン値3/20cm<sup>2</sup>/gの普通ポルトランドセメントおよび比重2.62, F.M.257の吉野川産川砂を用いた。粗骨材は、粒度による影響を調べるために、比重2.61, 吸水率1.70である15~10mm, 10~5mm および 15~10mm : 10~5mm = 6:4(質量比)とした15~5mmの3種の砂岩碎石を用い、粒形による影響を調べるために、15~5mmの碎石および比重2.68, 吸水率1.16である15~5mmの川砂利を使用した。

配合要因はすべて体積割合とし、モルタルの配合要因としてセメントペースト中のセメントの体積濃度 $\beta$ ( $=\frac{C}{w+C}$ , 以下 $\beta$ と書く) およびモルタル中の細骨材の体積濃度 $\beta_1$ ( $=\frac{A}{w+C+A}$ , 以下 $\beta_1$ と書く) を用いた。粗骨材量は全コンクリート中の粗骨材の体積濃度 $\beta_2$ で表わした。測定した配合を表-1に○印で示す。

(2) 練りませおよびレオロジー定数の測定 20lの試料コンクリートは、容量50lの強制練りミキサーを用い、3分間で練りませた。また、練り上がり温度は、練りませ水の温度を変えて20±2℃になるようにした。

レオロジー定数は、図-1に示す平行板プラストメータを用いて測定した。平行板プラストメータの理論式<sup>(1)</sup>は、円板試料の半径を $r$ , 高さを $h$ , 作用している荷重を $F$ とし、 $\dot{\gamma} = -\frac{\sigma}{2} \cdot \frac{r}{h^2} \cdot \dot{\theta}$ ,  $\tau = \frac{3r}{\pi h^3} F$ とおくと、 $\dot{\gamma} = \frac{1}{f_{pe}}(\tau - \tau_0)$ となる。したがって、試料に定荷重を載荷し、試料高さの時間的変化を求め、上式の $\dot{\gamma}$ および $\tau$ を計算してプロットすると図-2のようになるので、その直線部分の勾配の逆数から塑性粘度 $f_{pe}$ (以下 $f_{pe}$ と書く)、 $\tau$ 軸との切片から降伏値 $\tau_0$ (以下 $\tau_0$ と書く)を求めた。試料寸法は、直径60cmおよび載荷開始時の高さを約6cmとした。試料高さは、ロード上端に取り付けた変位計およびプリンタを用いて0.4秒間隔で測定した。また、スランプ値を練りませ直後に測定した。なお、測定は同一条件について日を変えて2回行い、その平均値を測定値とした。

表-1 測定範囲

$\beta_2$	0.42	0.40	0.38
0.00	○		
0.15	○	○	
0.17	○		
0.20		○	
0.22	○		
0.25		○	
0.27	○	○	
0.29	○	○	○
0.31	○	○	○
0.33	○	○	○
0.35		○	○
0.40		○	○

(3) 粗骨材表面積 $S_p$ の測定 フレッシュコンクリートのレオロジー定数に影響を及ぼす粗骨材要因としては、量、粒度、粒形などが考えられるが、これらを同時に表わす指標として、単位体積のコンクリート中の粗骨材がもつ総表面積 $S_p$ について検討した。

骨材のような不規則なものの真の表面積を測定するのは非常に困難であるので、本研究では、簡便な表面積測定法として投影法<sup>(2)</sup>を採用した。測定方法は、粗骨材の表面

