

まだ固まらないコンクリートのレオロジー 定数測定法に関する一提案

A PROPOSAL ON THE METHOD FOR THE ESTIMATION OF RHEOLOGICAL QUANTITIES OF FRESH CONCRETE

村 田 二 郎*・菊 川 浩 治**

By Jiro MURATA and Hiroji KIKUKAWA

1. 結 言

ワーカビリティ、フィニッシュビリティ、ポンパビリティなどのまだ固まらないコンクリートの性質は非常に複雑であるため、現在のところまだ定性的にこれらを表示するにとどまっている。しかし、まだ固まらないコンクリートの性状を明らかにし、施工の合理化をはかるためには、上記の諸性質を数量的に解析することが、きわめて重要であると思われる。

そこで、まだ固まらないコンクリートをレオロジー的に考察し、レオロジー定数を用いてワーカビリティなどを定量的に表示しようとする試みが国内、国外を問わず活発に行われている^{1)~3)}。

レオロジー定数の測定法には種々の方法があるが、その中で回転粘度計を用いる方法がコンクリートに適しているといわれている^{4), 5)}。しかし、従来、回転粘度計によって得られているレオロジー定数は、測定方法の不備のため、研究者によって測定値が相当に相違し、物理量として活用されていない。これは、容器内試料の流動状態が、正確に把握されていないことによると考えられる。

本研究は、回転粘度計によってコンクリートの塑性粘度、降伏応力などのレオロジー定数が容器寸法その他にかかわらず一定値となる手法を示し、さらに、この方法が若干煩雑であることから、その簡易法についても検討し、実用的な簡易法をも提案したものである。

回転粘度計を用いてコンクリートのレオロジー定数を測定する場合、従来一般に行われている方法は、内外円筒と試料との間に相対移動がなく、かつ低速回転時を除いて容器内全試料が流動していると仮定しているの

で、容器内試料の実際の流動状態については、なんら考慮されていない。しかし、試料の実際の流動は、円筒壁面には相対移動(スリップ)があり、また、高速回転時においても、一般に容器内全試料は流動していない^{6), 7)}。したがって、回転粘度計によるレオロジー定数の測定においては、試料の流速分布を実測することが重要であると思われる。

ここに提案する方法は、内円筒回転型粘度計を用い、8mm カメラとメモーション測定装置を組み合わせ、容器内試料の流速分布を測定して、内円筒に近接する試料の流速と試料の流動領域の半径を決定し、これらを用いてコンシステンシー曲線を描き、塑性粘度および降伏応力を算定するものである。

なお、回転粘度計によって求まるレオロジー定数のうち降伏応力については、測定値のばらつきがやや大きいので、ばらつき小さい試験方法として斜面試験法を考察し、その機構および試験結果について付記した。

2. 回転粘度計によるレオロジー定数測定方法

(1) 測定用機器

実験に用いた回転粘度計は内円筒回転型で、その容器寸法は内円筒(ロータ)半径 7 cm, 長さ 24 cm, 外円筒半径 11.5 cm である。また、撮影に用いた 8mm カメラは Canon オートズーム 1014 で、その性能は接写距離 189 mm, 高速撮影装置(コマスピード最大 54 コマ/秒)およびフィルムカウンターを装備している。解析用メモーション測定装置は富士メモーション MA 60 で、映写のコマ送りスピードを任意に調節でき、さらに、フィルムの停止状態での映写および逆転映写もできるようになっている。また、コマ数のカウンターが兼備されている。

* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 名城大学助教授 理工学部土木工学科

試料の流動状態の撮影および解析方法は次のとおりである。

(2) 容器内試料の流動状態の撮影およびその再現

回転粘度計において、試料の流動を正確に測定するには、あらかじめ、試料流動の撮影区間および撮影面を正確に設定する必要がある。したがって、撮影開始前にロータおよび外円筒の円周上に、測定位置および区間を定め標点を付した。この場合、便宜的に円周の 1/2, 1/4 および 1/8 などに測定区間を設定し標点を付すと、あとの試料の流動速度を計算するうえで便利である。

撮影用カメラは、試料の流動範囲をなるべく広範囲に撮影できるように工夫して据付けた。

次に、1000 ワットのムービーライトを用いて試料面を照らし、ロータの低速状態から撮影を開始した。この場合、カメラのピントの正確さを欠くと試料の流動を再現する場合の解析が困難となるので特に注意した。ロータの回転数は 10 rpm を最初を選び以後 10 rpm の間隔で順次高速回転まで断続的に撮影した。なお、試料のコンシステンシーの程度によるが、ロータの回転数が 120 rpm 程度に増加すると、コンシステンシー曲線での V-P の関係は S 点付近にきて、曲線が急速に上昇する(図-4 参照)。したがって、多少の余裕をみて、ロータの回転数として 150 rpm 程度まで撮影すれば十分であった。試料面には、浮子として発泡スチロールの粉末を浮かせて標点とした。なお、測定誤差を少なくするため、カメラのコマスピードは、ロータの回転速度が 60 rpm 以下の場合 24 コマ/秒、60 rpm 以上の場合 54 コマ/秒とした。

容器内試料の流動状態は、解析用メモーション装置によって再現した。その配置を図-1 に示す。まず、スクリーン上に映し出された映像に基づき、スクリーンのガラス板上にセロテープを貼付して、正確に目盛り、

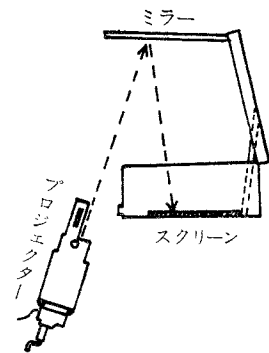


図-1 メモーション測定装置の配置図

測定区間および測定位置を定めた。ロータの低速回転から映写を開始し、スクリーン上の測定区間を浮子が移動するに要した時間を、ストップウォッチで測定した。この場合の流速はロータの回転数を基準にとって計算した。映写機のコマスピードは、測定できる範囲内でスローモーションとした。

