

[1021] フレッシュコンクリートの構成則および降伏条件に関する研究

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 (名古屋市役所)

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の施工性能を合理的に評価するためには、従来経験や勘に支配されることの多かったコンクリート工事の分野に、レオロジーなどの理論的な概念を導入する必要がある。近年、フレッシュコンクリートをレオロジーの立場から論じた研究が数多く報告されるようになり、そのコンシステンシーをレオロジー定数を用いて定量的かつ統一的に評価することが可能になりつつある[1]。

しかし、フレッシュコンクリートのコンシステンシーを定量的に評価するための各種レオロジー定数が、現場におけるコンクリートの施工性能、いわゆるワーカビリティの評価とどのような関係にあるのかという点については、依然として実験的な観点からの研究に依存しているのが現状である。フレッシュコンクリートの施工性能を理論によって予測しうる技術、すなわち施工設計法を開発・確立することは、この分野における当面の重要な検討課題の一つであるが、フレッシュコンクリートのレオロジー的研究のほとんどは、コンクリートのレオロジー定数に関する実験データの収集にウエイトが置かれており、流動解析技術に関する研究や、その基礎となる情報は非常に少ない。

筆者らは、既に粘塑性有限要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動解析の一手法を提案し[2]、これまでに各種コンシステンシー試験、各種粘度計、管内流動および型枠内流動のシミュレーションに適用して、解析手法の妥当性を確認するとともに[3,4]、より広範囲な条件に対応するため、解析手法の拡張を行ってきた[5]。これらのシミュレーションでは、フレッシュコンクリートを均質な連続体として扱い、その力学性状については理想的なビンガムモデルで表現されるものと仮定した。その理由としては、既往の研究報告の多くがフレッシュコンクリートの流動特性をビンガムモデルで表現できるとしていること[6]、さらに、各種粘度計を用いたレオロジー定数の測定データのほとんどがコンクリートをビンガムモデルと仮定して求められたものであること[7]などが挙げられる。しかし、ビンガムモデルが適用できるのは、比較的軟練りのフレッシュコンクリートおよびモルタルであり、硬練りの場合は、粉体または粒状体(ここでは、粉粒体と呼ぶ)としての性質があらわれ、内部応力状態に依存しない一定の降伏値をもつビンガムモデルの適用に無理が生じることが知られている[8]。粉粒体の崩れを表現できるモデルとして一般に知られているMohr・Coulombの降伏条件は、粘着力および内部まさつ角の2つのパラメータを用いることによって、応力状態に依存する降伏値を導入することができる。しかし、このモデルは、あくまで降伏条件のみを表現するものであり、降伏後の流動に関しては言及されていない。

本研究では、ビンガムモデルによる構成則に、Mohr・Coulombの降伏条件を導入し、フレッシュコンクリートおよびモルタルの広範囲な調査に適用できるレオロジーモデルを得るため、粘塑性体と粉粒体の双方の性状を連続的に扱うことが可能な構成則および降伏条件を提案するとともに、提案モデルに関する若干の適用例を示す。

2. フレッシュコンクリートの構成則および降伏条件

2.1 降伏条件

フレッシュコンクリートを等方性・非圧縮性の粘塑性体であると仮定すると、その降伏条件を表示するモデルとして、以下のようなものが考えられる。

(1) ビンガムモデル： 比較的軟練りのフレッシュコンクリートおよびモルタルの流動特性は、一般にマトリックス部分の性質に支配される。従来の多くの研究ではセメントペーストなどの高濃度サスペンションの流動性状は、ニュートン粘性を示さず、ある大きさの偏差応力が作用するまで流動しないビンガムモデルでほぼ表現し得ると報告されている[6]。降伏条件は、降伏値と内部応力の大小関係で決定されるものであり、応力状態に依存しない一定降伏値は、図-1に示すような降伏曲面によって表現できる。これは、von Mises の降伏関数と一致し、表-1中の(1)式のように表される。降伏関数 f が負の場合、すなわち応力状態が図-1に示す円筒の内部の点で表されるときは、フレッシュコンクリートは剛体であり、正の場合に f に応じたひずみ速度をもつと仮定されている。

