

モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究

STUDIES ON VISCOSITY EQUATION OF MORTAR AND CONCRETE

菊川 浩治*

By Hiroji KIKUKAWA

It has long been suggested that rationalization of concrete operation can be promoted by utilizing rheological constants obtained by viscosity equation of fresh mortar and concrete. But actually, such studies have been very few.

In this paper, the authors pay attention to the fact that mortar and concrete are a type of high concentration suspension, and the suspension medium in the mortar and concrete are considered to be respectively cement paste and mortar, the suspended particles are respectively fine and coarse aggregate.

This study aims to establish a direct estimate of the plastic viscosity, using the mortar and concrete's viscosity equation with the factors : material characteristics and mix proportions. The authors also show that the plastic viscosity obtained by using this viscosity equation is very accurate, and so very useful.

Keywords : viscosity equation, rheological constants, suspension, plastic viscosity

1. 緒 言

モルタル、コンクリートの施工性は自重、圧力、振動等の種々の外力による流動と変形の組合せと考えられるから、施工作業の自動化、システム化をはかるためにはこれらの挙動をレオロジー的に解析し、予測技術を確認することがきわめて重要である。このため、フレッシュモルタル、コンクリートに適用するレオロジーモデルを構成する物性値の把握が必須となる。従来、物性値は種々のレオメータを用いて実測されているが、いずれも試験が煩雑で熟練を要し、施工計画の立案段階における見積りや現場試験としては不向きである。

著者は、高濃度サスペンションに関する Roscoe の粘度式¹⁾を基礎として、すでにセメントペーストの粘度式を提案した²⁾。

本文は、この粘度式を拡張してモルタルおよびコンクリートの粘度式を提示し、粘度推定法について論じたものであって、練りあがり温度や練りませ後の経過時間が変化した場合についても述べている。この場合、塑性粘度はビンガム体の物性値であるから、試料はビンガム体とみなせる程度の比較的軟練りのもの、すなわち、モル

タルの場合、フロー 200 程度以上、コンクリートの場合、スランプ 12 cm 程度以上を対象としている。これより硬練りの試料の場合は、レオロジーモデルを構成する物性値が異なるので³⁾、本論文で取り扱う範囲外となり、別途研究中である。

なお、フレッシュモルタルおよびコンクリートの挙動の予測には塑性粘度のほかに降伏値も必要となるから、実用を考慮して、その簡易推定法についても述べた。

2. 使用材料

(1) セメント

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント 1 銘柄であって、その比重は 3.16、ブレン比表面積は 3 150 cm²/g、実積率は 0.55 (ブレン比表面積測定用セルによる²⁾)、凝結時間は始発 2 時間 32 分、終結 4 時間 13 分であった。

(2) 骨 材

モルタルに用いた細骨材は、その粒形、粒度が塑性粘度に与える影響を確かめるために、川砂、高炉スラグ水砕砂および相馬砂とし、粒度調整により川砂は 12 種、水砕砂は 8 種、川砂と水砕砂との混合砂は 11 種、相馬砂は 1 種、合計 32 種の粒度 (粗粒率 1.27~4.06) として用いた。これらの細骨材の物理試験結果を表-1 に示

* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

表一 モルタルに用いた骨材の物理試験結果

種 類	比 重	粗粒率 F. M.	単位容積 質量 (kg/m ³)	実積率 (%)		
川	1 0.6 mm 以下	2.57	1.27	1419	55.2	
	2 0.6~0.3 mm	2.57	2.00	1415	55.1	
	3 1.2~0.6 mm	2.54	3.00	1412	55.6	
	4 0.6mm 以下 3:7 混合	2.53	3.25	1399	55.3	
	5 0.6mm 以上 2:8 混合	2.52	3.48	1396	55.4	
	6 5 mm 以下	2.58	2.88	1559	60.4	
	7 0.6 mm 以下	2.57	1.27	1419	55.2	
	8 1.2~0.6 mm	2.54	3.00	1412	55.6	
	9 2.5~1.2 mm	2.52	4.00	1328	48.7	
	10 5 mm 以下	2.56	2.48	1699	66.4	
	11 1.2~0.6 mm	2.54	3.00	1426	56.1	
	12 5 mm 以下	2.56	2.43	1550	60.5	
砂	13 0.6~0.3 mm	2.68	2.00	1321	49.3	
	14 0.6mm 以上 2:8 混合	2.57	3.05	1313	51.1	
	15 2.5~1.2 mm	2.53	4.00	1223	48.3	
	16 0.6 mm 以下	2.70	1.44	1323	49.0	
	17 1.2~0.6 mm	2.65	3.00	1317	49.7	
	18 5 mm 以下	2.40	2.86	1412	58.8	
	19 2.5~1.2 mm	2.53	4.00	1223	48.3	
	20 5 mm 以下	2.60	3.04	1341	51.6	
	水 川	21 5 mm 以下	2.53	2.87	1515	59.9
		22 0.6mm 以下	2.61	1.38	1390	53.3
23 5~1.2 mm		2.52	4.06	1356	53.8	
24 2.5~1.2mm		2.52	4.00	1297	51.5	
25 0.6~0.3mm		2.60	2.00	1387	53.3	
砕 砂	26 5 mm 以下	2.45	2.87	1456	59.4	
	27 0.6mm 以下	2.66	1.30	1352	50.8	
	28 5~1.2 mm	2.53	4.02	1406	55.6	
砂 砂	29 2.5~1.2mm	2.53	4.00	1255	49.6	
	30 0.6~0.3mm	2.65	2.00	1349	50.9	
	31 5 mm 以下	2.58	2.74	1446	56.0	
粗馬砂 32 2.5 mm 以下	2.54	2.22	1480	58.3		

す。

コンクリートに用いた粗骨材は、粒度調整によって得た川砂利 8 種、砕石 2 種、合計 10 種とした。ただし、粗骨材の最大寸法は使用したレオメータの諸元から 20 mm 以下とし、あらかじめ 20~10 mm および 10~5 mm の 2 種にふるい分け、これを所定の割合に再配合して用いた。したがって、粗骨材の粒度は粗粒率によって特定