(3) 試料の流速分布

上記(2)に従って測定したコンクリートの流速分布の例を図-2 に示す。流速を測定した測点は、ロータ壁面から 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 cm および 4.3 cm とし、図-2 にはロータ回転数 60 rpm の場合について例示してある。なお、例示したコンクリートは、粗骨材の最大寸法 15 mm, W/C=55%, s/a=44%, スランプ 16 cm, 20.5 cm および 24.5 cm の3種である。これらの配合の詳細は表-1 に示した。いずれも試験中の分離を防ぐため、セルローズ系保水性減水剤 NL 1850 をセメント重量の 0.25% 用いている。

図-2 に流速分布の計算値も併記した。ここにいう計算値とは、既往の文献⁹⁾を参考にしてロータ近傍(0.2 cm の位置)の試料の実測流速と、実測した試料の流動領域の半径 r_0 を用い、コンシステンシー曲線を描いて

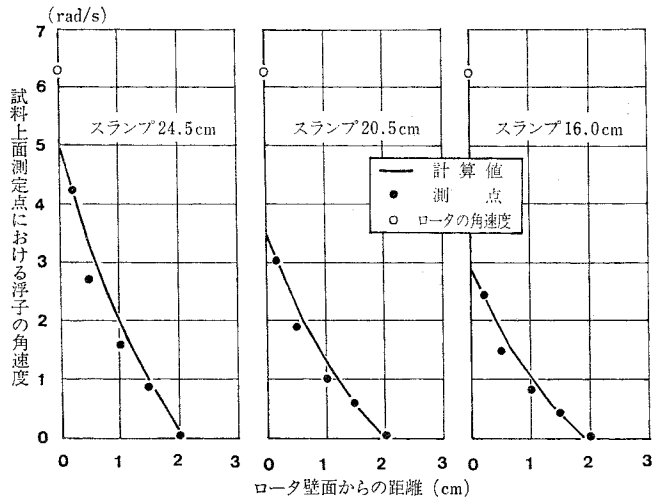


図-2 容器内試料の流速分布(ロータ回転数 60 rpm の場合) W/C=55%, s/a=44%, s/c=1.5, 1.8 および 2.0

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				摘 要
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
15	27~28	1.5~2	55	44	287	522	626	796	混和剤は保水性減水剤 NL 1850 を C×0.25% 使用した。
15	24~25	1.5~2	55	44	252	459	689	876	
15	19~20	1.5~2	55	44	225	410	737	939	
15	14~15	1.5~2	55	44	210	382	765	973	
15	9~10	1.5~2	55	44	197	358	788	1003	

塑性粘度 η_{pl} および降伏応力 τ_f を求め (この求め方は (4) に述べる方法と同じ), 式 (1) から計算したものである. 式 (1) は内円筒回転型の系にレオロジー基礎式を適用して得たものである^{9),10)}.

$$\dot{\theta} = \left[\frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{r}{r_0} \right] / \eta_{pl} \dots (1)$$

ここに,

$\dot{\theta}$: 半径 r における試料の角速度 (rad/sec)

M : トルク (g·cm)

r_0 : 試料の流動領域の外側半径 (cm)

r : 試料の流動部の任意点の半径 (cm)

h : 試料の深さ (cm)

τ_f : 降伏応力 (g/cm²)

η_{pl} : 塑性粘度 (poise)

図-2 は内円筒回転型粘度計における容器内の試料の流速分布の例であって, 容器内の外縁部の試料は流動していないこと, およびロータの角速度に比べ, これに接する試料の角速度は相当に小さいことが認められる. しかし, 中間点の角速度は計算値とよく一致している. このことから従来得られているモルタル, コンクリートのコンシステンシー曲線の形状とも合わせ考えれば, モルタル, コンクリートがほぼビンガム流動に従うと考えてよいことを示すものである. なお, 図-2 において試料のコンシステンシーが大きいかほどロータ近傍の試料の角速度が大となり, ロータと試料間のスリップが少ないことを示している. また, 図-2 でロータ回転数 60 rpm を基準に選んだ理由は, ロータの回転が 60 rpm 以上になると試料の流動はほぼ一定範囲に取れんするからである (図-3 参照).

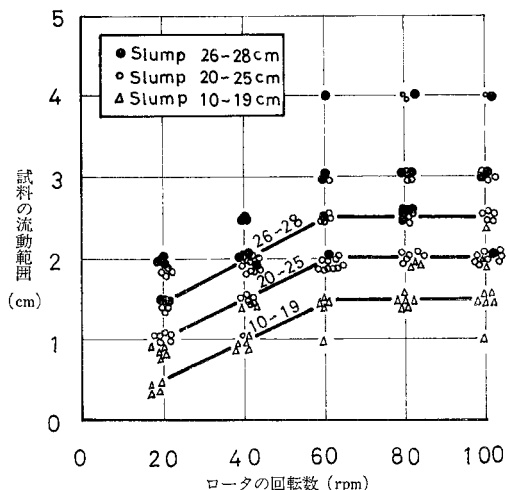


図-3 回転粘度計におけるロータ回転数と試料の流動範囲
W/C=45~65%, s/a=35~60%

(4) レオロジー定数の決定法

レオロジー定数を求める手順は以下のようである.

① 横軸にロータ壁面からの距離をとり, 縦軸に試料表面各点の角速度をとって流速分布曲線を描く (図-2 参照).

② この流速分布曲線を 2 次曲線に近似させ, 横軸との交点を求めることによって, 試料の流動部の外半径 r_0 を決定する.

③ ロータになるべく近い点の試料の実測流速, たとえばロータ壁面より 0.2 cm の点 (半径 $r_{0.2}$) の流速 $\theta_{0.2}$ と r_0 を用いてコンシステンシー曲線を描く.