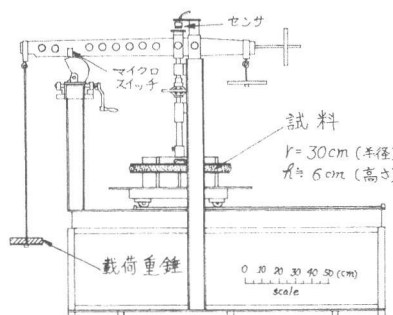


図-1 平行板プラストメータの概略図

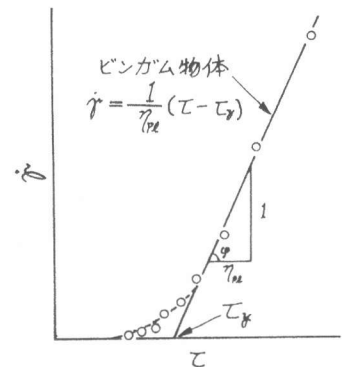


図-2 測定例

にくぼみがないということ的前提条件とし、実験に用いた15~13mm, 13~10mmおよび10~5mmの3種の碎石から代表的試料を50個ずつ抽出して、各骨材粒子の長軸方向、長軸直角方向および短軸方向の3方向の投影図を求め、その平均投影面積の4倍を骨材粒子の表面積とした。各配合の粗骨材の総表面積 $S_g$ は、この表面積と粗骨材の重量とから求めた。

### 3. 実験結果および考察

(1) 粗骨材の粒度とレオロジー一定数との関係 マトリックスであるモルタルの性質およびインクルージョンである粗骨材の粒形を固定し、粗骨材量および粒度を変化させた場合、図3および図4に示されているように、 $v_g$ が増加するに従って、レオロジー一定数は指数関数的に増加する傾向となっている。また、粒度変化によるレオロジー一定数の差は、 $v_g$ の増加とともに大きくなっている。すなわち、 $v_g$ が0.2程度では、粒度の違いによる差が高々 $\tau_{pe}$ で4Pas,  $\tau_y$ で100Pa位であるが、 $v_g$ が0.3程度になると、 $\tau_{pe}$ で50Pas,  $\tau_y$ で300Paと10倍以上になっており、 $v_g$ が0.2程度以下では、粒度の影響は大きくないと考えられる。 $v_g$ が同じ場合には、粒度が細かい方がレオロジー一定数は、若干の例外を除いて大きくなっている。

また、二相材料のレオロジー構成式を表わすのに有効な相対粘度の考え方を降伏値にも適用した相対降伏値を用いると、相対粘度の場合も同様であるが、図5のようになる。この図に示されているように、粒度が変化する場合にも、 $v_g$ のみで $\tau_{gr}$ の変化を表わすのは適当でないと思われる。

したがって、粗骨材の量および粒度とレオロジー一定数との関係式を求めるためには、これら粗骨材要因を表わす指標を求める必要がある。

また、同一のモルタルおよび粗骨材における $v_g$ と $\tau_{gr}$ との関係は、表2に示すように高い相関を示しており、その直線式を図5に示す。この図から、 $v_g=0.5, v_c=0.40$ のモルタルの場合、 $v_g$ が0.2程度を境として二つの流動域が存在することが考えられる。しかし、 $v_g=0.5, v_c=0.42$ の場合には、上述とは異なる傾向が見られ、モルタルの性質が変化すると、同一の粒度および粒形をもつ粗骨材を用いた場合でも、 $\tau_{gr}$ の値は大きく異なっており、相対粘度の考え方を応用して、粗骨材要因のみとレオロジー一定数との関係を表示することは難しいことが示されている。