表二 コンクリートに用いた骨材の物理試験結果

種 類	比 重	粗粒率 F M	単位容積 質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	
川	1 15-10mm, 10-5mm 5:5混合	2.58	6.50	1582	61.3
	2 15~10mm	2.58	7.00	1538	59.6
	3 20~5mm	2.59	6.68	1558	60.2
砂	4 20~10mm	2.60	7.00	1476	56.8
	5 8:2 混合	2.58	6.80	1550	60.1
利	6 20-10mm 6:4 "	2.57	6.60	1549	60.3
	7 10-5mm 4:6 "	2.57	6.40	1549	60.3
	8 2:8 "	2.57	6.20	1548	60.2
砕 石	9 15~5mm	2.59	6.00	1580	61.0
	10 10~5mm	2.61	6.00	1473	56.4

されるようになっている。粗骨材の物理試験結果を表一 2 に示す。使用した細骨材は表一 の No. 6 である。

(3) 混 和 剤

回転粘度計によるレオロジー定数の測定中における試料の分離を防ぐ目的で、セルローズ系保水剤 NL 1850 をセメント質量の 0.25 % 用いた。

3. レオロジー定数測定法

(1) セメントペーストおよびモルタルの場合

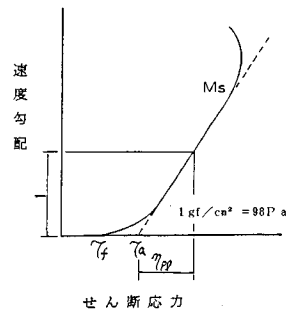
セメントペースト、モルタルともに使用した粘度計は内円筒半径 7 cm, 長さ 12 cm, 外円筒半径 9 cm の内円筒回転式二重円筒型回転粘度計である。これは、モルタルにおいてもフロー 200 程度以上の場合には、内円筒半径を 7 cm とすれば試料の流動幅は 2 cm 以上となることを確かめたからである。

セメントペーストの粘度測定法については既報²⁾に述べてある。モルタルの場合は一般に試料と円筒壁面との間にすべりが生じるので、試料の実測流速に基づいてレオロジー定数を決定した。すなわち、試料上面に発泡スチロール粉末を散布して浮子とし、内外円筒壁面から 0.2 cm 点にある浮子の流速を 8 ミリカメラおよび解析用メモーションを用いて測定し、コンシステンシー曲線 (図一 1 参照) の縦軸と横軸をそれぞれ次のように表わす。

$$\text{縦軸 } V = \frac{2(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_j)}{\left[1 - \left(\frac{r_i}{r_j}\right)^2\right]} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{横軸 } \tau = \frac{M}{2\pi r_i^2 h} = \frac{1}{2\pi r_i^2 h} \cdot \frac{M'}{1 + \phi}$$

ここに、 r_i, r_j : それぞれ内外円筒壁面から 0.2 cm の位置の半径 (cm) ($r_i = 7.2$ cm, $r_j = 8.8$ cm), $\dot{\theta}_i, \dot{\theta}_j$: それぞれ半径 r_i および r_j における試料の角速度 (rad/s), h : 内円筒の長さ (cm), M : トルクの補正值 (gf·cm), M' : トルクの実測値 (gf·cm), ϕ : 内円筒の末端の影響に対する補正係数であって、次式で求められる⁴⁾。



図一 1 コンシステンシー曲線

$$\phi = \frac{1}{8} \frac{R_i}{h'} \frac{R_i}{h} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h ：内円筒底面と容器底面との間隔 (cm)，
 R_i, R_o ：それぞれ内円筒および外円筒の半径 (cm)。

式 (1) で与えられる $V \sim \tau$ 曲線 (コンシステンシー曲線) の直線部の逆勾配として塑性粘度を決定し、降伏値は式 (3) から算定した。

$$\tau_f = \lambda \cdot \tau'_f = \lambda \frac{\left(\frac{r_i}{r_j} \right)^2 - 1}{2 \ln \left(\frac{r_i}{r_j} \right)} \cdot \tau_a \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 τ_f ：降伏値 (gf/cm²)， τ'_f ：見掛けの降伏値 (gf/cm²)， τ_a ：コンシステンシー曲線の直線部による横軸の切片 (gf/cm²)， λ ：内円筒末端の影響を消去するための補正係数であって、次式から計算する。

$$\lambda = \frac{3h}{3h + R_i} \dots\dots\dots (4)$$

本実験に用いた回転粘度計は内円筒の長さに対する直径の比がかなり大きいので、上記の補正係数 (ϕ, λ) を考慮した。

(2) コンクリートの場合

コンクリートに用いた内円筒回転粘度計の諸元は、内円筒半径 15 cm，長さ 20 cm，外円筒半径 20 cm である。

内円筒末端における吸収トルクを消去するために、内円筒底面と容器底面との間に硬練りモルタル層 ($C : W : S = 1 : 0.4 : 3.5$) を敷いてコンクリート試料を入れ、多点法⁴⁾ によって試料の流速分布を実測し、レオロジー定数を決定した。この場合、コンシステンシー曲線の縦軸と横軸は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \text{縦軸 } V &= \frac{2 \dot{\theta}_i}{\left[1 - \left(\frac{r_i}{r_j} \right)^2 \right]} \\ \text{横軸 } \tau &= \frac{M}{2 \pi r_i^2 h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 r_i ：内円筒壁面から 0.2 cm の位置の半径 (cm) ($r_i = 15.2$ cm)， r_o ：試料の流動領域の外側半径 (cm)， $\dot{\theta}_i$ ：半径 r_i における試料の角速度 (rad/s)， h ：内円筒の長さ (cm)， M ：トルク (gf·cm)

レオロジー定数は式 (5) によるコンシステンシー曲線の直線部の逆勾配として塑性粘度を決定し、降伏値は式 (6) から算定した。

$$\tau_f = \frac{\left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 - 1}{2 \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right)} \cdot \tau_a \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 τ_a ：コンシステンシー曲線の直線部による横軸の切片 (gf/cm²)。

4. モルタルおよびコンクリートの粘度式

モルタル、コンクリートにおける懸濁質および懸濁媒の選定、懸濁質の粒形、粒度の取扱い方等を既往の多数のサスペンションの粘度式を参照して種々検討の結果、セメントペーストの場合と同様に、次に示す Roscoe の高濃度サスペンションの粘度式¹⁾を基礎とすることとした。

$$\eta_{re} = (1 - 1.35 V)^{-2.5} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 η_{re} ：懸濁液の相対粘度， V ：懸濁質の体積濃度。