④ コンシステンシー曲線の縦軸は

$$V = \frac{2\theta_{0.2}}{1 - \left(\frac{r_{0.2}}{r_0}\right)^2}$$

横軸は

$$P = \frac{M}{2\pi r_{0.2}^2 h}$$

とする (図-4 参照). この V - P 図に, ロータの各回転数におけるロータ壁面から 0.2 cm の試料の角速度およびロータのトルクを測定し, V と P の値を計算した結果を打点し, 最小二乗法によって直線式 $V = \alpha P - \beta$ をつくる. 塑性粘度は, この直線の逆勾配として求める. すなわち,

$$\eta_{pl} = \frac{1}{\alpha} \times 980 \text{ (dyne}\cdot\text{s/cm}^2\text{=poise)}$$

降伏応力は 図-4 から, $V=0$ のとき

$$P = \frac{\beta}{\alpha} = \tau_a$$

であるから

$$\tau_f = \frac{\left(\frac{r_{0.2}}{r_0}\right)^2 - 1}{2 \ln \left(\frac{r_{0.2}}{r_0}\right)} \cdot \tau_a \text{ (g/cm}^2\text{)}$$

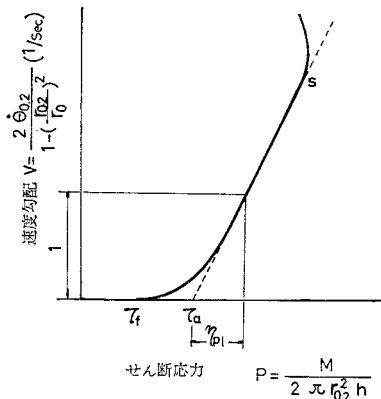


図-4 回転粘度計によるコンクリートのコンシステンシー曲線

として求める。

以上のように、この方法は多数の測定の流速を求めるので、この方法を多点法とよぶことにする。

3. 多点法による試験値の信頼度

多点法によって得られる試験値が回転粘度計の諸元によって左右されない普遍的なものであるかどうかを確かめるため、試験値に及ぼすロータ寸法の影響ならびに試験値のばらつきについて検討した¹⁾。

(1) ロータの半径の影響

粗骨材の最大寸法 15 mm、水セメント比 55%、スランプ約 15~27 cm の範囲の 4 種の配合のコンクリートを用い、ロータ半径を 6 cm、7 cm および 8 cm に変化させた場合のレオロジー定数を測定した。試験の結果は表-2 のようであって、これらは容器内試料の 5 測点について流速分布を測定することによって求めたものである。

表-2 において、単位セメント量を変化させ、あるいはコンシステンシーを変えた場合の配合のコンクリートに対し、ロータ半径が相違しても同一配合に対しては、塑性粘度はほぼ同一となった。流速分布を考慮せず、従来の慣用的な方法によって塑性粘度を算定すると、たとえば、スランプ 15 cm 程度の場合、ロータ半径 6 cm、7 cm および 8 cm に対し、それぞれ 115.9 poise、142.3 poise および 144.7 poise となり、みかけ上大きい差異が生ずる。以上のことから、試料の流速分布を考慮することにより、塑性粘度はロータ半径に左右されないものであることを示唆している。また、降伏応力も、ばらつきはあるがだいたい同様な傾向にあると考えられる。

(2) ロータの長さの影響

水セメント比 40%、フロー約 245 mm のモルタルを用い、ロータの長さを 12 cm、16 cm、20 cm および 24 cm に変化させた場合のレオロジー定数を比較した。この場合もロータの末端における吸収トルクの影響を除くために、他の実験の場合と同様にロータ底面と容器との間に厚さ 5 mm の硬練りモルタル層 (C : S : W = 1 : 3.5 : 0.4) を敷いて試験を行った (これは、予備実験において、容器底面との間に各種配合のモルタルを敷きならし容器底面とロータ底面とで円盤回転粘度計を形成させ、ロータを回転したときのトルクが零となるモルタルの配合を決定したものである)。

試験の結果は表-3 のようである。表-3 において、ロータの長さが変化しても、塑性粘度はほぼ一定値を示し、降伏応力はばらつきが大きく明確でないがだいたい

表-2 測定値に及ぼすロータ半径の影響 (粗骨材最大寸法 15 mm, W/C=55%, s/a=44%)

単 セメント 位置 (kg/m ³)	位 置 比 S/C	スランプ (cm)	ロータ半径 (cm)	測 定 値	
				η_{pl} (poise)	τ_f (g/cm ²)
522	1.2	27.5	8	47.8	0.68
			7	50.9	0.72
			6	43.9	0.41
459	1.5	25.0	8	111.0	0.80
			7	115.1	0.74
			6	103.3	0.49
410	1.8	20.0	8	110.4	0.86
			7	113.8	0.68
			6	110.8	0.58
382	2.0	15.0	8	149.5	0.64
			7	133.6	0.30
			6	127.1	0.44

表-3 測定値に及ぼすロータの長さの影響
W/C=40%, S/C=0.5, フロー 240~250 mm

ロータの長さ (cm)	24	20	16	12
η_{pl} (poise)	63.0	66.3	55.9	55.7
	57.8	63.7	58.3	61.2
	55.2	68.9	57.4	70.1
τ_f (g/cm ²)	0.39	0.20	0.17	0.49
	0.41	0.38	0.35	0.43
	0.61	0.57	0.50	0.39

