

## 委員会報告 「フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告」

谷川恭雄\*1・森博嗣\*2

### 【委員構成】

委員長	谷川恭雄 (名古屋大学)	
幹事	橋本親典 (群馬大学)	森 博嗣 (名古屋大学)
委員	井上和政 ( (株) 竹中工務店)	浦野真次 (清水建設 (株) )
	遠藤孝夫 (東北学院大学)	小澤一雅 (東京大学)
	小高茂央 (鹿島建設 (株) )	黒川善幸 (名古屋大学)
	神代泰道 ( (株) 大林組)	鈴木一雄 (全国生コンクリート工業組合連合会)
	寺田謙一 ( (株) 錢高組)	寺西浩司 (前田建設工業 (株) )
	野口貴文 (東京大学)	橋爪 進 (エフ・ピー・ケー (株) )
	藤原浩巳 (日本セメント (株) )	水口裕之 (徳島大学)
	吉野 公 (鳥取大学)	

### 1. 委員会活動の概要

近年になって開発・実用化された高強度・超高強度コンクリート、水中不分離性コンクリート、高流動コンクリートなどは、フレッシュ状態における性状が従来のコンクリートの範囲を大きく逸脱しており、その材料性質を力学的な立場から評価しようとするレオロジー的な研究が関心を集めている。普通コンクリートから、流動化コンクリート、各種繊維補強コンクリートなどの特殊なコンクリートも含めて、あらゆるフレッシュコンクリートの力学性状を統一的に表現することができる力学モデルを構築することが、レオロジー的な研究の主目的であるが、これを実現するためには、これまでに行われてきた各種実験による膨大な実測データを整理・分析し、また、解析的・理論的な観点からの検討を行う必要がある。

本研究委員会では、これまで、各分野で独自に進められてきたレオロジー的な研究を収集し、現在までに得られている知見を、フレッシュコンクリートの力学モデル（構成則）とそれを入力とした流動解析技術の立場から整理を行った。

本委員会では、以下の2つのワーキンググループ (WG) を設置して、2年間の活動を行った。

#### (1) レオロジーモデルWG (主査：森博嗣)

実測データおよび試験方法の整理を行い、各種フレッシュコンクリートに適用しうるレオロジーモデルを構築するための基礎情報と、レオロジー定数の影響要因の整理、および測定手法の検討などを行うことを目的とする。

#### (2) 流動解析WG (主査：橋本親典)

現行の流動解析技術を、理論解析および数値解析の両側面から整理し、各種試験方法のシミュレーション、各種施工条件下におけるワーカビリティ予測などを通して、レオロジー性質が実

\*1 名古屋大学 教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

\*2 名古屋大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

施工面に与える影響を解析的に明らかにする技術の可能性を検討することを目的とする。

これらの研究活動の成果は、委員会報告書として取りまとめられ、1996年4月23日に開催された「フレッシュコンクリートの流動性と施工性」に関するシンポジウムで公表している。本稿では、以下に、それらの概要について述べる。

## 2. 力学モデルの構築

一般に、軟らかいモルタルやコンクリートについては、おおまかにみれば流動性・変形抵抗性をビンガムモデルで表現することができる。現在、フレッシュコンクリートのレオロジー的な研究のほとんどは、ビンガムモデルを用いて、降伏値と塑性粘度の2つのビンガム定数により材料性状の評価・管理を試みている [1, 2]。

しかし、実際にフレッシュコンクリートが、正確にビンガムモデルで表現されるような単純な性状を持っているかという点に関しては十分に明らかになっていない。測定方法にも問題が残されているが、多くの実験結果によれば、チキソトロピーと呼ばれる非線形のコンシステンシー曲線が測定されることが多い。また、フレッシュコンクリートの場合、測定中の混練効果による分散性変化や測定装置の特性として捉える見方もあり、共通認識を得るには至っていない。

