# [95]　粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション

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

フレッシュコンクリートを一種の高濃度サスペンションとみなし、その流動性質をレオロジーによって解明しようとする研究が、近年数多く報告されている[1),2)]。既往の研究の多くは、フレッシュコンクリートをビンガムモデルと仮定して各種粘度計を用いてそのレオロジー定数を測定し、従来定性的にしか表現されていなかったフレッシュコンクリートの流動特性を、ある種の物理量によって定量的に把握することを目的としている。流動現象の解析には、このような物理量が不可欠であるが、これらと一般的に行われている簡便なワーカビリチー試験によって得られる物性値との関係は、各研究者の報告にかなりの相違がみられ、不明な点が多い。また、現場の施工面でフレッシュコンクリートのレオロジー定数をどのように利用し得るかといった可能性や方向性を示した研究はほとんどみられない。

本報告では、筆者らが既に提案したフレッシュコンクリートの粘塑性有限要素解析法を用いて、各種コンシステンシー試験のシミュレーションを行い、これらの試験で得られる諸数値のレオロジー的意味を明らかにする。

## ２．粘塑性有限要素法解析の概要

本報で使用した解析手法の概要を表－１に示す。解析手法の詳細は既報[3)-5)]を参照されたい。本解析法は、主として以下のような特徴を持っている。

１）構成則・降伏関数が単純であり、３次元解析も容易に行える。
２）型枠面等の外部境界面における付着・まさつ力が考慮できる。
３）静的解析ながら、近似的に動的解析が可能であり、振動力を受けるフレッシュコンクリートの流動特性をシミュレートできる。
４）フレッシュコンクリートの材料性質としては、ビンガムモデルの２つの定数である降伏値と塑性粘度を与える。
５）比較的記憶容量の少ないコンピュータでも解析が可能である。

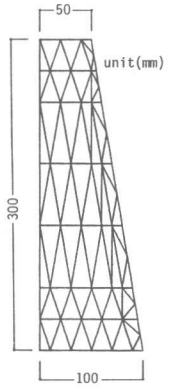
## ３．スランプ試験のシミュレーション

### ３．１　解析手法

スランプ試験の解析には、図－１に示すような分割の軸対称三角形要素を用い、表－２に示す入力データを用いて計算を行った。コンクリートと底板とのすべり面に働く付着力（$\tau_h$）とまさつ係数（$\mu$）と

表－１　粘塑性解析の概要

| Constitutive law and yield function | Method of analysis (Flow-chart of program) |
|---|---|
| $2\eta V_{ij} = \begin{cases} 0 & (F<0) \\ F\,\sigma'_{ij} & (F\geq 0) \end{cases}$<br>$F = 1-\tau_y/\sqrt{J_2}$<br>$\eta$ :plastic viscosity<br>$V_{ij}$:tensor of deformation rate<br>$\sigma'_{ij}$:tensor of stress-deviation<br>$\tau_y$:yield value<br>$J_2$ :second invariant of stress-deviation | START<br>Set initial condition(t=0)<br>Calculate load term<br>Calculate stiffness matrix<br>Set boundary condition<br>Calculate stress<br>Calculate strain rate<br>Calculate dummy force<br>Assemble dummy force vector<br>Solve incremental displacement<br>Check boundary condition (no)<br>Write result to Disk<br>END<br>Loop over each time (t=t+Δt) |
| Approximation of dynamic behavior<br>(Consideration of inertia)<br>$V=(V_0-V')\exp(-t/t')+V'$<br>V :deformation rate<br>$V_0$:deformation rate of former step<br>V':deformation rate by statical analysis<br>t :time<br>t':retardation time (parameter of inertia) | |