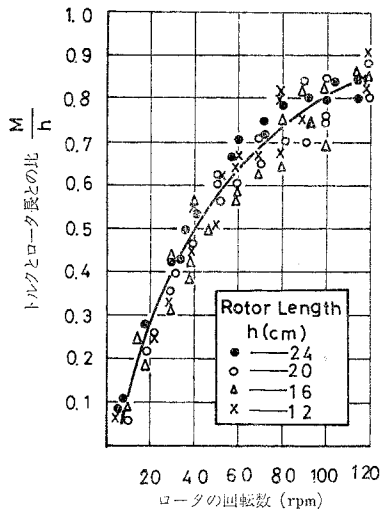


図-5 ロータの回転数と M/h との関係
W/C=40%, S/C=0.5, フロー 240~250 mm

一定と考えられる。

また、図-5 はこの実験結果をロータの単位長さ当りのトルク (M/h) と回転数の関係で示したもので、ロータの長さが変化しても、M/h にほとんど差異は認められない。このことは、多点法の基礎となっている試料の流速分布の測定において、試料表面の移動のみを実測しているが、その値は容器内試料全体の流速を表わすと考

えてよいことを示している。

以上、ロータの寸法（半径および長さ）が変化した場合に試験値に及ぼす影響について調べた結果、試料の配合が同一の場合には、容器寸法にかかわらずほぼ同一の値が得られた。したがって、多点法によって得られるレオロジー定数は、回転粘度計の諸元に無関係な普遍性のあるものということができると思われる。

(3) 試験値のばらつき

粗骨材の最大寸法 15 mm, 水セメント比 55%, スランプ約 9~27 cm の範囲の 5 種の配合のコンクリートについて、塑性粘度および降伏応力の試験値のばらつきを検討した。

試験の結果を表-4 に示す。この表において、レオロジー定数の変動係数は塑性粘度の場合、5.1~12.6%, 平均約 9% であり、降伏応力の場合、10.1~20.5%, 平均約 17% となっている。これらは必ずしも熟練者が実験を行った結果ではないので、試験値のばらつきは比較的大きい。特に、降伏応力のばらつきが大となっているのはコンシステンシー曲線における直線部の設定に際し、わずかな勾配の変化でも、P 軸を切る点は相当に変化すること等によるのであって、今後試験値のばらつきを少なくするための試験技術について検討を重ねる必要がある。

表-4 試験値のばらつき
(粗骨材最大寸法 15 mm)

単位セメント量 (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	粘度のばらつき				降伏値のばらつき			
			η_{pl} (poise)	平均値	標準偏差	変動係数	τ_f (g/cm ²)	平均値	標準偏差	変動係数
522	55	44	42.4	46.5	5.9	12.6	0.41	0.33	0.07	19.8
			50.5				0.34			
			38.6				0.29			
			48.4				0.24			
			52.7				0.36			
459	55	44	96.2	101.6	10.0	9.9	0.29	0.32	0.03	10.1
			94.8				0.30			
			114.7				0.32			
			110.1				0.30			
			92.4				0.37			
410	55	44	136.6	129.8	9.2	7.1	0.41	0.42	0.07	17.4
			120.9				0.48			
			128.8				0.34			
			141.4				0.50			
			121.1				0.35			
382	55	44	132.9	138.0	12.4	9.0	0.57	0.63	0.13	20.5
			123.6				0.63			
			147.5				0.70			
			154.0				0.45			
			132.1				0.79			
358	55	44	153.6	161.7	8.2	5.1	0.96	0.84	0.16	18.9
			151.5				1.04			
			166.5				0.81			
			154.3				0.70			
			182.8				0.68			

4. 簡易測定法

多点法は容器内試料上面の多数の測点の流速を求める必要があり、試験が煩雑である。そこで、以下に述べる数種の簡易法を考案し、それぞれについて検討した。

(1) 3 点 法

容器内試料の流動部における 3 点の流速を実測し、次式から直接 η_{pl}, τ_f を算定する。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{pl}(\theta_1 - \theta_2) &= \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) + \tau_f \ln \frac{r_1}{r_2} \\ \eta_{pl}(\theta_1 - \theta_3) &= \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) + \tau_f \ln \frac{r_1}{r_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

r_1, r_2, r_3 : 各測点の半径

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$: r_1, r_2, r_3 における流速

式(2)は、この種回転系のレオロジー方程式を積分して得た

$$\eta_{pl}\dot{\theta} = \frac{M}{4\pi h r^2} + \tau_f \ln + C$$

において、一定のロータ回転数のときの境界条件 $r=r_1, \dot{\theta}=\dot{\theta}_1$ を用いて求めたものである。したがって、数段階の回転数 (60 rpm 以上) における η_{pl}, τ_f を求め、それらを平均して試料の塑性粘度および降伏応力とする。

(2) 2 点 法

試料の流動部における 2 点の流速を実測し、その流動勾配を用い、コンシステンシー曲線を描いて η_{pl}, τ_f を決定する¹²⁾。内円筒回転型の回転粘度計を用いる場合、コンシステンシー曲線の縦軸は

$$V = \frac{2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}$$

横軸は

$$P = \frac{M}{2\pi h r_1^2}$$

となる。

上記(1)および(2)の方法は、いずれも 2 点以上の流速の実測が必要であって、流速を測定するための適当な機器を用いなければならない。そこで、さらに簡易で実用的な方法として次の 2 つの方法が考えられる。

(3) 1 点 法

これは試料の流動部における 1 点の流速を実

測し、試料のコンシステンシーに応じて流動範囲 r_0 を仮定し、コンシステンシー曲線からレオロジー定数を決定する方法である。この場合、測点はなるべくロータに近接した点（距離約 0.2 cm）を選び、ロータと試料間の相対移動量の誤差が小さくなるよう配慮する。ロータからやや離れた点（たとえば約 0.5 cm）の流速を測定すると、その点の試料の移動が相対的に遅く、精度上好ましいように思われるが、実際にはこの点で得られた測定結果に相当のばらつきがあり、ロータから離れた点での試料の流動測定は適当でないと思われる¹³⁾。