しかし、Roscoe 式は微小等径球が懸濁して最密充填された系を想定して導かれたもので、骨材の形状寸法が多様なモルタル、コンクリートにはそのまま適用できない。そこで、Roscoe 式を次のように修正した。

$$\eta_{re} = \left(1 - \frac{1}{C} V \right)^{-K} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 C ：懸濁質の実積率， K ：懸濁質の団粒の形状係数。

式 (8) は懸濁質の形状の影響を考慮するため実積率を導入するとともに、懸濁質の団粒の形状係数に任意性を与えたものである。

著者は、すでにセメントペーストの塑性粘度がセメント粒子の粒形、粉末度および体積濃度に依存することを確かめ、水セメント比 40~100 % の広い範囲の粘度式として式 (9) を提案した²⁾。

$$\eta_{re} = \left(1 - \frac{1}{C} V \right)^{-\alpha \psi^\beta \gamma} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 C ：懸濁質 (セメント) の実積率， V ：セメントの体積濃度， ψ ：セメントのプレーン比表面積 (cm²/g)， α, β, γ ：実験定数， $\alpha = 1.00$ ， $\beta = -1.03$ ， $\gamma = 0.08$

しかし、式 (9) の計算は煩雑であるので、水セメント比の実用範囲 ($W/C = 45 \sim 85$ %) の粘度式として、式 (10) を提示した²⁾。

$$\eta_{re} = \left(1 - \frac{1}{C} V \right)^{-(K_1 V + K_2)} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 K_1, K_2 ：実験定数， $K_1 = -15.6$ ， $K_2 = 11.2$

モルタルおよびコンクリートにおいては、懸濁質をそれぞれ細骨材および粗骨材と考え、それらは程度の差はあれ団粒を形成するものと仮定し、団粒の形状係数に及ぼす影響要因を検討した。その結果はセメントペーストの場合と異なり、図—2 および図—3 に示すように体積濃度と団粒の形状係数との間に特別な関係は認められず、また、図—4 および図—5 に示すように団粒の形状係数は骨材粒度に依存することが明らかとなった⁶⁾。これは、モルタルおよびコンクリートの場合は、懸濁質が粗粒で団粒が形成されにくいことによるのであろう。

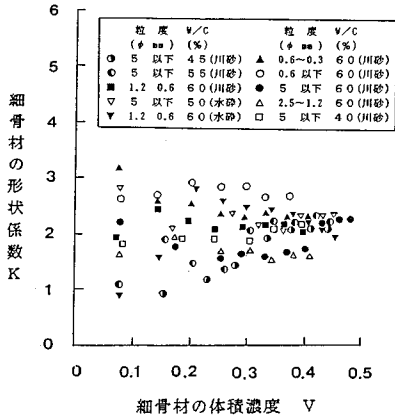


図-2 モルタルにおける細骨材の形状係数と細骨材の体積濃度との関係

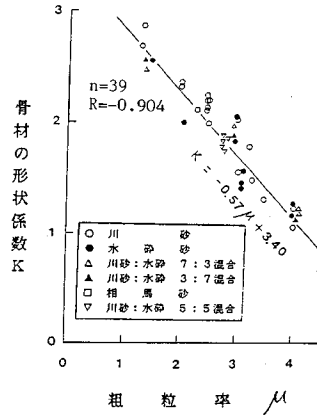


図-4 モルタルにおける骨材の形状係数と骨材の粗粒率との関係 (W/C=40~60%, S/C=0.2~2.4)

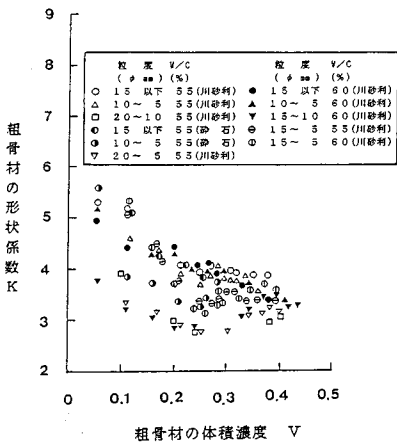


図-3 コンクリートにおける粗骨材の形状係数と粗骨材の体積濃度との関係

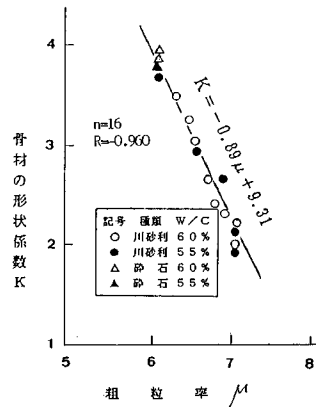


図-5 コンクリートにおける骨材の形状係数と骨材の粗粒率との関係 (W/C=55%, 60%, S/C=1.68, 粗骨材の最大寸法 20mm)

図-4 および図-5 のように骨材の粒度を粗粒率で表現すれば、細骨材の場合は粗粒率によって粒度が特定されないため、粗骨材 (最大寸法 20 mm) の場合に比べて若干相関度が低くなるが、いずれも形状係数は粗粒率の 1 次関数で与えられる。すなわち、

$$K = a\mu + b \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 μ : 懸濁質の粗粒率 (モルタルの場合、細骨材、コンクリートの場合、粗骨材の粗粒率)

したがって、モルタルおよびコンクリートの粘度式として次式が提案できる。

$$\eta_{re} = \left(1 - \frac{1}{C} V\right)^{-(a\mu + b)} \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 a, b : 実験定数であって、モルタルの場合、 $a = -0.57, b = 3.40$ 、コンクリートの場合、 $a = -0.89, b = 9.31$ である。

なお、これらの実験定数を定めるにあたっては、モル

タルの場合は表-1 の骨材を用い、水セメント比 40~60%、砂セメント比 0.2~2.4 まで 0.2 ずつ変化させた合計 398 種の試料の粘度試験結果に基づいており、コンクリートの場合は表-2 の骨材を用い、水セメント比 55% および 60%、粗骨材の体積濃度 0.06~0.43 まで約 0.04 ずつ変化させた合計 229 種の試料の粘度試験結果に基づいている。