図－１　要素分割

**表－2　解析パラメータ**

Variable parameters

| Specific gravity ρ | | Plastic viscosity η(kPa·s) | | Yield value $\tau_y$(gf/cm²) | |
|---|---|---|---|---|---|
| value | mark | value | mark | value | mark |
| 3.0 | h | 0.04 | 04 | 2 | 1 |
| | | 0.06 | 06 | 4 | 2 |
| | | 0.10 | 10 | 6 | 3 |
| 2.2 | n | 0.14 | 14 | 8 | 4 |
| | | 0.18 | 18 | 10 | 5 |
| | | 0.22 | 22 | 12 | 6 |
| | | 0.26 | 26 | 14 | 7 |
| 1.8 | l | 0.30 | 30 | 16 | 8 |
| | | | | 18 | 9 |

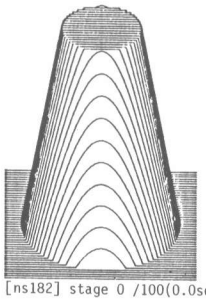
--------series name

Simulation

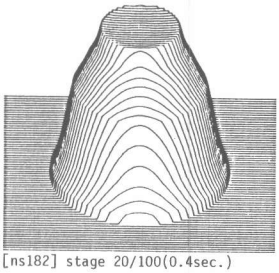
| test | mark |
|---|---|
| slump flow | s f |

Constant parameters

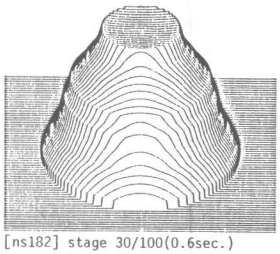
| Adhesive force $\tau_h$(gf/cm²) | Frictional coefficient μ |
|---|---|
| 0.8 | 0.15 |



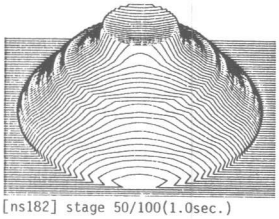
[ns182] stage 0 /100(0.0sec.)



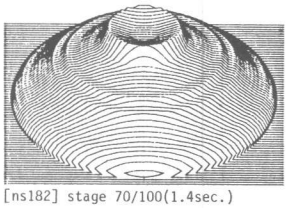
[ns182] stage 20/100(0.4sec.)



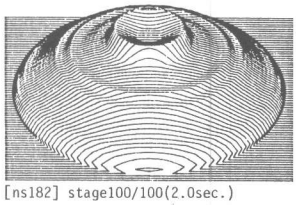
[ns182] stage 30/100(0.6sec.)



[ns182] stage 50/100(1.0sec.)



[ns182] stage 70/100(1.4sec.)



[ns182] stage100/100(2.0sec.)

**図－2　解析結果の一例（スランプ）**

しては、モルタル（水セメント比：W／C＝40～70%）を用いて実測した値の平均的な数値（$\tau_h$＝0.8gf/cm²，$\mu$＝0.15）を用いた。これらの値の変動は、スランプ挙動にあまり影響しないことを確認している[6]。本解析では、スランプコーンとフレッシュコンクリートの接触による流動速度の抑制作用も考慮している。

### 3．2　解析結果とその考察

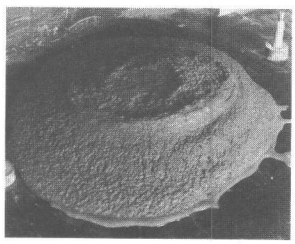
図－2にスランプコーン引き上げ直後から停止するまでのスランプの変化状態（以後、スランピングと呼ぶ）の解析結果の一例を示す。解析によるスランピングの最終形状には、上面部における凹みや側面中央付近における傾斜の不連続部（コーンとの接触跡）などに特徴がみられ、これらの現象はいずれもモルタルのスランプ実験によっても観察できる(写真－1)。図－3は、スランピング（sl.）－降下時間（t）曲線に与えるコーン引上げ速度の影響を示したものである。スランピングのごく初期の段階では、上昇するスランプコーンの内側面が、フレッシュコンクリートの流動を抑制し、コンクリート上面の降下速度は、コーンの引上げ速度に大きく支配されるが、最終的な高さ、すなわちスランプ値は、コーン引上げ速度にはほとんど影響を受けない。図－4は、降伏値（$\tau_y$）を変化させたときの、スランピング（sl.）－降下時間（t）曲線の変化を示したものである。本解析によれば、普通コンクリートの場合、降伏値($\tau_y$)の値が約20gf/cm²よりも大きくなると、スランプ値は0cmとなる。