(2) 粉粒体モデル： 比較的硬練りのフレッシュコンクリートは、粗骨材の影響により粉粒体としての性質が強くあらわれる。降伏値は Coulombによって与えられた表-1中の(2)式で表現できる。図-2に示した τ 軸との切片は粘着力(C)であり、Coulomb線の傾きが内部まさつ角(ϕ)を与える。破壊面におけるせん断応力が降伏値に達したとき、すなわち図中の Mohr の応力円が Coulomb 線に接したとき破壊する。Mohr・Coulomb の降伏条件を、von Mises の降伏条件と同様に、任意応力状態に拡張したものが Drucker・Pragerによる降伏条件である[9]。これは、図-3に示すように、平均垂直応力(静水圧)の影響を考慮された円錐形の降伏曲面をもち、表-1中の(3)式で与えられる。

(3) 複合モデル： 硬練りおよび軟練りのフレッシュコンクリートを連続的に取り扱うためには、ビンガムモデルと粉粒体モデルの両者を表現できる複合モデルが必要となる。そこで、図-4に示した降伏曲面を考え、表-1中の(4)式で与えられる降伏関数をフレッシュコンクリートの流動解析に用いることとした。図-4中に示した曲面のうち、円柱形の降伏曲面は流動するマトリックス部の降伏面であり、円錐形の部分は骨材が崩れを起こす限界を与える。このモデルでは、平均垂直応力が比較的小さい場合は、ビンガムモデルで表現されるマトリックス部の降伏値が支配的であり、平均垂直応力が大きくなると、骨材のインターロックによる抵抗力が見かけ上降伏値を大きくする効果をもつ。また、平均垂直応力として引張応力が働く場合は、降伏値を0と仮定する。

2.2 構成則

Bingham が提案した構成則は、単純せん断状態にある粘塑性材料を表現するものであるが、本解析では、Hohenemser・Pragerによって任意応力状態に拡張された表-1中の(5)式を使用する[10]。降伏関数は、前項で示したように、応力状態に依存するが、本報では、塑性粘度は応力状態に拘わらず一定と仮定した。しかし、二相材料においては、骨材は剛体であり、図-5に示したように、試料全体の見かけの塑性粘度は、マトリックス部の塑性粘度より大きく、骨材比や空隙率の影響を受けるものと考えられる。したがって、本解析でパラメータとして与える塑性粘度の値は、マトリックス部の塑性粘度ではなく、試料全体としての塑性粘度を用いる必要がある。モルタル部だけの塑性粘度とコンクリートとしての塑性粘度の関係についてはいくつかの報告がみられるが[11]、骨材のインターロックの影響を考慮した実験データは非常に少ない[12]。

表-1 降伏関数および構成則

<p>●Yield function</p> <p><u>Bingham model</u></p> $f = \sqrt{J_2} - \tau_y \quad \text{-----(1)}$ <p>where, J_2:second invariant of stress-deviation τ_y:yield value of mortar matrix</p> <p><u>Granulated model</u></p> $\tau_y = C + \sigma_n \cdot \tan\phi \quad \text{-----(2)}$ <p>where, C :cohesive stress σ_n:normal stress on shearing plane ϕ:inner frictional angle</p> $f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad \text{-----(3)}$ <p>$\alpha = \tan\phi / \sqrt{9+12\tan^2\phi}$ $k = 3C / \sqrt{9+12\tan^2\phi}$</p> <p>where, I_1:first invariant of stress</p> <p><u>Combined model</u></p> $f = \sqrt{J_2} - \tau'_y \quad \text{-----(4)}$ $\tau'_y = \begin{cases} 0 & (I_1 > 0) \\ (\tau_y, k - \alpha I_1) \max & (I_1 \leq 0) \end{cases}$ <p>where, τ'_y:yield value of fresh concrete τ_y:yield value of mortar matrix</p>	
<p>●Constitutive law</p> $2\eta V_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F\sigma'_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad \text{-----(5)}$ $F = f / \sqrt{J_2}$ <p>where, V_{ij}:tensor of deformation rate η:plastic viscosity σ'_{ij}:tensor of stress-deviation</p>	