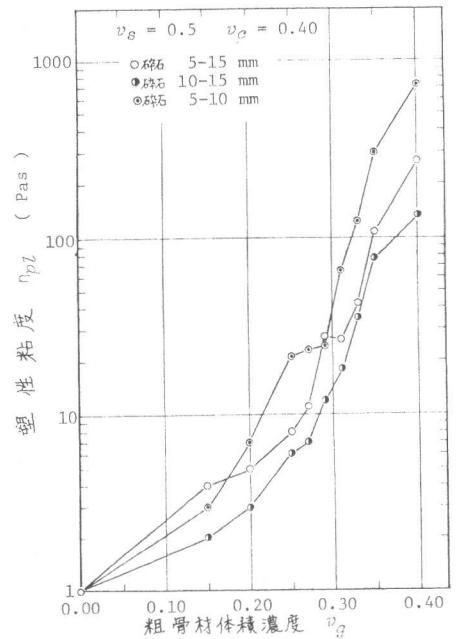


図-3 粒度と塑性粘度 $\tau_{pe}$ との関係

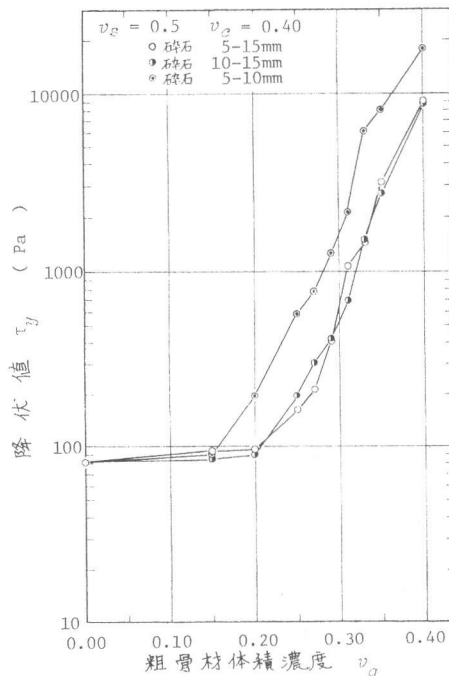


図-4 粒度と降伏値 $\tau_y$ との関係

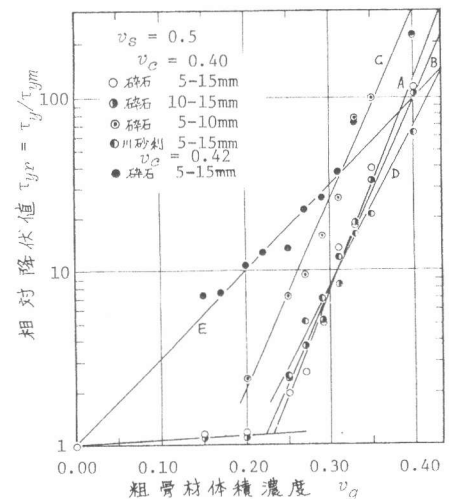


図-5 粗骨材体積濃度 $v_g$ と相対降伏値 $\tau_{gr}$ との関係

(2) 粗骨材の粒形とレオロジー一定数との関係 粒形がレオロジー一定数に及ぼす影響は、(1)と同様に、モルタルの性質を一定として、同じ5~15mmの粒度をもつ碎石と川砂利の同一 $v_g$ に対する $\tau_{pe}$ および $\tau_y$ との関係で示すと、図6および図7となる。縦軸を対数で示しているため、図上では大きな差はないように見えるが、 $v_g$ が実際に用いられているコンクリートの配合である0.33位より大きくなると、 $v_g$ が小さい場合に比べて、同一 $v_g$ に対するレオロジー一定数に差があり、したがって、(1)の場合と

同様に、レオロジー構成式を検討するためには、粒形の影響も考慮する必要がある。

(3) 粗骨材表面積 $S_g$ と相対粘度 $\eta_{pr}$ および相対降伏値 $\tau_{yr}$ との関係 前述したように、 $v_g$ が同じでも粒度が異なれば、同一マトリックスにおけるコンクリートのレオロジー定数は相違している。したがって、粗骨材の量と粒度とを同時に1つの指標で表わすことができれば、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式を表現するのに非常に便利である。

そこで、実験の概要で述べたように、粗骨材の量と粒度とを同時に表わす指標として、単位体積のコンクリート中の粗骨材の総表面積 $S_g$ について検討することとし、 $S_g$ と $\eta_{pr}$ および $\tau_{yr}$ との関係を示すと、図-8および図-9のようになる。

粒形の影響については、 $S_g$ とレオロジー定数との間に相関関係が得られているが、図-8および図-9に示されているように、 $S_g$ と $\eta_{pr}$ および $\tau_{yr}$ の間には、粒度の影響が示されており、その傾向は、図-3および図-4の $v_g$ を指標とした場合とは逆である。すなわち、同一 $S_g$ に対しては、粒度の細かい方が、 $\eta_{pr}$ 、 $\tau_{yr}$ ともに小さくなっており、同一 $v_g$ に対しては、粒度の細かい方が、 $\eta_{pr}$ 、 $\tau_{yr}$ ともに大きくなっている。これは、フレッシュコンクリート中のモルタルの性質および粗骨材量が同じであれば、総表面積の大きい、すなわち粒度の細かい粗骨材の場合に流動しにくいということであり、同じ総表面積をもつ粗骨材を含むコンクリートでは、粒度が粗いほど粗骨材量が多く、その方が流動しにくいことを示している。