2つのレオロジー定数、すなわち降伏値（$\tau_y$）と塑性粘度（$\eta$）がスランプ値（Sl.）に与える影響を図－5（a）～（c）に示す。図の(a)、（b）および（c）は、フレッシュコンクリートの比重（ρ）をそれぞれ3.0，2.2，および 1.8とした場合であり、重量、普通、および軽量コンクリートを想定している。これらの図より明らかなように、降伏値（$\tau_y$）と塑性粘度（$\eta$）が小さくなるほど、スランプ値（Sl.）は大きくなるが、スランプ値は塑性粘度よりも降伏値に敏感であることがわかる。

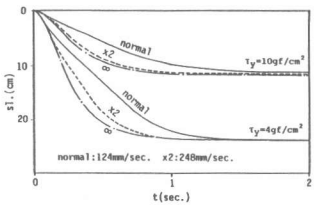
## 4．　フロー試験のシミュレーション

### 4．1　解析手法

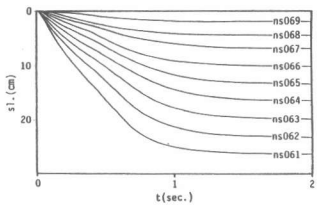
フロー試験の解析は図－6に示す要素分割で、表－2に示す入力データを用いて行った。解析方法は、スランプ試験のシミュレーションと全く同様であるが、フロー試験の場合は、フローテーブルの落下による衝撃力を与える必要がある。ここでは、試料（フレッシュモルタル）が受ける衝撃力を、試料内の各点に一様に作用する加速度に置換し、フローテーブルの1cmの落差による位置エネルギーの変化量が、試料の流動による変形に消費されるものと仮定した。すなわち、作用する節点力と節点変位の積の総