フレッシュコンクリートに対しては、スランプ試験に代表されるように、従来、「軟練り」と「硬練り」といった軟度のみを指標とした評価試験が行われてきたが、このような軟度のみによる1次元的なコンシステンシー評価の限界が、各種の新材料の登場によって顕在化し、フレッシュコンクリートのコンシステンシーには、軟度と粘度による2次元的な評価、すなわちビンガムモデルを用いた評価が少なくとも必要であることが認識されつつある [3]。

特に、これまでほとんど注目されていなかったコンクリートの粘性は、機械化施工にとって大きな要因のひとつとなる。ポンプによる高所・長距離圧送、鋼管充填コンクリート工法、無振動打設工法をはじめとするコンクリート生産・施工分野の合理化を推し進めるためには、従来の経験則の適用範囲を超越した広範囲で精密な情報とそれを支える高度な技術が不可欠となる。

以上のように、ビンガムモデルを適用することで、フレッシュコンクリートの材料パラメータが1つ増加した。しかし、本来不均質なコンクリートを平均化し、均質な連続体として、フレッシュコンクリートをビンガムモデルに置換する過程では、分離や粗骨材の運動といった情報が欠落することになる。逆に言えば、連続体による近似によって、実現象をより正確に再現するためには、ビンガムモデルよりさらに複雑なレオロジーモデルが必要となる [4]。2つのパラメータでも、十分ではないのである。ただし、現状では、ビンガムモデルを用いた評価を行う第一段階をクリアすることが先決であり、ビンガムモデルを前提としたデータの蓄積が、レオロジー分野の研究者の一般的な優先課題となっている。

高流動コンクリートのように、狭い鉄筋間を通過し細部にわたって十分な充填性が得られるような性能や、障害部を流動する際の粗骨材とモルタルの分離抵抗性などの局所的な現象をチェックするための試験方法が検討されるようになり [5, 6]、よりミクロな領域におけるコンクリートの流動機構を把握する必要性が高まってきた。鉄筋間などの間隙を通過するときの変形流動抵抗性を論じるには、固体である粗骨材の運動を無視することはできない。フレッシュコンクリートの流動をより詳細にシミュレートする場合にも、コンクリートを均質なビンガムモデルで近似す

る立場では不十分な課題が数多く出現する。

スランプ試験時のような試料全体にわたる比較的大きな領域におけるせん断変形とは異なり、鉄筋間通過流動は、コンクリートを均質とはみなせないようなごく小さな領域における大変形を取り扱うことになる。また、全体を均質な流体として粗骨材も含めた平均的な変形抵抗性を利用する立場 [4] とは対照的に、粗骨材の運動を個々に考慮し、モルタルの変形抵抗性によって現象を捉えるモデル化手法も提案されている [7, 8]。均質モデルを用いる立場では、後述の流動解析などで計算手法は単純化される代わりに、取り扱う領域のサイズによって見かけの平均レオロジー定数が異なってくるため、この寸法効果を実験的に定量化する必要がある。

さらに、粗骨材の接触に起因する内部摩擦 [4]、モルタルやペーストと固体表面の間で生じる付着抵抗 [9]、振動下における性状の変化 [10] などの問題が指摘されており、いずれもビンガムモデルの2つのビンガム定数を不変の値とする立場では説明できない。個々の粗骨材同士の距離が維持された状態と、何らかの外力によって粗骨材が接近し、その間に存在するモルタルが周囲に流出する状態では、全体系の平均的な変形抵抗性が明らかに異なり、同様の議論は、細骨材とペースト間でも成立する。つまり、取り扱う領域のサイズ、応力状態、流動速度、変形量の大小などによって、変化するビンガム定数を用いることが必要になる。このような、フレッシュコンクリートの変形抵抗性を支配する各種要因のメカニズムを、よりミクロな立場から解明することが重要な課題の1つとなっている。