表-2 すべり抵抗

<p>●Slipping resistance</p> $\sigma_h = \tau_h + \mu \cdot \sigma_n \quad \text{-----(6)}$ <p>where, σ_h:slipping resistance stress τ_h:adhesive stress μ:frictional coefficient σ_n:normal stress</p> $\sigma_h = S_1 \cdot \sigma_n^\beta + S_2 \cdot \beta + S_3 \cdot \sigma_n + S_4 \quad \text{-----(7)}$ <p>where, β:slipping velocity S_1, S_2, S_3, S_4:parameters of slipping resistance</p>	
---	--

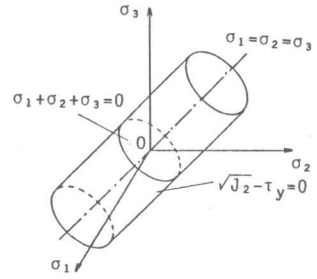


図-1 von Mises の降伏条件

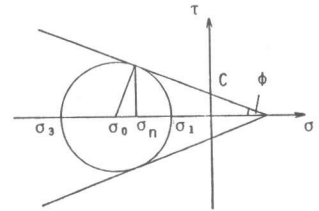


図-2 Mohrの応力円とCoulomb線

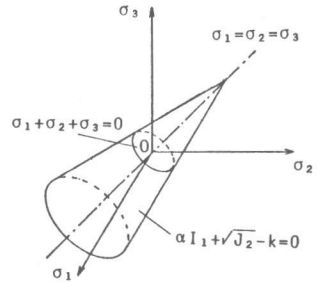


図-3 Drucker+Pragerの降伏条件

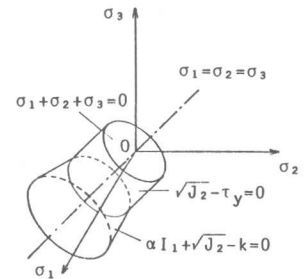


図-4 複合モデルの降伏条件

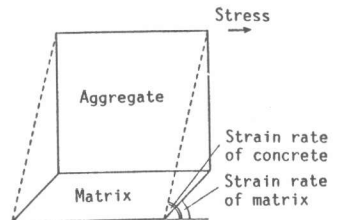


図-5 二相材料の見かけの塑性粘度

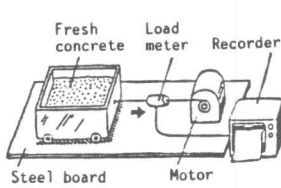


図-6 すべり抵抗試験装置

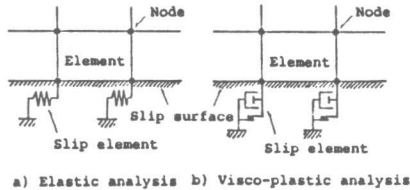


図-8 境界面におけるすべり要素

表-3 各種パラメータ

τ_y	η	C	$\tan\phi$	ρ	S_1	S_2	S_3	S_4
2.0~18.0	0.1~0.3	0.0~8.0	0.0~1.0	2.3	0.03~0.05	0.10	0.04~0.06	0.8~1.6

[Notes]

τ_y : Yield value (gf/cm²), η : Plastic viscosity (kPa·s),
 C: Cohesive stress (gf/cm²), $\tan\phi$: Inner frictional coefficient,
 ρ : Specific gravity,
 S_1, S_2, S_3, S_4 : Parameters of slipping resistance in Eq.(7).