そこで、各骨材に付着し、一体となって作用するモルタルがあると仮定すると、図-8および図-9の粒度による差を小さくすることができ、また、図-3および図-4の場合も同様に、粒度による相違を少なくすることになるので、単に

表-2 実験式

実験式	種類	$v_c$	粒度	実験式	相関係数 $r$
A	碎石	0.40	5-15mm	$\log \eta_{pr} = 10.398v_g - 1.715$	0.985
				$\log \tau_{yr} = 12.302v_g - 2.805$	0.991
B	碎石	0.40	10-15mm	$\log \eta_{pr} = 9.890v_g - 1.748$	0.983
				$\log \tau_{yr} = 11.382v_g - 2.521$	0.995
C	碎石	0.40	5-10mm	$\log \eta_{pr} = 11.494v_g - 1.715$	0.974
				$\log \tau_{yr} = 10.456v_g - 1.755$	0.988
D	川砂利	0.40	5-15mm	$\log \eta_{pr} = 8.402v_g - 1.165$	0.984
				$\log \tau_{yr} = 8.910v_g - 1.752$	0.993
E	碎石	0.42	5-15mm	$\log \eta_{pr} = 4.795v_g + 0.093$	0.967
				$\log \tau_{yr} = 4.947v_g + 0.016$	0.969