モルタルおよびコンクリートの塑性粘度の実測値の一部を表-3 に示す。

5. 塑性粘度の推定法と推定精度

モルタルおよびコンクリートの懸濁媒をそれぞれセメントペーストおよびモルタルとし、まず、セメントの物理特性および配合条件に基づき、セメントペーストの粘度式を用いてその塑性粘度を推定し、これをモルタルの懸濁媒粘度としてモルタルの粘度式を用いてその塑性粘

表—3 モルタルおよびコンクリートの塑性粘度の実測値

種類	W/C (%)	η_0	s/c 比 s/a	体積 濃度	フロー びん スラブ(cm)	塑性粘度 η_{pl} (P)	
モ ル タ	川 砂 比重 2.58 FM 2.88	60	3.17	1.6	0.404	261	21.5
				1.8	0.432	238	28.8
				2.0	0.458	231	41.8
ル タ	水砕砂 比重 2.60 FM 3.04	50	5.70	1.4	0.394	253	63.7
				1.6	0.426	243	105
				1.8	0.455	233	197
コ ン ク リ	水砕砂 2.5 ~ 1.2 mm 比重 2.53 FM 4.00	60	3.17	1.2	0.341	7.1*	12.7
				1.4	0.376	276	18.5
				1.6	0.408	257	28.5
コ ン ク リ	川砂利 ** 比重 2.59 FM 6.68	55	48.1	0.52	0.280	20.0	400
				0.49	0.310	19.5	617
				0.44	0.350	16.5	863
コ ン ク リ	川砂利 ** 比重 2.59 FM 6.68	60	32.7	0.55	0.250	23.5	232
				0.51	0.280	21.5	307
				0.40	0.380	16.5	1154
コ ン ク リ	砕 石 ** 15 ~ 5 mm 比重 2.59 FM 6.00	55	48.1	0.63	0.200	23.0	227
				0.57	0.240	20.5	326
				0.55	0.260	19.0	404
コ ン ク リ	砕 石 ** 15 ~ 5 mm 比重 2.59 FM 6.00	60	32.7	0.77	0.110	27.0	85.5
				0.68	0.160	25.0	119
				0.62	0.200	24.0	137

注) 表中の塑性粘度の実測値は、各々2回測定の前平均値である。
 20°Cにおける水の粘度=1.002 cP
 W/C 55% のセメントペーストの塑性粘度の推定値 = 4.01 P
 η_0 : 懸濁媒 (セメントペースト) の塑性粘度の推定値 (P)
 * : J-ロート落下時間 (秒)
 ** : 使用した細骨材は、表1に示す N0.12の川砂 (FM 2.43)である。

度を推定する。次に、このモルタルの塑性粘度をコンクリートの懸濁媒粘度とし、コンクリートの粘度式を用いてその塑性粘度を推定する。以下に粘度推定の結果について述べる。

(1) 練りませ直後の場合 (常温, 20°C の場合)

表—1 に示す種々の粒形および粒度の細骨材を用い、水セメント比 40~60 % の範囲で砂セメント比 0.2~2.4 まで任意に変化させ、合計 171 種のモルタルを造り、粘度式によって計算した塑性粘度の推定値と実測値との関係を検討し、その結果の一部を表—4 に示した。

一方、コンクリートの場合は表—2 に示す種々の粒形および粒度の粗骨材を用い、水セメント比を 55 % および 60 % とし、合計 58 種のコンクリートを造り、粘度式によって計算した塑性粘度の推定値と実測値との関係を検討し、その結果の一部を表—5 に示した。

その結果、モルタルの塑性粘度の推定値と実測値との比は 0.81~1.28, 平均 0.99, 変動係数 9.1 % となった。また、コンクリートの塑性粘度の推定値と実測値との比は 0.78~1.15, 平均 0.98, 変動係数 9.7 % となり、いずれも平均値は期待値とほぼ一致し、変動係数も 10 % 以下であって、提案した粘度式は実用上の目的を十分達し得るものと思われる。

(2) 練りあがり温度が相違する場合

モルタルおよびコンクリートの練りあがり温度による塑性粘度の変化は、これらを構成するセメントペースト

表—4 モルタルの塑性粘度の推定値

細骨材	W/C (%)	η_0 *	S/C	体積 濃度	フロー または J-ロート	塑性粘度 (P)		A_1/B_1	
						推定値 A_1	実測値 B_1		
川 砂 FM 2.43	50	5.70		0.6	0.222	305	14.3	14.8	0.97
				1.0	0.321	281	26.1	28.8	0.91
				1.2	0.361	269	35.4	35.9	0.99
	60	3.17		0.6	0.202	353	7.20	6.22	1.16
				0.8	0.252	342	9.38	8.22	1.14
				2.4	0.498	222	104	103	1.01
水砕砂 0.6-0.3 mm FM 2.00	60	3.17		0.6	0.196	6.0**	9.99	8.46	1.18
				0.8	0.245	7.5**	15.0	13.8	1.09
				1.4	0.363	240	65.0	67.2	0.97
				1.5	0.379	208	86.9	86.7	1.00

注) 表中の塑性粘度の実測値は各々2回測定の前平均値である。
 20°Cにおける水の粘度=1.002 cP
 * : 懸濁媒 (セメントペースト) の塑性粘度の推定値 (P)
 ** : J-ロート落下時間 (秒)
 1 P = 0.1 Pa·s

表—5 コンクリートの塑性粘度の推定値

粗骨材	W/C (%)	η_0 *	η_1 **	s/a (%)	体積 濃度	スラ ブ (cm)	塑性粘度 (P)		A_2/B_2	
							推定値 A_2	実測値 B_2		
川 砂 利 20-10mm FM 7.00	55	4.01	35.3		48	0.31	23.5	388	412	0.94
					45	0.34	21.5	565	567	1.00
					41	0.37	18.5	865	724	1.19
	60	3.17	24.4		44	0.34	22	390	420	0.93
					41	0.37	18	598	571	1.05
					39	0.39	16	825	877	0.94
砕 石 10-5mm FM 6.00	55	4.01	35.3		69	0.16	24.5	132	145	0.91
					61	0.21	23	224	199	1.13
					54	0.26	22	406	351	1.16
	60	3.17	24.4		62	0.20	25.5	138	142	0.97
					56	0.24	24	220	201	1.09
					53	0.26	21.5	281	304	0.92

