

[96] スランプ試験およびすべり抵抗試験によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定

正会員 谷川恭雄（三重大学工学部）

正会員 森 博嗣（三重大学工学部）

正会員 ○筒井一仁（三重大学大学院）

黒川善幸（三重大学大学院）

1. まえがき

スランプ試験は、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試験方法の中で最も簡便で多用されている。しかし、近年、流動化コンクリート、繊維補強コンクリート、水中施工用コンクリートなどの実用化に伴い、従来のスランプ試験だけでは、施工時のコンクリートの流動・締固め特性を正確に予測することがきわめて困難な状況になっている。このため、レオロジーの観点に立ち、フレッシュコンクリートの流動性を統一的に評価する試みが数多くの研究者によって報告されている^{1), 2)}。これらのほとんどの報告では、回転粘度計、平行板ブラストメータ、球引上げ粘度計などを用い、コンクリートのレオロジー定数の測定を行っているが、本来上記の各測定方法はコンクリートのレオロジー定数を測定する目的で開発されたものではなく、通常用いられる調合の範囲でさえ同一の測定装置ではカバーできない場合が多い。一方、スランプ試験は、少なくとも常用の建築用コンクリートであれば、測定範囲をカバーする試験方法であり、これらの現行試験法は、何らかの形でレオロジー性質を表現していることも事実である。コンクリートをレオロジー的に取り扱う場合、その流動特性の表現には時間項を含む「粘性」のパラメータが不可欠であり、スランプ試験が粘性の評価に適用されていない理由は、スランプ試験時に流動速度を無視し、流動が停止したときの形状（高さ）のみを測定の対象としているからである。

筆者らは、現在常用されているスランプ試験を拡張して、コンクリートのスランピング速度、すなわちスランプコーン引上げ後の落下速度を測定し、理論解析による結果と比較することによって、フレッシュコンクリートのレオロジー定数を定量化する手法を既に報告した³⁾。しかし、スランピング速度の測定には、多少大がかりな測定装置が必要であり、また、コンクリートのスランピング速度はスランプコーンの引上げ速度に影響を受けるため、一定速度でコーンを引き上げる装置ならびに、引上げ速度を測定する機構が必要となる。このことは、スランプ試験の持つ簡便性を失うものであり、実用化の若干の障害になるものと思われる。

一方、モルタルの代表的なコンシステンシー試験の一つであるフロー試験は、瞬間的な強制加速度を与えることによって試料を変形させるもので、時間項に関連するパラメータを検出できる。ただし、フロー試験の結果のみでは、2つのレオロジー定数、すなわち降伏値と塑性粘度を区別して定量化することはできない。

以上のような理由から、本報告では、スランプ値およびフロー値の両方の値から、レオロジー定数を定量化する手法を提案する。この手法を適用するためには、粘塑性有限要素法解析による流動シミュレーションが必要であり、さらに解析には、試料と外部境界面との間のすべり抵抗力を入力する必要があるため、まず、すべり抵抗に関する実験を行って、解析に用いた。フレッシュコンクリートのすべり抵抗に関する資料は少なく⁴⁾、今後、型枠内や管内における流動を解析する場合の重要なデータとなるものと思われる。また、定量化したレオロジー定数の妥当性を調べるため、スランピング (sl.) - 降下時間 (t) 曲線およびフロー値 (fl.) - 落下回数 (n) 曲線に関する解析結果と実測結果の比較を行った。

2. すべり抵抗力の測定

2.1 実験の概要

スランプ試験およびフロー試験における、試料と底板（あるいはテーブル）の間に働くすべり抵抗力に関するデータを得るため、図-1に示すような測定装置を試作した。すべり面の面積は10×15cmとし、試料の重量（高さ）を3種類に変化させたときの抵抗力を測定し、次式で表現される抵抗力（図-2参照）の2つのパラメータ (τ_h, μ) を最小二乗法によって定量化した。