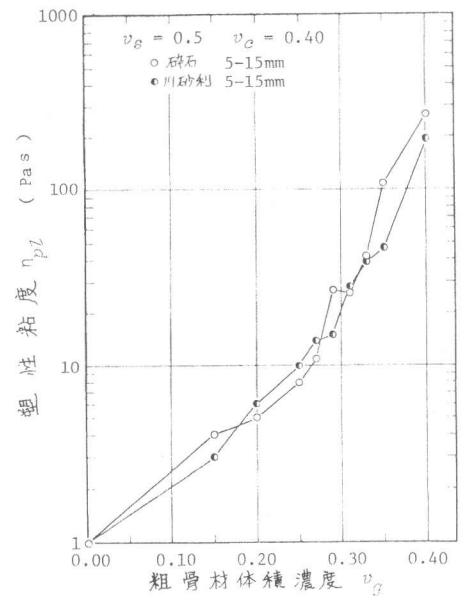


図-6 粒形と塑性粘度 $\eta_{pr}$ との関係

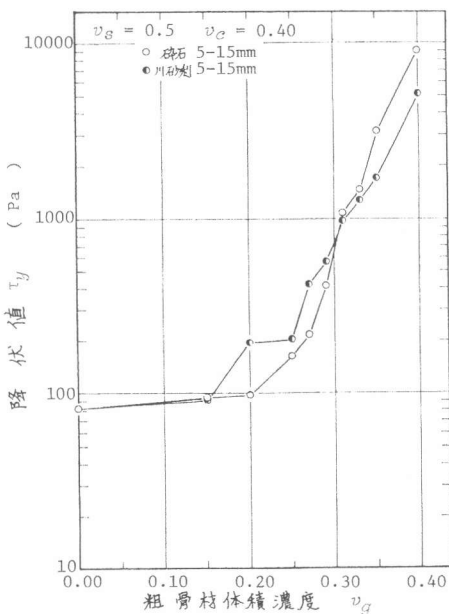


図-7 粒形と降伏値 $\tau_y$ との関係

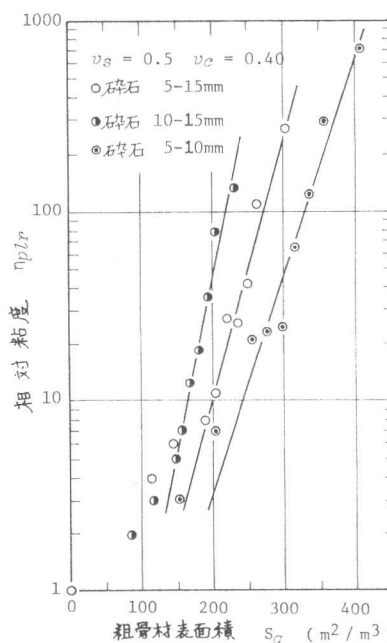


図-8 粗骨材表面積 $S_g$ と相対粘度 $\eta_{pr}$ との関係

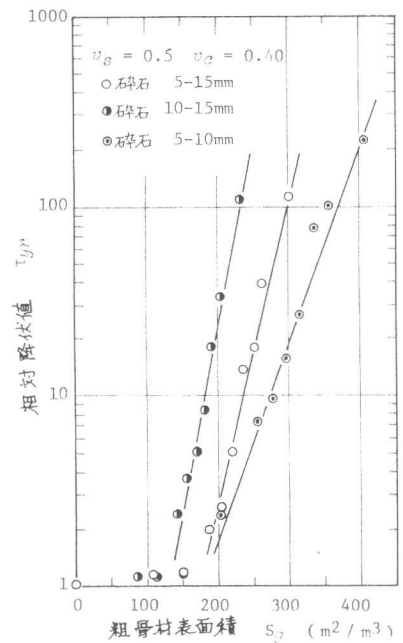


図-9 粗骨材表面積 $S_g$ と相対降伏値 $\tau_{yr}$ との関係

粗骨材要因のみでなく、このようなモルタルとの相互作用についても考慮する必要があると考えられる。

(A) スランプ値とレオロジー定数との関係 図-10に示されているように、粗骨材の粒度、粒形およびモルタルの性質の違いに関係なく、スランプ値と $\tau_y$ とは高い相関関係があると思われる。スランプ値と $\tau_{pe}$ との間も同様に、 $\log \tau_{pe} = -0.109SL + 2.928$  ( $r = -0.959$ ) となり、スランプ試験によって $\tau_y$ および $\tau_{pe}$ の値を推定することが可能であると考えられる。したがって、 $\tau_{pe}$ と $\tau_y$ との間もよい相関関係があることになり、図-11に示されているように、粗骨材の粒度、粒形およびモルタルの性質の違いに関係なく、よい相関関係がある結果が得られている。

また、たとえばスランプ値が $8 \pm 1$  cmのコンクリートの流動曲線を示すと図-12のようになり、曲線の勾配が小さい、すなわち $\tau_{pe}$ が大きいと $\tau_y$ も大きくなっている。したがって、今回対象とした配合の範囲のコンクリートでは、 $\tau_{pe}$ と $\tau_y$ とが独立に変化を示しておらず、Tattersallが述べているTwo-point testを行わなくても、スランプ試験のみでレオロジー的性質が測定・定量化できる結果と考えられる。

#### 4. まとめ

本実験の範囲内で得られた結果は次のようである。

(1) モルタルの性質および粗骨材の粒形が一定の場合、 $v_g$ の増加とともにレオロジー定数は増大し、また、同一 $v_g$ に対しては、粒度によって $\tau_{pe}$ および $\tau_y$ が異なり、フレッシュコンクリートのレオロジー構成式を求めるためには、粗骨材の量と粒度とを表わす指標を求める必要がある。

(2) モルタルの性質および粗骨材粒度を固定した場合、 $v_g$ が0.33位より大きくなると、同一 $v_g$ に対して粒形による変化が大となり、粒形の影響も考慮する必要がある。

(3) 粗骨材表面積 $S_g$ は、粗骨材の量と粒度とを同時に表わす指標としては不十分であり、今後、粗骨材の真の表面積に近いものが得られるような測定法ならずに新しい指標を検討する必要がある。

(4) 粗骨材の量、粒度、粒形およびモルタルの性質の相違に関係なく、スランプ値は、 $\tau_y$ および $\tau_{pe}$ とそれぞれ高い相関関係が得られており、 $\tau_y$ と $\tau_{pe}$ との間にもよい相関がある。

最後に、本実験を行うに当たり、徳島大学コンクリート工学研究室の諸氏に多大の御協力をいただきましたことに深く感謝致します。

#### <参考文献>

- (1) 岡小天; 材料, Vol. 12, PP. 314-316, 1963.
- (2) 松尾新一郎; セメント技術年報, Vol. 4, PP. 183-192, 1950.
- (3) 近藤明生他; 土木学会中国四国支部第30回学術講演会概要集, PP. 191-192, 1978.
- (4) Tattersall; Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 88, PP. 169-172, 1973.