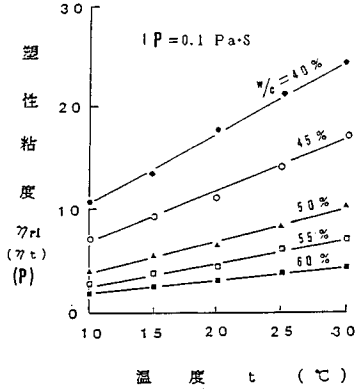
注) 表中の塑性粘度の実測値は各々2回測定の前平均値である。
 20°Cにおける水の粘度=1.002 cP
 * : セメントペーストの塑性粘度の推定値 (P)
 ** : 懸濁媒 (モルタル) の塑性粘度の推定値 (P)
 1 P = 0.1 Pa·s

の塑性粘度の温度依存性に起因すると考えられるので、まず、セメントペーストの塑性粘度の温度依存性を検討した。

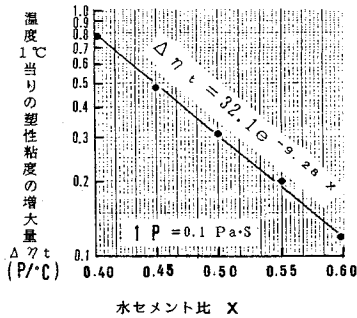
普通ポルトランドセメントを用い、水セメント 40, 45, 50, 55 および 60 % のセメントペーストについて、練りあがり温度を約 10, 15, 20, 25 および 30°C に変化させた場合の塑性粘度を測定した。試験結果を図—6 に示す。

図—6 において、試料の温度が高いほど塑性粘度は大となっており、セメントペーストにおいては温度の上昇による懸濁媒としての水の粘度低下より水和による粘度増加が卓越することを示している。

試料温度と塑性粘度との間には、約 10~30°C の範囲



図—6 普通ポルトランドセメントペーストの塑性粘度と温度との関係 (W/C=40~60%)



図—7 水セメント比と塑性粘度の増大量

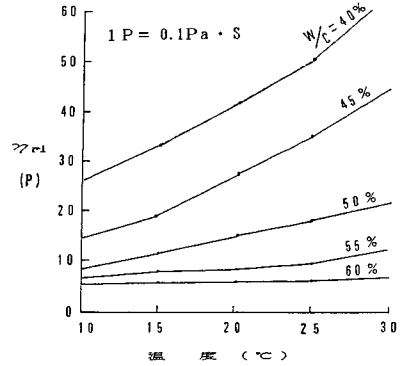
ではほぼ直線な関係が認められる。すなわち、温度上昇に伴う粘度勾配は水セメント比によって相違し、水セメント比 40, 45, 50, 55 および 60% に対し、それぞれ、0.79, 0.48, 0.31, 0.20 および 0.12 P/°C となっており、これらは図—7 に示すように指数関係が存在し、次式で表わされる。

$$\Delta \eta_t = q_1 e^{-p_1 x} \dots \dots \dots (13)$$

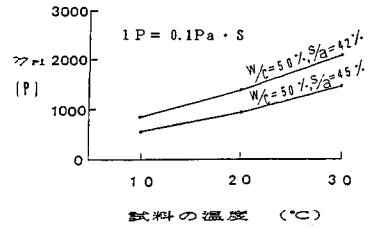
ここに、 $\Delta \eta_t$: 温度上昇による塑性粘度の増大量 (P/°C),
 x : 水セメント比, p_1, q_1 : 実験定数, $p_1 = 9.28, q_1 = 32.1$

したがって、20°C におけるセメントペーストの塑性粘度を式 (9) または式 (10) を用いて推定し、式 (13) の関係から温度が相違する場合の塑性粘度を求めることができる。

次にモルタルおよびコンクリートの練りあがり温度を約 10~30°C に変化させてレオロジー一定数を測定した。この場合、モルタルの配合は水セメント比を 40, 45, 50, 55 および 60% とし、砂セメント比を 0.6 と一定とした。使用した細骨材は、表—1 に示す No.6 の川砂 (FM=2.88) である。なお、砂セメント比を 0.6 と小さく選んだ理由は、モルタルの水セメント比を 40~60% の範囲



図—8 モルタルの練りあがり温度と塑性粘度との関係 (W/C=40~60%, s/c=0.6, 川砂使用)



図—9 コンクリートの練りあがり温度と塑性粘度との関係 (粗骨材最大寸法 20 mm, W/C=50%, s/a=42%, 45%)

としても十分な流動性をもち、回転粘度計によって無理なくレオロジー一定数を測定できるよう配慮したからである。

コンクリートの配合は水セメント比 50%、スランプ 15 cm および 20 cm (20°C) とし、骨材は最大寸法 20 mm の川砂利と川砂 (FM=2.88) を用いた。

モルタルおよびコンクリートの練りあがり温度と塑性粘度との関係は図—8 および図—9 のように、セメントペーストの場合と全く同様な傾向を示し、モルタルおよびコンクリートの温度による塑性粘度の変化がセメントペーストに依存することを明示している。したがって、ある温度のモルタルまたはコンクリートの塑性粘度を推定するには、まず、当該温度のセメントペーストの塑性粘度を推定し、これを懸濁媒粘度としてモルタルの粘度式を用いてその粘度を推定し、さらに、これをコンクリートの懸濁媒粘度とし、コンクリートの粘度式を用いてその塑性粘度を推定することができると思われる。モルタルおよびコンクリートについてこの方法により粘度推定を行い、実測値と比較した結果を表—6 および表—7 に示す。推定値と実測値との比は、モルタルの場合、試料数 25 で 0.81~1.14, 平均 0.99, 変動係数 9.1%, コンクリートの場合、試料数 12 で 0.75~1.02, 平均 0.93, 変動係数 10% であった。

表—6 温度の影響を受けるモルタルの塑性粘度の推定精度 (W/C=40~60%, s/c=0.6, 川砂使用)