$$\sigma_h = \tau_h + \mu \cdot \sigma_n \quad \text{----- (1)}$$

表-1 実験要因および結果

(a) Mortar									
Series	W/C	Flow			Slump	Estimated value			
		F1.0	F1.4	F1.15		η^{**}	τ_y^{**}	η^{***}	τ_y^{***}
M40-1	40	106	136	185	16.5	0.08	7	0.08	7
2		108	141	191	18.0	0.06	6	0.08	6
3		111	148	200	19.6	0.05	6	0.06	6
M45-1	45	103	123	166	11.7	0.13	8	0.13	9
2		110	150	200	20.8	0.04	7	0.08	5
3		111	151	205	21.2	0.05	6	0.08	5
M50-1	50	105	133	174	10.7	0.07	11	0.08	11
2		110	150	208	20.2	0.05	5	0.05	6
3		112	155	209	21.0	0.04	6	0.06	5
M55-1	55	104	134	183	15.8	0.06	8	0.08	8
2		107	141	194	18.9	0.06	6	0.07	6
3		108	146	206	21.0	0.05	5	0.06	5
M60-1	60	103	130	180	12.4	0.08	7	0.06	11
2		105	137	192	17.5	0.07	6	0.06	7
3		108	146	206	21.0	0.05	5	0.06	5
M65-1	65	106	136	186	14.2	0.07	7	0.06	9
2		110	152	208	19.7	0.04	7	0.06	7
3		110	148	207	20.2	0.05	6	0.06	6
M70-1	70	100	125	174	14.0	0.09	8	0.09	8
2		110	145	203	19.6	0.06	4	0.06	6
3		118	161	220	23.2	0.04	4	0.06	4

(b) Concrete									
Series	W/C	Slump	Estimated value		[Notes]				
			η^*	τ_y^*					
C40-1	40	5.6	0.26	12	* : Obtained by comparison of sl.-t curves ** : Obtained by only flow values (F1.4 and F1.15) *** : Obtained by flow and slump values				
2		13.8	0.18	7					
3		19.1	0.14	4					
C55-1	55	9.5	0.22	10	[Units] W/C [X], Slump [cm] η [kPa·s], τ_y [gf/cm ²]				
2		16.6	0.14	6					
3		20.6	0.10	4					
C70-1	70	7.9	0.14	12					
2		15.0	0.06	8					
3		19.7	0.06	6					

ここに、 σ_h : すべり抵抗応力 (gf/cm²) μ : まさつ係数
 τ_h : 付着力 (gf/cm²) σ_n : 垂直応力 (gf/cm²)

試料として用いたコンクリートおよびモルタルは、表-1 に示した通りであり、水セメント比 (W/C) は40~70%の範囲で変化させた。

2. 2 実験結果とその考察

図-3 および図-4 は、最適化によって得られた付着力 (τ_h) およびまさつ係数 (μ) と水セメント比 (W/C) との関係をもルタルおよびコンクリートについて示したものである。この図より明らかなように、水セメント比の増加に伴って付着力は減少し、まさつ係数は増大する傾向がある。また、モルタルよりもコンクリートの方がまさつ係数はかなり大きな値を示すが、これは、粗骨材の影響によるものと思われる。

3. スランプ試験およびフロー試験によるレオロジー定数の測定

3. 1 実験の概要

モルタルおよびコンクリートを用いてスランプ試験を行った。実験要因としては、表-1 に示すように水セメント比 (W/C) およびスランプ値 (Sl.) を取り上げた。すなわち、モルタルは水セメント比 (W/C) を 40, 45, 50, 55, 60, 65, および70%の7種類とし、同一水セメント比で目標スランプ値が 10~23cm の範囲で変化するように、それぞれ3種類の割合で混練した。コンクリートに用いた粗骨材の最大寸法は20mmである。スランプ試験については、図-5 に示した試作のスランプコーン自動引上げ装置ならびにスランピング測定装置を用い、スランプ値の測定と同時にスランピング (sl.) - 降下時間 (t) 曲線とスランプコーンの引上げ速度を自動記録した。モルタルについてはフロー試験を行ったが、フローコーン引上げ直後から、フローテーブルを1回落下させるごとにフロー値を測定し、これを15回繰り返した。同一試料に対して、スランプ試験およびフロー試験を2回ずつ行い、それらの平均値を求めた。