表-3 スランプ値が $8 \pm 1$  cmのコンクリートの降伏値 $\tau_y$ と塑性粘度 $\tau_{pe}$

種類	粒度	NO.	$v_c$	$v_g$	SL. $8 \pm 1$ cm	
					$\tau_y$	$\tau_{pe}$
碎石	5-15mm	1	0.42	0.29	1397	38
		2	0.42	0.31	3245	110
		3	0.40	0.35	3164	109
	10-15mm	4	0.40	0.35	2725	77
川砂利	5-15mm	5	0.40	0.40	5126	194

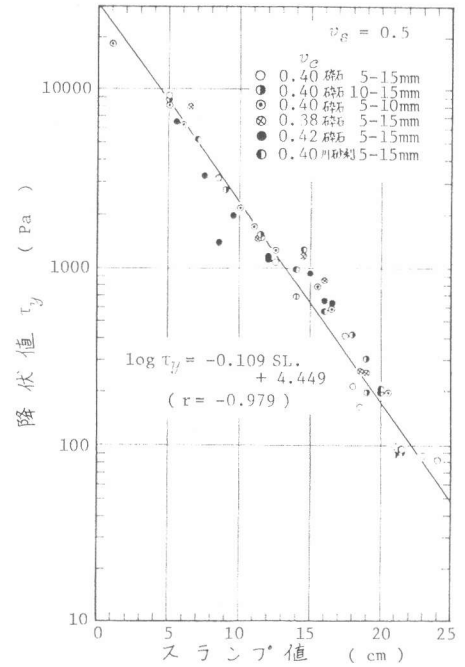


図-10 スランプ値と降伏値 $\tau_y$ との関係

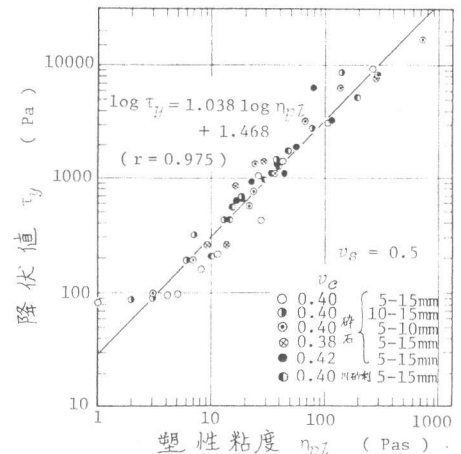


図-11 塑性粘度 $\tau_{pe}$ と降伏値 $\tau_y$ との関係

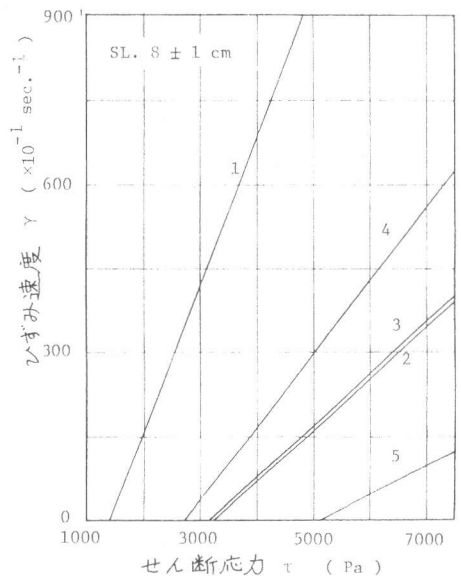


図-12 スランプ値が $8 \pm 1$  cmのコンクリートの流動曲線