粗骨材のインターロックを考慮するため、モール・クーロンの降伏条件のパラメータである付着力と内部摩擦角を、フレッシュコンクリートの材料パラメータとして用いる研究が以前から行われているが [11]、これらの多くは比較的硬練りのコンクリートを対象としたものであった。しかし、この降伏条件をビンガムモデルに導入し、内部応力に依存する降伏値および塑性粘度をパラメータとするレオロジーモデルも提案されており [4]、数値シミュレーションに適用した例も報告されている。このようなフレッシュコンクリートの新しい力学モデルを構築することによって、より厳密な流動現象のシミュレーションが可能となるが、一方では、材料パラメータ数は増加し、材料特性を定量化するためには、複雑な装置と測定手順が必要となる [12]。

コンクリートが打設時に受ける振動については、以前より実験的 [13]・解析的 [14] 検討が行われているが、その流動促進効果 [10]、締固め効果 [15]、振動の伝播および減衰 [16] などの諸現象を説明・再現するような理論や、十分な実験データに基づいたモデルなどの提案は、汎用的な形では行われていない。これは、上記の固液混合流体のミクロなメカニズムにも深く関連する問題であり、無振動打設コンクリートのような特殊な場合を除けば、早急な解決に向けて努力する必要がある。

さらに、変形抵抗性以外にも重要なものとして、外部境界面におけるすべり抵抗挙動を表現するレオロジーモデルがある [17]。すべり抵抗とは、境界面近傍における、マトリックス流体のせん断変形抵抗と固体粒子の摩擦抵抗を含めたマクロな概念であり、前者は主としてすべり速度に、後者は主としてすべり面に働く垂直応力に比例して大きくなる。したがって、コンクリートのすべり抵抗特性は、モルタルのレオロジー性質と粗骨材条件に支配されている。

以上のような、ビンガムモデルが適用できない各種特性に関しては、いずれも定量的な検討が不十分であり、新たなモデルを構築するためには、パラメータの測定方法も含めて、情報の蓄積および整備が必要であろう。

### 3. 流動解析

フレッシュコンクリートの力学モデルを構築し、これを用いて、実際のフレッシュコンクリートの流動現象を解析し、その作業性や充填状況などを理論的に、あるいは数値解析的に予測する技術が開発されつつある。これらは、フレッシュコンクリートのレオロジー的研究の次のステップの目標といえるテーマである。図-1に、構造設計に対比させて、コンクリートに関する施工設計のフローを、モデル化と解析の位置づけとともに示す。