コンシステンシーを広範囲に変え多点法によって求めた試料の流動範囲 r_0 の実験結果は 図-6 のようである。図-6 によれば、一点法に用いる r_0 を仮定できるが、図-6 に認められるように、 r_0 はコンシステンシーによってそれほど大幅には変化しないので、実用にはこれを簡易化した表-5 を用いてよいと考えられる。

(4) 流速を実測しない方法 (0 点法)

容器内試料の流動範囲 r_0 とロータ壁面の試料のスリップの程度を、試料のコンシステンシーに応じて実験結

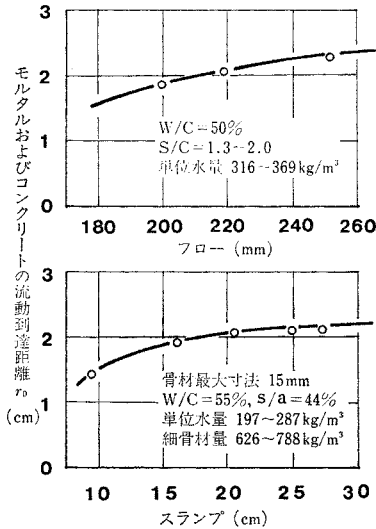


図-6 モルタルおよびコンクリートの流動到達距離 (ロータ回転数 60 rpm の場合)

表-5 コンシステンシーの変化によるモルタルおよびコンクリートの流動範囲 r_0 とスリップ係数

モルタル	フロー (mm)	180 以上 200 未満	200 以上 220 未満	220 以上 240 未満	240 以上 260 未満	260 以上
	r_0 (cm)		8.8	9.0	9.2	9.3
スリップ係数		0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
コンクリート	スランプ (cm)	10 以上 12 未満	12 以上 15 未満	15 以上 20 未満	20 以上 25 未満	25 以上
	r_0 (cm)		8.6	8.8	9.0	9.1
スリップ係数		0.60	0.55	0.45	0.30	0.20

果から仮定できれば、ロータに接するコンクリートの流速をスリップ係数によって推定し、ロータの回転数およびトルクのみを測定し、コンシステンシー曲線を描いてレオロジー定数を求めることができる。スリップの程度はロータの角速度を $\dot{\Omega}$ 、ロータに接する試料の角速度を $\dot{\theta}$ とすれば、

$$\beta = \frac{\dot{\theta}}{1 - \dot{\Omega}}$$

として求められる。以下、この β をスリップ係数とよぶことにする。

種々のコンシステンシーの試料について、スリップ係

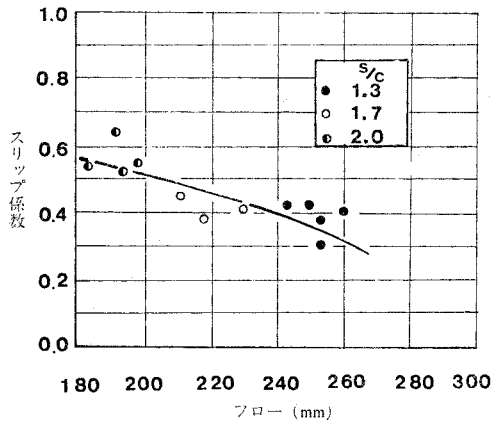


図-7 モルタルのコンシステンシーとロータ壁面におけるスリップの程度 (ロータ回転数 60 rpm の場合) $W/C=50\%$, $S/C=1.3\sim 2.0$, $W=316\sim 369 \text{ kg/m}^3$

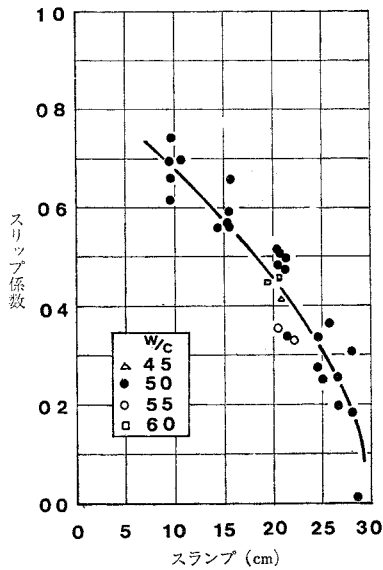


図-8 コンクリートのコンシステンシーとロータ壁面におけるスリップの程度 (ロータ回転数 60 rpm の場合) $W/C=45\sim 60\%$, $s/a=35\sim 60\%$, $W=197\sim 360 \text{ kg/m}^3$

数を求めた結果は 図-7, 8 のようである。これらの図に示されるように、スリップ係数はモルタル、コンクリートの $S/C, W/C$ 等にかかわらず、コンシステンシーによってだいたい定まると考えてよい。実用上は、これらの実験結果をもとにして作製したコンシステンシーとスリップ係数との関係（たとえば 表-5）を用いるのが便利である。

これらの簡易法によって求めた塑性粘度を多点法によって求めた値とを対比して、表-6 および 表-7 に示した。表-6 および 表-7 において、各配合に対する試験値は、1 試料に対して多点法で試験を行い、その流速測点のうち、適当な 3 点、2 点または 1 点の流速を用い、3 点法、2 点法または 1 点法の試験値としたものである。