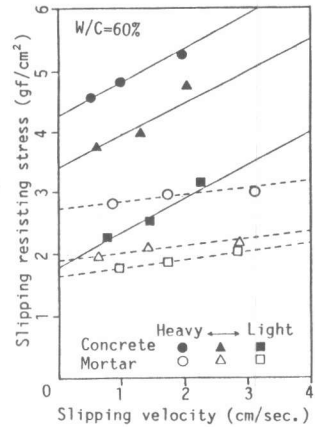


図-7 すべり抵抗応力とすべり速度の関係

3. フレッシュコンクリートの型枠境界面におけるすべり

3. 1 構成則および降伏条件

フレッシュコンクリートと型枠・容器・底板などの外部境界面との間にはすべりが生じるが、すべり面の水平方向に働く反力は表-2中の(6)式で与えられる。動的すべり時には、すべり速度に応じた粘性抵抗が生じるので、すべり抵抗応力は表-2中の(7)式で与えられる。

3. 2 実験概要および結果の考察

スランプ試験などの際に生じるフレッシュコンクリートと底板との間に働くすべり抵抗を測定するため、図-6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、試料の重量を3段階(垂直応力に換算して4~14gf/cm²)、すべり速度を3段階(約3~0.5cm/sec.)に変化させて、速度および荷重を測定し、表-2中の(7)式中の4つのパラメータを定量化した。

図-7はすべり速度と荷重の関係を示したものであり、垂直応力が大きいほど、またすべり速度が速いほど大きな抵抗が生じることがわかる。すべり面における抵抗はすべり速度にほぼ比例しており、ビンガムモデルの一種として扱うことができる。図中の直線は、ほぼ同じ重さの試料について求めた実験式である。図から明らかなように、すべり粘性は、フレッシュモルタルに比較してフレッシュコンクリートの方が大きくなる傾向があるが、垂直応力の変化による影響はほとんどみられない。

4. 解析例

4. 1 解析方法

上記の構成則および降伏条件を、既に提案した粘塑性有限要素解析手法(以下、FEMと略記する)に適用し、若干のシミュレーションを行った。応力状態に依存する降伏条件を考慮したコンクリートの降伏値および塑性粘度の測定結果の報告は皆無であるが、降伏値としてはモルタルマトリックスの降伏値の、また、塑性粘度はコンクリートの塑性粘度の平均的な値を用いた。粘着力および内部まさつ角の値は、1面せん断試験および3軸圧縮試験による測定値[13]を参考にした。今回の解析で用いたレオロジー定数の入力値を表-3に示す。なお、前述の動的すべり挙動を考慮するため、図-8に示すような境界面に接する節点に対応する位置に、弾性計算時にはばね要素を、塑性計算時にはダッシュポットおよびスライダックスとからなるすべり要素を導入した。解析手法の詳細については既報[2,5]を参照されたい。

4.2 スランプ試験のシミュレーション

図-9は、スランプ試験時のコーン引上げ直後のコンクリートに作用する応力の分布をFEMによって求めたものである。図の(a),(b)および(c)は、底面におけるすべり抵抗力を考慮しない場合、考慮した場合、および無限大と仮定した場合をそれぞれ示している。平均垂直応力 (I_1) およびせん断応力成分 ($\sqrt{J_2}$) は、コーンの下部ほど大きくなるが、各層ごとの内部と外部とは、ほとんど相違しない。一方、最下部では、底面のすべり状態によって内部と外部でこれらの値に若干の相違がみられる。図-10は、コンクリート内部の応力状態を、 I_1 および $\sqrt{J_2}$ を両軸とした座標上にプロットしたもので、今回提案した降伏条件との関係を示している。図からわかるように、 I_1 の増加 (圧縮方向) にともなって降伏値が増加する性質を表すような降伏条件を用いると、降伏値を一定とする場合に比べて、下部の流動を抑え、上部の流動を促す結果となる。スランプ試験時のコンクリート内部の応力分布は、コンクリートの自重によって生じ、 I_1 と $\sqrt{J_2}$ はほぼ比例関係にあるため、上部のみが流動する、いわゆる「たる型」の形状は、本解析では表現できない。特にコンクリートでよく観察される「たる型」のスランプ形状は、レオロジー定数の上下異方性あるいは圧密によるものと考えられる。また、図-11に示すように、スランプ値が小さい場合は、内部まさつ角による影響はあまりみられない。