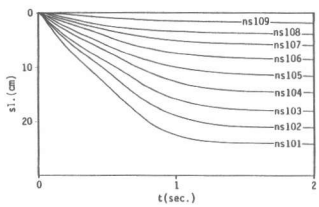


**写真－1　モルタルのスランプ**

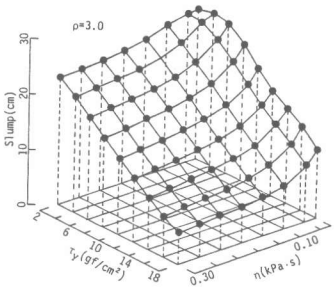



図－3　コーン引上げ速度の影響

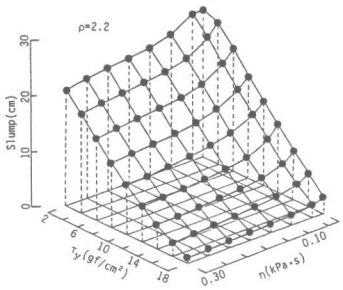


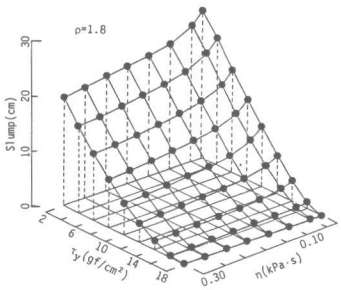

図－4　sl.－t 曲線に与える降伏値の影響




（a）　重量コンクリート

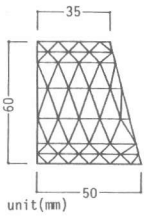



（b）　普通コンクリート

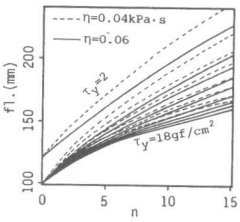



（c）　軽量コンクリート

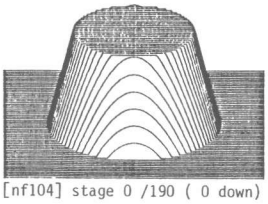
図－5　スランプ値に与えるレオロジー定数の影響



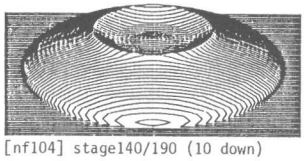

図－6　要素分割



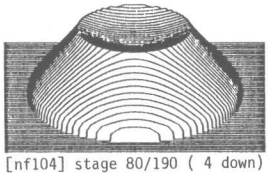

図－8　fl.－n 曲線の変化



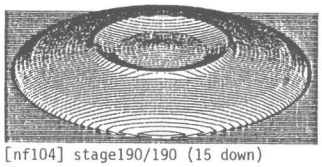
[nf104] stage 0 /190 ( 0 down)



[nf104] stage140/190 (10 down)



[nf104] stage 80/190 ( 4 down)



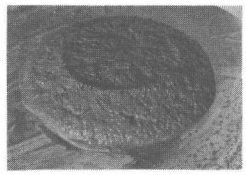
[nf104] stage190/190 (15 down)

図－7　解析結果の一例（フロー）

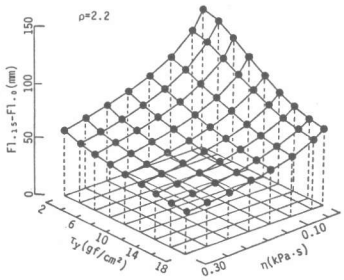
和が、位置エネルギーに等しくなるような加速度を収束計算によって求めた。したがって、試料が流動しにくいほど、また、フローが進み試料の形状が偏平になるほど、試料が受ける加速度は大きくなり、一定加速度を加える既往の計算方法[7]とは異なる結果を与える。

## 4．2　解析結果とその考察

図－7にフロー試験の解析結果の一例を示す。スランピングの場合と同様、上面部に凹みが現れるが、上面周囲部はスランプ試験の場合とは逆に最終的には広がる傾向にある(写真－2)。フロー値と落下回数の関係に与えるレオロジー定数の影響を図－8に示す。降伏値が4 gf/cm²以下の場合は、テーブルの落下を始める以前に既にかなり変形している。フロー値（fl.）－落下回数（n）曲線は、塑性粘度が大きくなるほど直線的となり、降伏値が大きくなるほど、後半のフロー増大率が頭打ちとなって曲線的となる傾向がみられる。降伏値（$\tau_y$）と塑性粘度（$\eta$）がフロー値に与える影響を図－9に示す。この図の縦軸には、15回落下時のフロー値と落下前のフロー値との差（$Fl._{15}-Fl._0$）がプロットしてある。図－9より明らかなように、降伏値（$\tau_y$）と塑性粘度（$\eta$）が小さいほど、フロー値は大きくなる。スランプ値の場合(図－5)と比較すると、フロー値は、塑性粘度によってかなり相違することがわかる。しかし、降伏値と塑性粘度のいずれかが大きな値になると、フロー値はレオロジー定数の変化に鈍感となる。



写真－2　モルタルのフロー

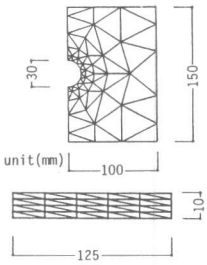



図－9　フロー値に与えるレオロジー定数の影響

## 5．球引上げ粘度計および平行板プラストメータのシミュレーション

### 5．1　解析手法

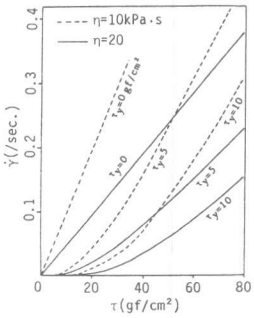
球引上げ粘度計および平行板プラストメータのシミュレーションを行うため、図－10に示す要素分割を用いた。解析では、球あるいは平行板に加える荷重を変化させたときのひずみ速度を計算し、実験でよく行われる２点測定試験[8]をシミュレートした。また、通常用いられる理論上の仮定に従い、球および平行板の表面部において試料はすべらないものとした。