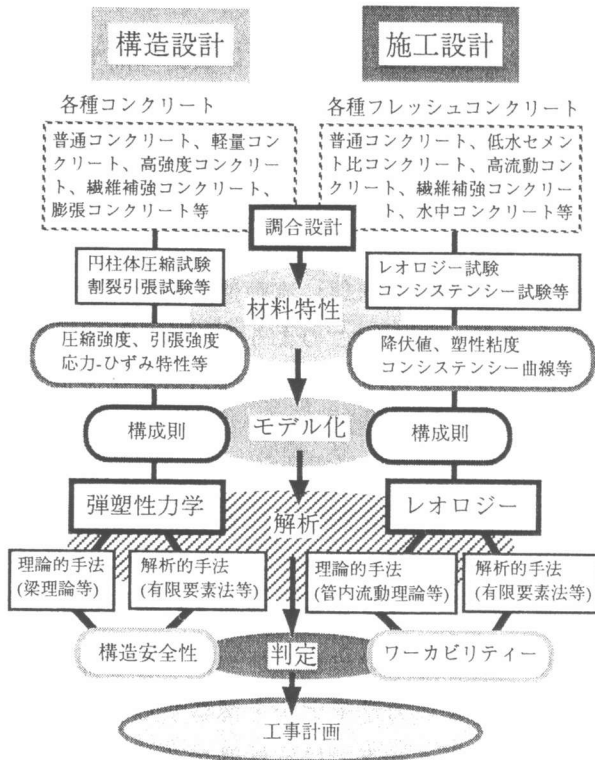


図-1 構造設計と施工設計のフロー

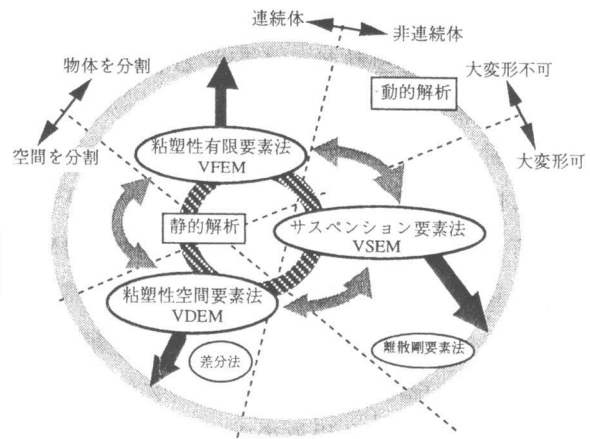


図-2 主な解析手法の位置づけ

最も精度のよい解析結果が得られている流動現象は、各種レオロジー試験や各種コンシステンシー試験時のフレッシュコンクリートの流動挙動である [3]。当然のことながら、レオロジー試験の目的は、その試験装置内に存在するフレッシュコンクリートに任意の変形量を与えたときに発生する抵抗力を測定し、算出されたせん断応力とせん断ひずみ速度からレオロジー定数を決定することである。したがって、ある一定の変形量を与えて試験装置内を流動するコンクリートに発生するせん断応力とせん断ひずみ速度を求める過程は、流動解析を行うことと等価であり、最も精度のよい解析結果が得られるのは自明である。しかしながら、レオロジー試験装置内の状況を数値流動解析することによって、実際の測定中の流動状況を把握することが可能であり、装置の適用限界などを知ることができる。

コンシステンシー試験時のフレッシュコンクリートの挙動は、レオロジー試験の場合と比較して、より実施工の流動現象に近い。そのため、コンシステンシー試験時の流動挙動の解析が、各種の理論的・数値解析的手法によって試みられている。これらの解析では、実施工条件と比較すれば、境界条件が単純であり、比較的良好な結果が数多く得られている。図-2には、現在提案されている主な数値流動解析手法を比較したものである。

このような試験時の流動シミュレーションでは、一般に、フレッシュコンクリートの変形状況が実験的にも定量的な数値として求められるため、解析結果との比較が容易にできる。これに対して、実際の施工条件下におけるフレッシュコンクリートの流動解析では、計算規模の問題に加えて、流動解析を行うために必要な力学的条件に関する情報量が極めて少なく、また、解析値と比較すべき実験値を定量的に求めることが困難な場合も多い。つまり、実施工レベルにおける施工性予測を行うためには、フレッシュコンクリートの材料性質に関する情報だけでなく、各種施工条件に関する情報を整理し、モデル化する必要がある。

従来、新しい材料を用いる場合や、特殊な工法を実施する場合には、実施工条件を模擬した実物大の施工実験が行われ、その結果に基づいて工事の可否を判定してきた。もし、フレッシュコンクリートの流動解析技術が十分な精度を有するのであれば、この種の膨大な労力を節約することが可能となり、早期の実現が期待されている。しかしながら、現状の流動解析技術は、まだ十分な実用段階には至っていない。

その主な原因の1つは、流動解析を行う際の入力データにあり、必要なコンクリートの流動状態を定量的に把握するための情報が圧倒的に不足していることが挙げられる。例えば、コンクリートの打設状況の流動解析を行う場合、施工性の予測として要求されている情報は、型枠隅角部の充填性、鉄筋間の通過性、粗骨材の分離抵抗性、表面の仕上げ性などの確認であり、いずれも極めて局所的な現象に関する情報である。これらの要求に対して、流動解析の結果が十分に応えるためには、先に述べたように、降伏値と塑性粘度のみで表現される力学モデルよりも、さらに精密なフレッシュコンクリートの力学モデルを構築する必要がある。モデルさえ確立できれば、解析は可能と言っても過言ではない。

#### 4. まとめ

フレッシュコンクリートの分野に力学もしくはレオロジーを導入する目的は2つある。1つめは、レオロジー定数を用いてフレッシュコンクリートの性質を定量的に把握し、より精密な材料管理を実現することであり、2つめは、定量化された材料の力学性質を入力データとして、コンクリート施工における作業性を予測する技術を確立することである。