試料の温度(°C)	W/C (%)	塑性粘度 (P)		
		推定値 A _{ct}	実測値 Z _{ct}	A _{ct} /Z _{ct}
10	40	23.4	26.1	0.90
	45	15.2	14.3	1.06
	50	5.94	7.30	0.81
	55	4.54	5.44	0.83
	60	4.04	4.08	0.99
15	40	33.1	33.0	1.00
	45	21.0	18.2	1.15
	50	9.38	11.4	0.82
	55	6.58	6.99	0.94
	60	5.27	4.91	1.07
20	40	42.9	44.8	0.96
	45	26.8	23.5	1.14
	50	12.8	14.4	0.89
	55	8.62	8.11	1.06
	60	6.50	5.82	1.12
25	40	53.0	50.1	1.06
	45	32.7	30.0	1.09
	50	16.3	17.5	0.93
	55	10.7	10.5	1.02
	60	7.73	7.20	1.07
30	40	62.5	64.2	0.97
	45	38.4	39.1	0.98
	50	19.7	20.9	0.94
	55	12.7	12.4	1.02
	60	8.96	8.73	1.03

注) 1 P = 0.1 Pa · S

表—7 温度の影響を受ける普通コンクリートの塑性粘度の推定値と精度 (W/C=50%, s/a=42%, 45%, 粗骨材最大寸法 20 mm)

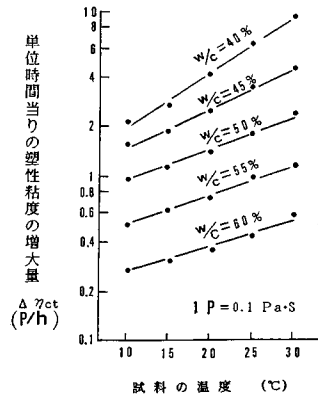
s/a (%)	試料の温度(°C)	塑性粘度 (P)		A _{ct} /Z _{ct}
		推定値 A _{ct}	実測値 Z _{ct}	
42	10	607	756	0.80
			813	0.75
	20	1312	1302	1.01
			1398	0.94
			2015	1.00
	30	2018	2069	0.98
501			0.91	
45	10	454	567	0.80
			990	0.99
	20	981	965	1.02
			1531	0.98
	30	1508	1497	1.01

注) 1 P = 0.1 Pa · S

(3) 練りませ後の経過時間が変化した場合

粘度式を用いて経過時間の影響を受けるモルタルおよびコンクリートの塑性粘度を推定するためには、(2)と同様な趣旨から、セメントペーストの粘度の時間依存性を把握しておくことが必要である。

普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比 40、



図—10 普通ポルトランドセメントペーストの練りませ後の塑性粘度の単位時間当たりの増大量

45, 50, 55 および 60% としたセメントペーストについて、練りませ後の経過時間を 30, 60, 90, 120, 150 および 180 分、試料の温度を 10, 15, 20, 25 および 30°C の 5 段階に変化させた場合の塑性粘度を測定した。その結果、次の傾向が認められた。すなわち、塑性粘度が練りませ直後から時間経過に伴って、ほぼ直線的に増加する時間帯が存在する。この時間帯は温度によって相違し、水セメント比 40~60% の範囲では、10°C および 15°C の場合、約 120 分、20°C および 25°C の場合、約 90 分、30°C の場合、約 60 分であった。この領域における単位時間当たりの塑性粘度の増大量は、試料温度に対し指数関数的に変化し、両者の関係は次式で与えられる (図—10 参照)。

$$\Delta\eta_{ct} = q_2 e^{p_2 t} \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 $\Delta\eta_{ct}$: 経過時間に伴う塑性粘度の増大量 (P/h)、
 t : 試料の温度 (°C)、 p_2, q_2 : 実験定数であって、その値は表—8 に示す。

次に、普通ポルトランドセメントおよび川砂を用い、水セメント比 50%、砂セメント比 1.4 としたモルタルと、粗骨材最大寸法 20 mm、水セメント比 60%、細骨材率 43% のコンクリートについて、温度 10~30°C における練りませ後の経過時間が塑性粘度に及ぼす影響を検討した。

塑性粘度の測定は、練りませ直後と 30 分後および 60 分後とした。ただし、試料温度が 30°C の場合は流動性の低下が著しく 60 分後の測定が困難となったので、30 分後までとした。

表—8

w/c	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
p_2	0.076	0.051	0.042	0.040	0.036
q_2	0.93	0.89	0.62	0.33	0.18

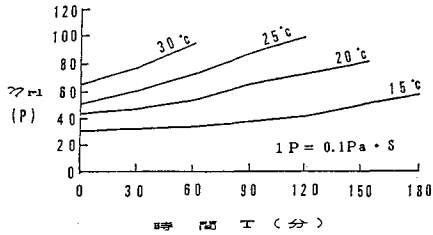


図-11 モルタルの塑性粘度の経時変化 ($W/C=50\%$, $s/c=1.4$, 川砂使用)

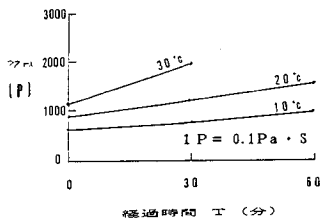


図-12 コンクリートの塑性粘度の経時変化 (粗骨材最大寸法 20 mm, $W/C=60\%$, $s/c=43\%$)

練りませ後の経過時間に伴うモルタルおよびコンクリートの塑性粘度の増大量は、図-11および図-12に示すように、試料の温度によって相違するが、いずれも練りませ直後からほぼ直線的に増加することが認められた。

練りませ後一定時間が経過した場合のモルタルおよびコンクリートの塑性粘度を推定するには、まず、所定温度および経過時間におけるセメントペーストの塑性粘度を推定し、これを懸濁媒粘度としてモルタルの粘度式を用いてその粘度を推定し、さらに、これをコンクリートの懸濁媒粘度とし、コンクリートの粘度式を用いてその塑性粘度を推定する。

上記の方法によって推定したモルタルおよびコンクリートの塑性粘度と、それぞれの実測値を対比した一例

表-9 経過時間の影響を受けるモルタルの塑性粘度の推定値と精度 ($W/C=50\%$, $s/c=1.4$, 川砂使用)