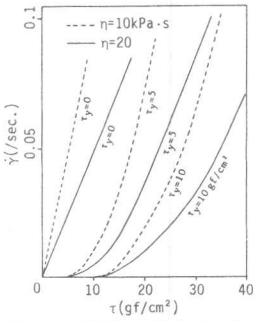
図－10　要素分割

### 5．2　解析結果とその考察

図－11および図－12は、それぞれ、球引上げ粘度計および平行板プラストメータを用いたレオロジー試験によって得られるコンシステンシー曲線である。入力データとして理想的なビンガムモデルを使用しているにもかかわらず、解析によるコンシステンシー曲線は、立ち上がり部分において曲線的な形状となる。曲線の立ち上がり点は入力の降伏値に一致し、また、曲線の後半の直線部の傾斜は、入力した塑性粘度にほぼ等しい。しかし、通常の測定で行われるように、直線部を伸ばして横軸との交点として降伏値を求めると、その値は真の値よりもかなり大きなものとなる。なお、回転粘度計による場合には、この差を補正する理論が示されている。上記の現象は、この種の粘度計で測定する場合の特性であり、測定する変位速度の範囲、装置のサイズ、および試料境界面におけるすべりの有無に十分注意する必要があるものと思われる。



図－11　球引上げ試験の解析結果



図－12　平行板プラストメータの解析結果

## 6．まとめ

本報では、粘塑性有限要素法を用い、スランプ試験、フロー試験、球引上げ試験、および平行板プラストメータによるフレッシュコンクリート（フレッシュモルタル）のコンシステンシー試験のシミュレーションを行った。得られた知見をまとめると、およそ以下のようになる。

1）レオロジー定数（降伏値、塑性粘度）がスランプ値に与える影響は、図－５に示すとおりであり、降伏値が支配的である。

2）レオロジー定数（降伏値、塑性粘度）がフロー値に与える影響は、図－９に示すとおりであり、降伏値および塑性粘度が共に小さい値の範囲で敏感に影響を与える。

3）球引上げ試験および平行板プラストメータによって得られるレオロジー定数は、測定する変位速度の範囲によって相違する。

今後、型枠内や管内でのフレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行い、実験室で測定されるレオロジー定数および現場におけるコンクリートの施工性能との関係を明らかにしていく予定である。

［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）G.H.Tattersall and P.F.G.Banfill, “The Rheology of Fresh Concrete, ” Pitman Advanced Publishing Program, 356pp., 1983.

2）J.Murata, “Flow and Deformation of Fresh Concrete,” Materiaux et Constructions, Vol.17, No.98, pp.117-129, 1984.

3）谷川恭雄・森博嗣、“粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートのスランプ挙動の解析（その１～その３）、”日本建築学会昭和60年度大会（東海）学術講演梗概集、A, pp.481－486, 昭60.10.

4）Y.Tanigawa and H.Mori, “Slumping Behavior of Fresh Concrete.” Research Report of Mie Univ., Vol.10, pp.85-96, Dec.1985.

5）谷川恭雄・森博嗣・筒井一仁・黒川善幸、“慣性力と振動力を考慮したフレッシュコンクリートの粘塑性有限要素法解析、”日本建築学会東海支部研究報告集, No.24, pp.1-4, 昭61.2.

6）Y. Tanigawa and H. Mori, “Rheological Analysis of Behavior of Fresh Concrete,” Proc. of the Japan Cong. on Materials Research, 1985 (in print).

7）村田二郎・鈴木一雄・田中正之、“繰り返し衝撃を受けるフレッシュモルタルのレオロジー、” セメント技術年報、Vol.37, pp.225-228, 昭58.

8）水口裕之・藤崎茂・大城豊治、“フレッシュコンクリートの塑性粘度および降伏値の測定、”セメント技術年報、Vol.28, pp.154-158, 昭49.