表-6 各種測定法によるレオロジー定数測定値（モルタルの場合）

配合比		フロー (mm)	項目	多点法	3点法	2点法	1点法	0点法	慣用法
W/C	s/c								
0.45	1.25	258	τ_f	0.560	0.566 (1.01)	0.606 (1.08)	0.556 (0.99)	0.582 (1.04)	0.448 (0.8)
			η_{pl}	14	14 (1)	10 (0.71)	14 (1)	13 (0.93)	18 (1.29)
0.45	1.50	247	τ_f	0.718	0.711 (0.99)	0.807 (1.12)	0.719 (1.00)	0.747 (1.04)	0.601 (0.84)
			η_{pl}	22	22 (1)	14 (0.64)	21 (0.95)	20 (0.91)	20 (0.91)
0.45	1.75	225	τ_f	1.432	1.417 (0.99)	1.340 (0.94)	1.369 (0.96)	1.373 (0.96)	1.163 (0.81)
			η_{pl}	24	24 (1)	25 (1.04)	28 (1.17)	28 (1.17)	36 (1.5)
0.45	2.00	221	τ_f	1.632	1.632 (1)	1.491 (0.91)	1.632 (1)	0.907 (0.56)	1.242 (0.76)
			η_{pl}	69	70 (1.01)	60 (0.87)	70 (1.01)	117 (1.70)	74 (1.07)
0.45	2.25	211	τ_f	1.492	1.549 (1.04)	1.472 (0.99)	1.480 (0.99)	0.618 (0.41)	0.602 (0.40)
			η_{pl}	68	65 (0.96)	69 (1.01)	87 (1.28)	132 (1.94)	120 (1.76)
0.45	2.50	198	τ_f	1.450	1.450 (1)	1.418 (0.98)	1.366 (0.94)	0.340 (0.23)	1.316 (0.91)
			η_{pl}	77	77 (1)	78 (1.01)	76 (1.51)	189 (2.45)	86 (1.12)
0.55	2.00	281	τ_f	0.220	0.212 (0.96)	0.162 (0.74)	0.216 (0.98)	0.296 (1.35)	0.256 (1.16)
			η_{pl}	28	28 (1)	28 (1)	26 (0.93)	23 (0.82)	29 (1.04)
0.55	2.25	261	τ_f	0.365	0.364 (0.99)	0.353 (0.97)	0.361 (0.99)	0.343 (0.94)	0.293 (0.80)
			η_{pl}	30	29 (0.97)	25 (0.83)	30 (1)	32 (1.07)	39 (1.3)
0.55	2.50	235	τ_f	0.603	0.614 (1.02)	0.604 (1.00)	0.602 (0.99)	0.574 (0.95)	0.486 (0.81)
			η_{pl}	36	35 (0.97)	27 (0.75)	38 (1.06)	41 (1.14)	49 (1.36)
0.55	2.75	228	τ_f	0.766	0.787 (1.03)	0.705 (0.92)	0.787 (1.03)	0.325 (0.42)	0.472 (0.62)
			η_{pl}	42	40 (0.95)	36 (0.86)	40 (0.95)	60 (1.43)	60 (1.43)
0.55	3.00	218	τ_f	0.915	0.916 (1.00)	1.156 (1.26)	0.905 (0.99)	0.806 (0.88)	0.594 (0.65)
			η_{pl}	43	43 (1)	31 (0.72)	46 (1.07)	49 (1.14)	75 (1.74)
0.55	3.25	210	τ_f	1.101	1.255 (1.14)	0.966 (0.88)	1.241 (1.13)	0.557 (0.51)	0.418 (0.38)
			η_{pl}	53	54 (1.02)	63 (1.19)	57 (1.08)	76 (1.43)	97 (1.83)
平均比			τ_f	1.00	1.01	0.98	1.00	0.77	0.75
			η_{pl}	1.00	0.99	0.89	1.08	1.34	1.36

表-7 各種測定法によるレオロジー定数測定値（コンクリートの場合）

配合比			スランブ (cm)	項目	多点法	2点法	1点法	0点法	慣用法
W/C	s/a	s/c							
0.55	0.44	1.20	27.3	τ_f	0.328	0.352 (1.07)	0.328 (1)	0.306 (0.93)	0.266 (0.81)
				η_{pl}	47	53 (1.13)	47 (1)	78 (1.66)	61 (1.30)
0.55	0.44	1.50	25.1	τ_f	0.316	0.970 (3.07)	0.310 (0.98)	0.856 (2.71)	0.606 (1.92)
				η_{pl}	102	101 (0.99)	107 (1.05)	124 (1.22)	91 (0.89)
0.55	0.44	1.80	20.7	τ_f	0.416	1.256 (3.02)	0.414 (1.00)	0.730 (1.75)	0.518 (1.25)
				η_{pl}	130	109 (0.84)	133 (1.02)	135 (1.04)	99 (0.76)
0.55	0.44	2.00	15.5	τ_f	0.628	1.112 (1.77)	0.622 (0.99)	0.630 (1.00)	0.432 (0.69)
				η_{pl}	138	130 (0.94)	144 (1.04)	197 (1.43)	114 (0.83)
0.55	0.44	2.20	9.3	τ_f	0.838	2.062 (2.46)	0.800 (0.95)	1.060 (1.26)	0.534 (0.64)
				η_{pl}	162	239 (1.48)	191 (1.18)	372 (2.30)	133 (0.82)
平均比				τ_f	1.00	2.29	0.98	1.53	1.06
				η_{pl}	1.00	1.08	1.06	1.53	0.92

表一6 の3点法および2点法は、流速測定点を適切に選定し得た場合には、多点法とほとんど一致する値が得られる。また、表一6 および表一7 において、1点法も流速測定点および流動範囲 r_0 を適正に選定できれば、多点法に近似した試験値が得られている。多点法と比較して塑性粘度で平均比約 1.06~1.08, 降伏応力で平均比約 0.98~1.00 である。しかし、0点法の場合には、スリップ係数と流動範囲の両者を二重に仮定するため、多点法の試験値と比較的よく一致する場合もあり、また、著しく差違が生ずる場合もある。

なお、慣用法とは、内外円筒壁面とこれに接する試料との間に相対移動がなく、かつ、容器内全試料が流動すると仮定するもので^{(4)・(5)}、従来一般に行われている方法であるが、その試験値は多点法の場合と相当に相違し、塑性粘度で平均比約 0.92~1.36, 降伏応力で平均比約 0.75~1.06 となっている。