フレッシュコンクリートのレオロジーに関する現在までの研究では、主として、上記の前者の目的に重点が置かれていたが、評価指標による複数材料間の品質比較のみを目的とした最初のステップから、実際の生産・施工性への応用手段を模索する段階に至っており、数多くの複雑な問題に直面している。したがって、後者の技術、すなわち流動解析を前提とした評価を行うための基礎概念を早急に構築することが重要である。

フレッシュコンクリートをレオロジー理論に基づいて取り扱うことは、この材料を用いたあらゆる生産行為の合理化が目的であり、作業の最適化のための解析技術の確立が最終目標となる。フレッシュコンクリートの力学モデルは、流動解析のコアとなる最も重要な仮定であり、力学モデルに関する検討は、現在も、また将来的にも、フレッシュコンクリート関連の研究の最も重要な課題といえる。

## 【引用文献】

- [1] 土木学会：フレッシュコンクリートの物性値の測定ならびに挙動に関するシンポジウム論文  
集, 198pp., 1983.3.18
- [2] 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告書, 199pp., 1990.3.
- [3] 谷川恭雄, 森博嗣：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法 —スランプ値から何  
がわかるか—, コンクリート工学, Vol.25, No.5, pp.4-16, 1987.5.
- [4] 森博嗣, 谷川恭雄：フレッシュコンクリートの構成則に関する研究, 日本建築学会構造系論文  
報告集, No.396, pp.9-16, 1989.2.
- [5] 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (I), 212pp., 1993.5.
- [6] 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), 279pp., 1994.5.
- [7] 森博嗣, 渡辺健治, 梅本宗宏, 谷川恭雄：二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解  
析手法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.427, pp.11-21, 1991.9.
- [8] Ozawa,K., Nanayakkara,A. and Maekawa,K.: Evaluation of Aggregate Particle Motion in Liquid-Solid  
Flows of Model Concrete, Proc. of JSCE, No.408 / V-11, pp.187-193, 1989.8.
- [9] 井上和政, 和泉意登志, 戸田彰彦, 阿部靖弘, 田中恭一, 橋爪進：超ワーカブルコンクリートの  
調合設計に関する基礎研究 (その2：超ワーカブルコンクリートを構成するフレッシュモルタ  
ルの粘性特性と付着特性に関する一考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), A,  
pp.917-918, 1992.8.
- [10] 寺西浩司, 谷川恭雄, 森博嗣, 渡辺健治：振動を受けるビンガム流体のコンシステンシーに関  
するレオロジー的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.357-362, 1993.6.
- [11] 下山善秀：静的外力による硬練りコンクリートの変形に関する研究, 土木学会論文集, No.390  
/ V-8, pp.141-149, 1988.2.
- [12] 森博嗣, 田中政史, 谷川恭雄：フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究,  
日本建築学会構造系論文報告集, No.421, pp.1-10, 1991.3.
- [13] Tattersall,G.H. and Baker,P.H.: An Investigation of the Effect of Vibration on the Workability of Fresh  
Concrete Using a Vertical Pipe Apparatus, Magazine of Concrete Research, Vol.41, No.146, pp.3-9, 1989.
- [14] Mori,H. and Tanigawa,Y.: Flow Simulation of Fresh Concrete Subjected to Vibration, Magazine of  
Concrete Research, Vol.42, No.153, pp.223-232, 1990.12.
- [15] ACI Committee 309: Behavior of Fresh Concrete During Vibration, Jour. of ACI, Vol.78, No.1-2, pp.36-  
53, 1981.
- [16] 岩崎訓明, 坂本信義：コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性, 土木学会論文集,  
No.402 / V-10, pp.87-96, 1989.2.
- [17] 谷川恭雄, 森博嗣, 田中政史, 梅本宗宏, 黒川善幸：フレッシュコンクリートと鋼板のすべり抵  
抗力に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), A, pp.111-112, 1987.10.