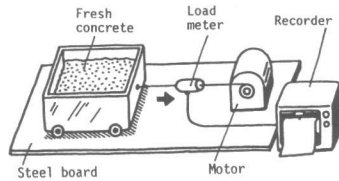


図-1 すべり抵抗測定装置

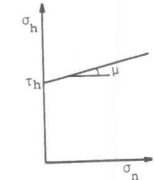


図-2 すべり抵抗力

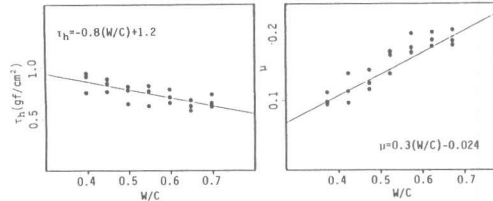


図-3 モルタルの付着力およびまさつ係数

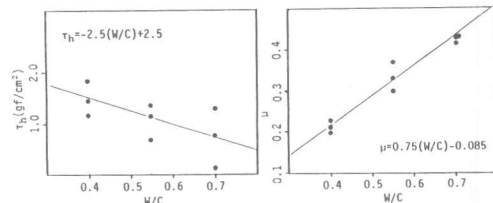


図-4 コンクリートの付着力およびまさつ係数

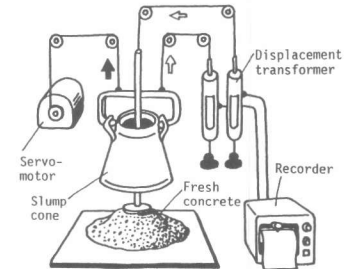


図-5 スランピング試験装置

表-2 各種パラメータ

	η	τ_y	τ_h	μ	ρ
Mortar	0.04~0.30	2~18	0.80	0.15	2.2
Concrete			1.00	0.32	

[Notes] η : Plastic viscosity [kPa·s]
 τ_y : Yield value [gf/cm²]
 τ_h : Adhesive force [gf/cm²]
 μ : Frictional coefficient
 ρ : Specific gravity

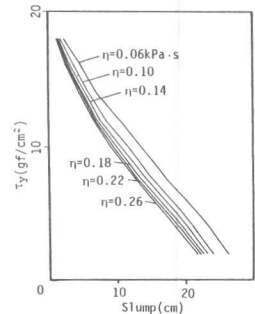


図-6 スランプ値とレオロジー定数の関係

3.2 解析方法およびレオロジー定数の推定方法

実験結果と比較するため、スランプ試験のシミュレーションを行った。解析には筆者らが既に提案した粘塑性有限要素法解析によるプログラム³⁾を用い、表-2に示す各種パラメータを持つビンガムモデルについて計算を行った。スランプ試験およびフロー試験における試料と底板の間のすべり抵抗力としては、先に行った実測値の範囲では、解析結果にほとんど差がみられなかったため、今回の解析では平均的な値を用いた。また、スランプコンの引上げ速度は、実測により得られた124mm/secの一定とした。

図-6は、解析によって得られたレオロジー定数とスランプ値の関係を示したものである。スランプ値(SI.)は、降伏値(τ_y)の増大に伴って直線的に減少し、この試験が、降伏値の変化に敏感に反応することを示している。スランプ試験によるレオロジー定数の推定は、既に報告したように、スランピング(sI.)-降下時間(t)曲線に関する実測結果と解析結果を比較することによって推定可能であり(図-7参照)、この方法によってコンクリートのレオロジー定数を推定した(推定結果は表-1に併示した)。一方、フロー試験の解析結果によれば、降伏値および塑性粘度のフロー値に対する影響度はほぼ同程度であり、双方とも値が小さくなるほどフロー値は大きくなる。別報⁵⁾で述べたように、フロー値(fl.)-落下回数(n)曲線に注目すると、塑性粘度が大きくなるほどフロー値の変化は直線的となり(図-8参照)、降伏値は落下全般のフロー値の変化量に支配的である。フロー試験では回数が小さい場合に塑性粘度の影響が卓越することが図-8から明らかとなったため、最初の4回の落下によって変化するフロー値を横軸にとり、15回落下後のフロー値を縦軸にとり、レオロジー定数別に解析値をプロットしてみると、図-9のようになる。図によれば、フロー試験のみから降伏値と塑性粘度を推定することが可能であると思われる。