以上の実験結果から、流速測定点および流動範囲の適正な選定を前提として、1点法が簡易測定として推奨できると思われる。

5. 斜面試験法による降伏応力の測定

多点法を用いる場合でも、回転粘度計による降伏応力の測定値のばらつきは比較的大きく、10~20% に達した。しかし、降伏応力は外力によるまだ固まらないコンクリートの変形計算の重要な要素となるものであるから、試験値の変動が少ない測定法の考案が特に望まれる。

斜面試験は図一9 に示すように、平板上に軽量の底無し円筒容器をおき、これに試料を填充したのち、平板を徐々に傾斜させ、試料が連続的に移動する最小傾斜角を読み取るものである⁽⁶⁾。

本実験に用いた斜面試験機は、傾斜微動装置を備え、測角の最小目盛は 30' であって、平板上にはゴム板を張ってある。また、試料を詰める円筒は、内径 19.5 cm, 高さ 4 cm の木製とし、これを 1~4 段に重ねて試料重量を変化させた。

モルタル、コンクリートは完全な粘性流体ではなく、粒状体的性格を有するので、みかけのせん断応力は試料の重量によって、ほぼ直線的に変化し(図一10 参照)、その関係は、次式で与えられると

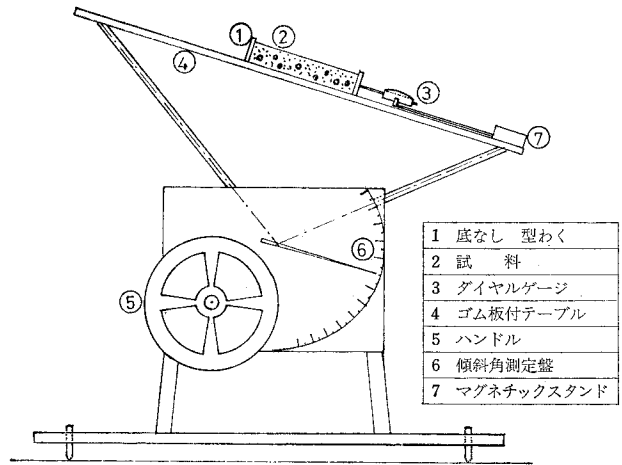
考えられる。

$$\tau = \tau_f + \frac{W}{A} \cos \theta \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (3)$$

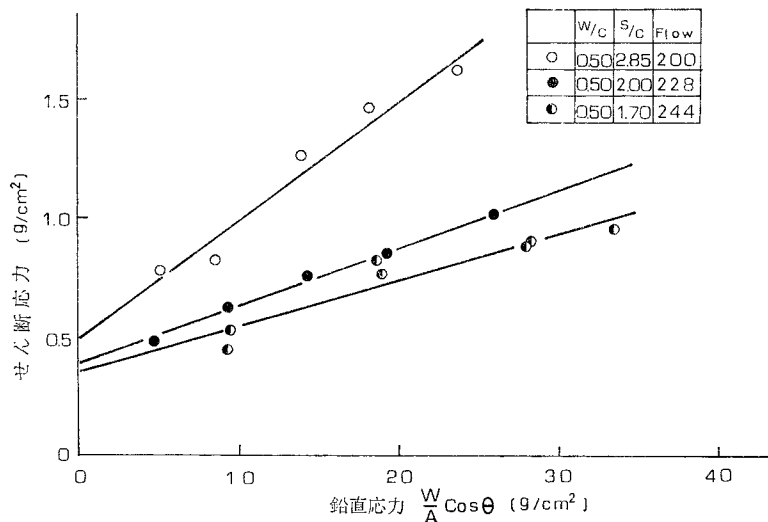
ここに、

- τ : せん断応力 (g/cm²)
- τ_f : 降伏応力 (g/cm²)
- W : 試料の重量 (g)
- A : 試料の断面積 (cm²)
- θ : 傾斜角
- ϕ : 内部摩擦角

図一10 の試験結果から式 (3) を用いて求めた降伏応力を表一8 に示す。また、2種の配合のモルタルについて求めた試験値の変動係数は、表一9 のように大約 4~6% であった。したがって、試料の降伏応力を測定する場合には、斜面試験法によるのが適当と思われる。



図一9 斜面試験装置



図一10 試料の重量とせん断応力の関係

表-8 斜面試験結果

モルタルの配 合	フロー (mm)	円筒の重ね数	垂直応力 $\frac{W}{A} \cos \theta$ (g/cm ²)	傾斜角 θ (度)	降伏応力 τ_f (g/cm ²)
W/C=0.50 S/C=2.85	200	0.5*	5.21	8.5	0.483
		1.0	8.62	5.4	
		1.5	14.40	5.0	
		2.0	18.19	4.6	
W/C=0.50 S/C=2.00	228	0.5	4.68	5.8	0.380
		1.0	9.30	3.8	
		1.5	14.33	3.2	
		2.0	19.32	2.5	
W/C=0.50 S/C=1.70	244	1.0	9.36	2.7	0.353
		1.0	9.50	3.2	
		2.0	18.73	2.5	
		2.0	18.93	2.3	
		3.0	28.12	1.8	
		3.0	28.15	1.8	
		3.5	33.71	1.6	

* 重ね数 0.5 とは、円筒の高さの中央まで試料を充填したものである。
注：保水剤として NL1800 を C×0.15% 使用

表-9 斜面試験による降伏応力試験値のばらつき

モルタルの配 合	フロー (mm)	試料の温度 (°C)	降伏応力 τ_f (g/cm ²)			
			試験値	平均値	標準偏差	変動係数
W/C=0.50 S/C=2.85	200	21.2	0.427	0.455	0.0265	5.83
	198	20.5	0.419			
	200	21.3	0.478			
	201	22.2	0.466			
W/C=0.50 S/C=1.70	200	23.0	0.483	0.346	0.0151	4.36
	240	21.1	0.320			
	244	23.0	0.353			
	244	20.9	0.358			
	242	20.9	0.348			
	244	21.2	0.358			