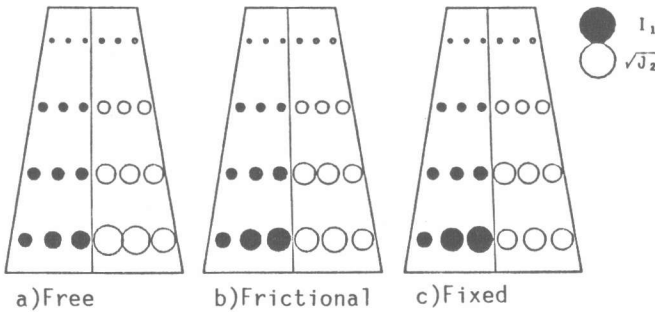


図-9 コーン引上げ直後の内部応力

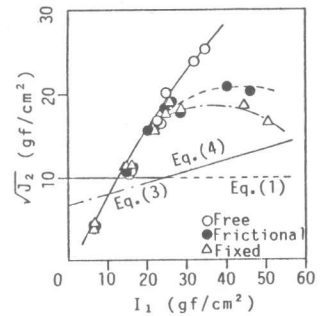


図-10 コンクリート内部の応力状態

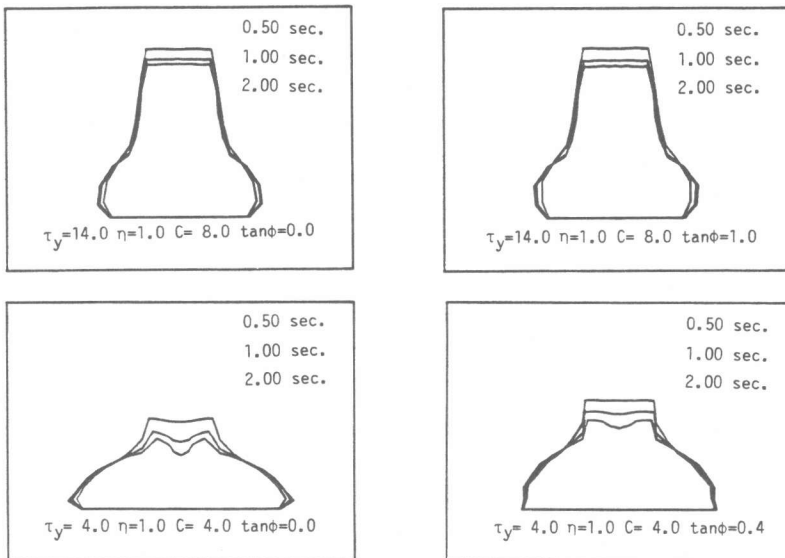


図-11 スランプ試験の解析結果の一例

4. 3 平行板ブラストメータのシミュレーション

平行板ブラストメータは、偏平な試料に大きな垂直応力を与えてレオロジー定数を測定するものである。このため、フレッシュコンクリートが垂直応力に依存する降伏条件をもつと考えた場合、内部まさつ角の値が測定値に与える影響はかなり大きいものと思われる。特に、この試験方法は、比較的硬練りの試料を測定対象としており、骨材のインターロックによる影響は無視できないものと思われる。岡ら[14]が提案した平行板ブラストメータの理論式では、平行板にかかる荷重と高さ方向のひずみ速度の関係を1次式で近似し、応力軸の切片および傾きから降伏値および塑性粘度を求めている。図-12は、平行板ブラストメータのFEMによって得られた応力とひずみ速度の関係を示している。内部まさつ角が0の場合、FEMによる降伏値は、破線で示した入力値と比較して大きくなるが、塑性粘度を示す傾きは直線部でほぼ一致している。しかし、内部まさつ角の増加に伴い、ひずみ速度は急速に小さくなり、コンシステンシー曲線の形状は入力直線と明らかに異なったものとなる。内部まさつ角がコンシステンシー曲線に与える効果は、試料のプロポーシオンに影響されるため、定量的な検討はできないが、骨材のインターロックを考慮する場合には、この試験によって得られたレオロジー定数の値を補正する必要があるものと思われる。以上のことは、回転粘度計や球引上げ粘度計などによってレオロジー定数を測定する際にも充分考慮する必要がある。

5. まとめ

本研究では、フレッシュコンクリートおよびモルタルの広範囲の調査に適用できるレオロジー解析モデルとして、ビンガムモデルによる構成則とMohr・Coulombの降伏条件を組み合わせたモデルを考案した。本報では、紙面の都合で若干の解析例しか示すことができなかったが、本提案モデルでは、応力状態に依存する降伏流動を扱うことができ、粗骨材などの影響を考慮したより正確な流動解析が可能になるものと思われる。

[引用文献]

- [1]岩崎：ワーカビリティ判定法、コンクリート工学、Vol.21, No.10, pp.4-12, 1983.10.
- [2]Tanigawa, Y. and Mori, H. : Rheological Analysis of Slumping Behavior of Fresh Concrete, Proc. of 29th Japan Cong. on Materials Research, pp.129-136, 1986.