また、同一試料について、スランプ試験とフロー試験の両方の実測結果が得られていれば、図-10を用いて、レオロジー定数の2つのパラメータを推定することができる。図の横軸は通常のスランプ値、縦軸は15回の落下によるフローの変化量(通常フロー値としてもほぼ同じ)である。この図は、スランプ値が塑性粘度に対して鈍感で、降伏値にのみよく反応する性質を利用したものであり、先の図-9に比べ、レオロジー定数の推定がより容易である。図-9および図-10には、今回の実験で得られたモルタルに関する実測結果を併示してあるが、これらの図を用いて推定した降伏値(τ_y)および塑性粘度(η)の値を前掲の表-1に示す。

3.3 レオロジー定数の推定値に関する検証

図-10によって得られたモルタルのレオロジー定数の推定値を入力データとして得られたスランピング(sI.)-降下時間(t)曲線およびフロー値(fl.)-落下回数(n)曲線の解析結果と、実

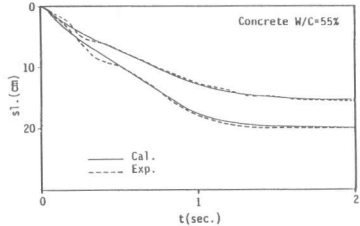


図-7 コンクリートのsl.-t曲線

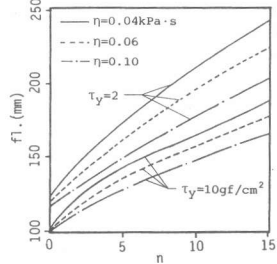


図-8 fl.-n曲線の解析結果

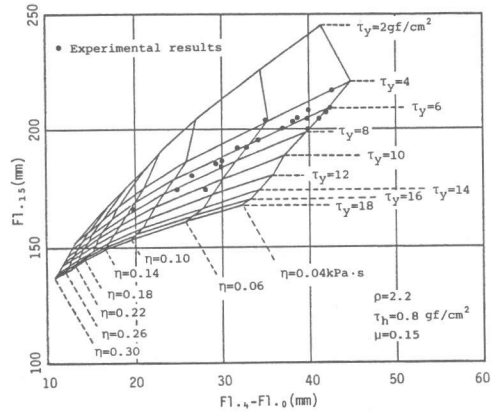


図-9 フロー値(F1.15-F1.4)とレオロジー定数の関係

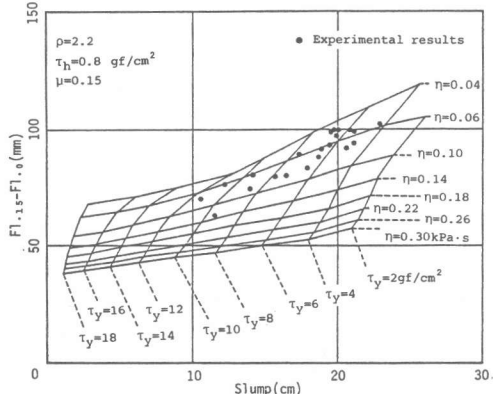


図-10 フロー値およびスランプ値とレオロジー定数の関係

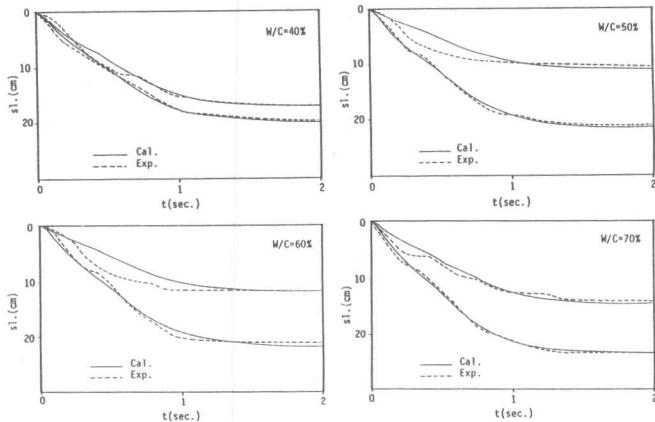


図-11 sl.-t 曲線の解析結果と実測結果の比較

測結果との比較をそれぞれ図-11および図-12に示す。いずれのシリーズでも解析結果と実測結果はよく一致しており、解析方法およびレオロジー定数の決定方法がほぼ妥当であることを示している。図-11のスランピング (sl.) - 降下時間 (t) 曲線の、初期の部分で解析曲線と実測曲線に若干の不一致がみられ、実測曲線の方が解析曲線よりも下側にある。この原因の一つとして、スランブコン内での試料の上下の異方性が考えられる。すなわちスランブコン内の試料が突き棒で締め固められるときに、コン内の試料の上部はその下部に比べて、レオロジー的に流動しやすい (降伏値と塑性粘度が共に小さい) 状態になっており、スランブコンの引上げ初期において上部がすばやい流動・崩れを起こすため、不規則な実測曲線が得られるものと考えられる。この傾向は特にスランブの小さい試料において顕著であった。試料の上下の異方性については、今後さらに資料を収集して検討する予定である。