試料の温度 (°C)	経過時間 (分)	塑性粘度の推定値 (P)		モルタルの塑性粘度の実測値	A_{ct1} / B_{ct1}
		セメントペースト A_{ct1}	モルタル A_{mt1}		
15	0	4.17	27.9	30.4	0.92
	30	4.76	31.9	31.3	1.02
	60	5.34	35.8	32.5	1.10
	90	5.93	39.7	39.1	1.02
	120	6.51	43.6	40.4	1.08
20	0	5.70	38.2	41.1	0.93
	30	6.41	42.9	44.8	0.96
	60	7.11	47.6	48.9	0.97
	90	7.82	52.4	54.8	0.96
25	0	7.23	48.4	52.9	0.91
	30	8.08	54.1	61.8	0.88
	60	8.93	59.8	72.6	0.82
30	0	8.76	58.7	64.3	0.91
	30	9.78	65.5	78.9	0.83

注) $1 P = 0.1 Pa \cdot s$

表-10 経過時間の影響を受けるコンクリートの塑性粘度の推定値と精度 (粗骨材最大寸法 20 mm, $W/C=60\%$, $s/a=43\%$)

試料の温度 (°C)	経過時間 (分)	塑性粘度の推定値 (P)			コンクリートの塑性粘度の実測値 B_{ct1}	A_{ct1} / B_{ct1}
		セメントペースト A_{ct1}	モルタル B_{mt1}	コンクリート A_{ct1}		
10	0	1.97	21.3	487	489	1.00
					452	1.08
	30	2.11	22.8	522	538	0.97
					496	1.05
		2.23	24.1	552	581	0.95
60				610	0.90	
	20	0	3.17	34.2	783	750
					806	0.97
30		3.36	36.3	831	918	0.91
					890	0.93
		3.54	38.2	875	1067	0.82
60				1008	0.87	
	30	0	4.37	47.2	1081	1107
					1030	1.05
30		4.64	50.1	1141	1409	0.81
					1321	0.86

注) $1 P = 0.1 Pa \cdot s$

を表-9 および表-10 に示す。推定値と実測値との比は、モルタルの場合、試料数 14 で 0.82~1.10, 平均 0.95, 変動係数 8.3%, コンクリートの場合、試料数 16 で 0.81~1.08, 平均 0.95, 変動係数 8.8% であった。

なお、表-9 において s/c を 1.4 と小さく選んだのは、長時間経過後でも試料に十分な流動性があるよう配慮したものである。

6. 降伏値の簡易推定法

モルタルおよびコンクリートの塑性粘度は、粘度式によって推定できることが明らかにされた。しかし、モルタルおよびコンクリートは降伏値を有するから、施工時の挙動を予測するためには、降伏値も推定する必要がある。

モルタルおよびコンクリートのスランプは、それらの降伏値と密接な関係があり、両者の関係はすでに定式化されている⁷⁾。しかし、スランプコーンの底面の摩擦の影響を考慮したこの関係式から直接降伏値を推定することは難しい。そのため、スランプと降伏値との関係を表わす実験式を提示することとした。すなわち、普通ポルトランドセメントと川砂を用い、水セメント比 55%, 60% の 10 種のモルタルと、粗骨材最大寸法 20 mm, 水セメント比 55%, 60% の 13 種のコンクリートについて、スランプと降伏値との関係を検討した。モルタルについては、ミニスランプ (JIS A 1101 「スランプ試験方法」に規定するスランプコーンの各部の寸法を 1/2 に縮小したもの) とし、その範囲を約 5~14 cm とし、ミニスランプと降伏値との関係を求めて図-13 に示し、

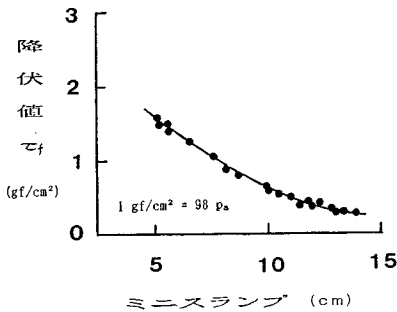


図-13 モルタルの降伏値とミニスランブとの関係 (W/C=55%, 60%, s/c=1.4~2.9)

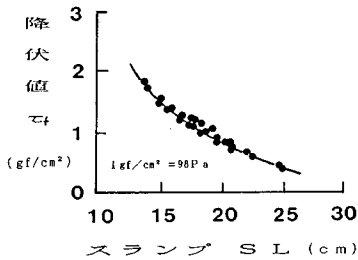


図-14 コンクリートの降伏値とスランブとの関係 (粗骨材最大寸法 20 mm, W/C=55%, 60%)

コンクリートについては、スランブの範囲を約 13~25 cm とし、スランブと降伏値との関係を求めて図-14 に示した。

その結果、いずれも両者の間に指数関係が存在し、次式で示される。

$$\tau_f = A \log SL + B \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 τ_f : 降伏値 (gf/cm²), SL: スランブ (cm) ；
モルタルの場合、ミニスランブ (cm), A, B: 実験定数であって、モルタルの場合、A=-2.71, B=3.36, コンクリートの場合、A=-4.83, B=7.29

式 (15) を用いてモルタルおよびコンクリートの降伏値を推定し、確認用として別に練り混ぜたミニスランブ 5~14 cm のモルタル 20 種、スランブ 13~25 cm のコンクリート 26 種の降伏値の実測値と比較した結果、その推定値と実測値との比は、モルタルの場合、0.88~1.16, 平均 1.03, 変動係数 8.7%, コンクリートの場合、0.88~1.14, 平均 1.03, 変動係数 7.8% であって、降伏値を実用上満足に推定できると考えられる。

7. 結 論

コンクリート施工の合理化の一環として、軟練りモルタルおよびコンクリートのレオロジー定数の推定法について検討した。本研究の範囲で得られた主要な成果を要約すれば次のとおりである。

(1) モルタルおよびコンクリートについて二重円筒型内円筒回転式粘度計により粘度測定を行い、その結果から Roscoe の高濃度サスペンションの粘度式を基調とし懸濁質としてモルタルの場合細骨材、コンクリートの場合粗骨材を考え、それらの粒形、粒度および体積濃度を関数とする粘度式として次式を提案した。ただし、試料温度 20°C で練り混ぜ直後に適用する。

$$\eta_{re} = \left(1 - \frac{1}{C} V\right)^{-(a\mu + b)}$$

ここに、 η_{re} : 相対粘度, C: 懸濁質の実積率, V: 懸濁質の体積濃度, μ : 懸濁質の粗粒率, a, b: 実験定数であって、モルタルの場合、a=-0.57, b=3.40, コンクリートの場合、a=-0.89, b=9.31 である。