- [3]谷川・森・筒井・黒川：粘塑性有限要素法による流動シミュレーション、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.377-380, 1986.
- [4]谷川・森：フレッシュコンクリートの各種コンシステンシー試験方法に関するレオロジー的考察、日本建築学会構造系論文報告集（投稿中）。
- [5]谷川・森・筒井・黒川：フレッシュコンクリートの型わく内流動のシミュレーション方法に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集、No.25, pp.13-16, 1987.2.
- [6]Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G. : The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, 356 pp., 1983.10.
- [7]西林：フレッシュコンクリートの性質、材料、Vol.24, No.260, pp.358-367, 1975.5.
- [8]村田、岡田：最新コンクリート技術選書1、山海堂、pp.75-76, 1981.
- [9]山田：塑性・粘弾性、培風館、pp.211-216, 1980.
- [10]Fung, Y.C. 著、大橋・村上・神谷共訳：連続体の力学入門、培風館、pp.132-172, 1972.
- [11]水口：フレッシュコンクリートのレオロジー構成式に関する一検討、フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集、pp.13-18, 1986.3.
- [12]Holliday, L.: Composite Materials, Elsevier Publishing Comp., New York, pp.354-388, Chap.8, 1966.
- [13]下山・鈴木・大作：静的荷重によるフレッシュモルタルの変形に関する基礎的研究、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第5部、pp.17-18, 1985.9.
- [14]岡：ビンガム物体に対する平行板ブラストメータの理論、材料、Vol.12, No.116, pp.54-116, 1964.

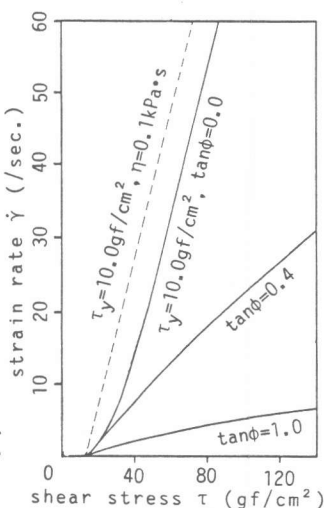


図-12 平行板ブラストメータの解析による応力(τ)とひずみ速度(γ̇)の関係