4. まとめ

現行の代表的なコンシステンシー試験方法であるスランブ試験およびフロー試験の結果を用いて、フレッシュコンクリートやフレッシュモルタルのレオロジー定数 (降伏値および塑性粘度) を推定するための以下のような手法を提案した。

- 1) スランピング (sl.) - 降下時間 (t) 曲線の実測を行い、解析曲線と比較する方法 (詳細は既報³⁾)。
- 2) フロー値 (sl.) - 落下回数 (n) 曲線を測定して、図-9よりレオロジー定数を推定する方法。
- 3) スランブ値とフロー値を併用して、図-10よりレオロジー定数を得る方法。

以上の方法のうち、1) はコンクリートに適用できるという利点があるが、測定装置が多少大がかりなものとなる。2) はモルタル試料については最も簡便な方法であるが、誤差が若干大きい。3) の方法は、比較的精度が良く、試験方法も簡便であるが、フレッシュコンクリートに適用するためにはコンクリート用のフロー試験装置を開発する必要がある。

また、これらの推定方法を用いる場合、試料と鉄板の間のすべり抵抗力を事前に測定する必要があるが、通常の調合の範囲であれば、本報告で用いたように一定値としてもさしつかえない。

〔謝辞〕本研究費の一部は竹中育英会建築研究助成金によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 水口裕之、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.7, pp.297-300, 昭60.
- 2) 村田二郎・菊川浩治、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、pp.9-16, 昭58.
- 3) 谷川恭雄・森博嗣・筒井一仁・黒川善幸、日本建築学会東海支部研究報告集、No.24, pp.5-8, 昭61.2.
- 4) 岡本寛昭、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、pp.55-60, 昭58.
- 5) 谷川恭雄・森博嗣・筒井一仁・黒川善幸、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.8, 昭61.6.

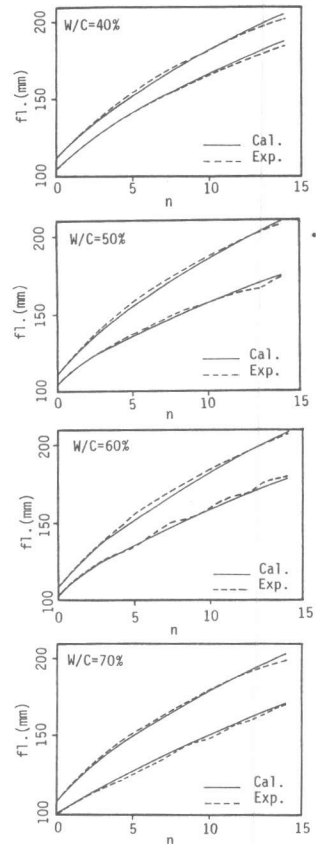


図-12 fl.-n 曲線の解析結果と実測結果の比較