上記の粘度式を用い、モルタルおよびコンクリートについて、それぞれ材料、配合の異なる 171 種および 58 種の試料を用い、塑性粘度の推定値と実測値との適合性を検討した。その結果、モルタルの場合、塑性粘度の推定値と実測値との比は 0.81~1.28, 平均 0.99, 変動係数 9.1%, コンクリートの場合、0.78~1.15, 平均 0.98, 変動係数 9.7% であって、実用上満足に推定できることが確かめられた。

(2) 試料温度の変化または練り混ぜ後の時間経過によるモルタルおよびコンクリートの塑性粘度の変化は、これらを構成するセメントペーストの温度および経時依存性に起因するから、まず、所定温度または経時におけるセメントペーストの塑性粘度を温度補正式または経時補正式を用いて推定し、これをモルタルの懸濁媒粘度とし、モルタルの粘度式 [本文中の式 (12)] を用いてその塑性粘度を推定する。次に、これをコンクリートの懸濁媒粘度とし、コンクリートの粘度式を用いてその塑性粘度を推定することができる。

得られたセメントペーストの温度補正式および経時補正式は次のとおりである。

$$\Delta\eta_t = q_1 e^{-p_1 x}$$

$$\Delta\eta_{ct} = q_2 e^{p_2 t}$$

ここに、 $\Delta\eta_t$: 温度上昇による塑性粘度の増大量 (P/°C), $\Delta\eta_{ct}$: 経過時間に伴う塑性粘度の増大量 (P/h), x: 水セメント比, t: 試料の温度 (°C), p_1, p_2, q_1, q_2 : 実験定数であって、 $p_1=9.28, q_1=32.1, p_2, q_2$ の値は本文の表-8 に示すとおりである。

(3) (2) に示した方法によって、温度および経時によるモルタルおよびコンクリートの塑性粘度を推定した結果、まず、練りあがり温度が変化する場合については、水セメント比 40~60%, 砂セメント比 0.6 のモルタルと粗骨材最大寸法 20 mm, 水セメント比 50%, 細骨材率 42%, 45% のコンクリートにおいて、それぞれ温度 10~30°C の範囲で、塑性粘度の推定値と実測値と

の比で示すと、モルタルの場合、試料数 25 で 0.81～1.14, 平均 0.99, 変動係数 9.1%, コンクリートの場合、試料数 12 で 0.75～1.02, 平均 0.93, 変動係数 10% であった。

また経時変化については、水セメント比 50%, 砂セメント比 1.4 としたモルタルと、粗骨材最大寸法 20 mm, 水セメント比 60%, 細骨材率 43% のコンクリートについて温度 10～30°C で塑性粘度の経時変化が線形を示す領域（モルタルの場合 180 分以内、コンクリートの場合 60 分以内）において、塑性粘度の推定値と実測値との比は、モルタルの場合、試料数 14 で 0.82～1.10, 平均 0.95, 変動係数 8.3%, コンクリートの場合、試料数 16 で 0.81～1.08, 平均 0.95, 変動係数 8.8% であった。したがってモルタルおよびコンクリートとも、温度および経時による塑性粘度をほぼ満足に推定できるものと思われる。

(4) フレッシュモルタルおよびコンクリートの挙動の解析には、それらの降伏値も必要である。降伏値はスランプと密接な関係があることが認められているので、降伏値とスランプとの関係を実験的に求め、降伏値の簡易推定法として次式を提示した。ただし、モルタルの場合は寸法を 1/2 としたミニスランプコーンを使用した。

$$\tau_f = A \log SL + B$$

ここに、 τ_f : 降伏値 (gf/cm²), SL : スランプ (cm) モルタルの場合はミニスランプ (cm), A, B : 実験定数であって、モルタルの場合、 $A = -2.71$, $B = 3.36$, コンクリートの場合、 $A = -4.83$, $B = 7.29$ 。

(5) (4) に示した降伏値の簡易推定式により、モルタルおよびコンクリートの降伏値を求めた結果、その推定値と実測値との比は、モルタルの場合、試料数 20 で 0.88～1.16, 平均 1.03, 変動係数 8.7%, コンクリートの場合、試料数 26 で 0.88～1.14, 平均 1.03, 変動係数 7.8% であった。

したがって、ミニスランプ約 5～14 cm, スランプ約 13～25 cm の範囲内で、モルタルおよびコンクリートの降伏値をほぼ満足に推定することができると思われる。

上記に述べたように、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの粘度式を有効に活用すれば、配合条件、材料特性が既知の場合、混和直後および所定の温度、経過時間に対するモルタルおよびコンクリートの塑性粘度をただちに推定できると思われる。

一方、降伏値もミニスランプおよびスランプが求めれば、上記に提案した実験式を用いてただちに推定できるので、これらの塑性粘度および降伏値を用いて施工計画の立案その他に応用できると思われる。

謝 辞：本研究の実施にあたり、東京都立大学名誉教授 村田二郎博士より種々のご示唆を得た。また、本研究の一部は、文部省科学研究補助金（総合研究 (A) No. 60302064, 代表：村田二郎）および名城大学学術研究助成金によって行われたものである。関係各位に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Roscoe, R.: The Viscosity of Suspension of Rigid Sphers, British J. of Applied Physics, Vol. 3, pp. 267～269, 1952.
- 2) 村田二郎・菊川浩治：ポルトランドセメントペーストの粘度式に関する研究, 土木学会論文集, 第 354 号, pp. 109～118, 1985.
- 3) 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp. 21～33, 1987.
- 4) 村田二郎・岡田 清：最新コンクリート技術選書 1, p. 21, 山海堂, 昭和 56 年.
- 5) 村田二郎・菊川浩治：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, 土木学会論文報告集, 第 284 号, pp. 117～126, 1979.
- 6) Murata, J. and Kikukawa, H.: The Viscosity Equation of Mortar and Concrete and Its Application, Proceeding of 1985 Beijing International Symposium on Cement and Concrete, Vol. 2, pp. 232～242, 1985.
- 7) 菊川浩治：フレッシュコンクリートの粘度式とその適用に関する研究, 学位論文, 東京都立大学, 昭和 62 年 10 月.
(1989. 4. 6・受付)