注：保水剤として NL1800 を C×0.15% 使用

6. 結 語

まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する研究の一環として、回転粘度計によるコンクリートのレオロジー定数測定方法および斜面試験方法について研究した結果、次のことが認められた。

(1) 従来、回転粘度計によるレオロジー定数の測定結果が研究者によって相違するおもな原因は、モルタル、コンクリートの場合、円筒壁面と試料との間に相対移動があること、および容器内全試料が流動状態にないことを見過していることによると思われる。この点に着目し、容器内試料の流速分布を実測し、これに基づいてレオロジー定数を算出する方法を提案した。

すなわち、内円筒回転型の粘度計を用いた場合について、試料表面の 5~10 点の流速を 8mm カメラと解析用メモーション装置を用いて実測し、流速分布曲線を

描いて試料の流動範囲およびロータ近傍の測点の流速を求め、これらの値を用いてコンシステンシー曲線を描き、塑性粘度および降伏応力を算定した。

この方法によれば、円筒の径および長さなど回転系の諸元が変化してもレオロジー定数試験値は、ほぼ一定となった。

したがって、この方法により、回転粘度計を用いて普遍性のあるレオロジー定数試験値を得るための 1 つの方法を提示し得たものと思われる。

(2) (1) で述べた方法は、試料表面の多数の点の流速測定を行うので、多点法とよぶ。この方法は、各回ごとにその流動範囲を求めて解析しなければならず煩雑であるので、簡易測定法について検討した。

すなわち、試料面上 3 点および 2 点の流速を実測する方法 (3 点法および 2 点法)、ロータ近傍の 1 点の流速を実測し、試料の流動範囲はコンシステンシーに応じて既往の実験結果から仮定する方法 (1 点法) と、流速の測定は行わず、ロータ壁面と試料との相対移動量および試料の流動範囲を実験結果から仮定する方法 (0 点法) 等による試験値と多点法による試験値を比較検討したのである。その結果、1 点法は、測点および試料の流動範囲を適正に選定し得た場合には、その試験値は多点法の場合とかなりよく一致することが示されたのであって、試験も容易で簡易法として適当と思われる。

(3) 回転粘度計によるレオロジー定数測定値の変動係数は、多点法を用いる場合でも、塑性粘度で約 5~10%、降伏応力で約 10~20% であった。これは熟練者による試験結果ではないが比較的大きい。降伏応力の変動係数は測定方法の性格上、ある程度大となるのは避けられないが、降伏応力は、まだ固まらないコンクリートの変形計算の重要な要素であり、今後ばらつきを小とするための試験技術について検討を重ねる必要がある。

(4) 筆者らは、モルタル、コンクリート試料が斜面上を流動する最小傾斜角を測定し、降伏応力を算定する斜面試験法をその機構、試料の流動および試験値のばらつきについて検討した。

その結果、モルタル、コンクリートは完全な粘度流体でなく、粒状体的性格も有し、試料の流動開始時のせん断応力は、試料の重量に影響されることが認められた。この点を考慮すれば、試料の降伏応力を算定でき、試験値の変動係数も大約 4~5% であった。したがって、斜面試験法は、軟練りモルタル、コンクリートの降伏応力の測定方法として適するものと思われる。

本研究の実施にあたり、日本大学講師 越川茂雄氏、東京都立大学助手 鈴木一雄氏および名城大学助手 杉山秋博氏に多大の御協力を得たことを記して謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 村田二郎：まだ固まらないコンクリートのレオロジーの研究，コンクリートジャーナル，1972.12月。
- 2) Proceeding of the RILEM Seminar on Fresh Concrete, Important properties and their Measurement, Vol. 1, 2 & 3 Leeds University, 1973.
- 3) 西林新蔵：フレッシュコンクリートの性質「レオロジー的アプローチ」，材料，1975.5月。
- 4) T.C. Powers: Properties of Fresh Concrete, Wiley, 1968.
- 5) M. Reiner (山田・柳沢共訳)：レオロジーの基礎理論，コロナ社，1969.
- 6) 菊川浩治・杉山秋博：二重円筒型回転粘度計におけるコンクリートの流速分布について，土木学会第29回年次学術講演会講演概要集，1974.
- 7) 村田二郎・菊川浩治・杉山秋博：回転粘度計におけるフレッシュコンクリートの流動解析，第29回セメント技術年報，1975.
- 8) 菊川浩治：回転粘度計におけるフレッシュコンクリートのレオロジー定数測定法，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，1975.
- 9) 村田二郎：コンクリート用回転粘度計について，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，1973.
- 10) 村田二郎・菊川浩治：試作コンクリート用回転粘度計について，土木学会第26回年次学術講演会講演概要集，1971.
- 11) 菊川浩治：回転粘度計によるレオロジー定数測定値におよぼす容器寸法の影響，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集，1976.
- 12) 長瀧重義・米倉亜州夫：回転粘度計によるモルタルの流動解析の一考察，第29回セメント技術年報，1975.
- 13) 菊川浩治・杉山秋博：モルタルおよびコンクリートのレオロジー定数測定法に関する研究，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，1978.
- 14) 村田二郎：まだ固まらないコンクリートのレオロジー的性質の活用，セメントコンクリート No. 312, 1973.
- 15) 村田二郎：コンクリートのレオロジー的性質の活用と問題点，土木学会第27回年次学術講演会講演概要集，1972.
- 16) Jiro, Murata and Yoshihide, Shimoyama: Deformation of Fresh Concrete under Static Load, Review of the 30th General Meeting-Technical Session, The Cement Association of Japan, 1976.

(1978.2.1・受付)