型枠内およびパイプ内におけるフレッシュコンクリートの
流動シミュレーション

FLOW SIMULATION OF FRESH CONCRETE IN FORM AND PIPE

渡辺 健治*, 寺西 浩司**, 森 博嗣***, 谷川 恭雄****

Kenji WATANABE, Kohji TERANISHI, Hiroshi MORI and Yasuo TANIGAWA

A new method for analyzing the behavior of fresh concrete, i. e., a viscoplastic divided space element method (VDEM) is proposed, which is applicable to simulate the flow and deformation of fresh concrete in practical concreting works, and some analytical results are shown in this paper. This method can be applied to calculate the large deformation of fresh concrete at casting in the form in which reinforcing bar and steel exist, and also to examine the effect of vibration. Such characteristics and applicability of VDEM are compared with the viscoplastic finite element method (VFEM) and the viscoplastic suspension element method (VSEM) proposed earlier by the authors.

Keywords : fresh concrete, rheology, flow simulation, viscoplastic divided space element method

フレッシュコンクリート, レオロジー, 流動シミュレーション, 粘塑性空間要素法

1. まえがき

土地の有効利用, 工期の短縮, 労務者の不足などに対する社会的要請から, コンクリートの高性能化や工事の合理化・省力化に関する要求が高まっている。これらの課題に対して, 高強度・超高強度コンクリート, 高流動コンクリート, 水中コンクリート, 繊維補強コンクリートなどの新しいタイプのコンクリートが開発され, また, 圧入工法や無振動打設工法などの新工法が次々と試行されている。

フレッシュコンクリートの諸性質をレオロジーの観点から整理し, その流動挙動を事前に予測する技術確立することは, コンクリート工事の合理化, さらに自動化のための技術開発の基礎となるばかりではなく, 「施工設計」³⁾ の中枢を成す技術としても重要な課題である。

筆者らは, 既に粘塑性有限要素法 (VFEM)^{4), 5)} および粘塑性サスペンション要素法 (VSEM)^{6), 7)} を提案し, フレッシュコンクリートの各種レオロジー試験・コンシステンシー試験に関する解析を行い, 解析手法の妥当性と適用範囲を示してきた。しかし, これらの手法は, 大

きな計算容量を必要とするため, 現段階では, 実際のコンクリート打設のような実用規模でのシミュレーションに適用するには至っていない。

本報では, 上記の問題点を克服するため, 実施工条件下におけるシミュレーションが可能な解析手法 (粘塑性空間要素法) を提案する。また, 型枠内に打設されるフレッシュコンクリートの流動挙動に関して, 同手法による若干の解析例を紹介し, 本解析手法の適用範囲や妥当性を示すとともに, 実験定数など解析に必要な入力情報について検討する。

2. 解析手法

2.1 概 要

本報で提案する解析手法 (以下, 粘塑性空間要素法と呼び, VDEM と略記) の概念を図-1 に, VDEM および VFEM のフローチャートの比較を図-2 に示す。

VDEM では, フレッシュコンクリートが流動すると予想される空間全体を図-1(a) に示すように空間要素 (以下, 要素と略記) に分割し, フレッシュコンクリー

この研究の一部は, すでに文献1) および2) に発表した。

* 名古屋大学大学院 大学院生・工修

** 前田建設工業 研究員・工修

*** 名古屋大学工学部建築学科 助教授・工博

**** 名古屋大学工学部建築学科, 教授・工博

Graduate Student, Nagoya Univ., M. Eng.

Maeda Co., M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, School of Eng., Nagoya Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, School of Eng., Nagoya Univ., Dr. Eng.

(a) 要素の作成手順

(b) 計算手順

図—1 粘塑性空間要素法の概念

トが存在する要素には仮想の浮子（マーカー）をランダムに配置する。マーカーが存在する要素には、ビンガム流体の性質と自重を与え、その他の要素には、粘性の非常に小さい（後述の解析例では1 Pa）ニュートン流体の性質を与える。この初期条件を用いて、先に提案したVFEM^{4),5)}と同様の粘塑性計算を行い、節点変位量を求める（図—1(b)）。しかし、VFEMとは異なり、VDEMでは、図—1(b)に示すように、節点変位量から各マーカー位置における変位量（流速ベクトル）を計算し、マーカーのみを移動させる。マーカーは、以前に存在した要素の領域から別の要素の領域へも移動する。ある要素の属性（コンクリートか非コンクリートか）は、その要素に存在するマーカーが存在するか否かに依存している。節点変位は計算の過程で求められるが、実際には節点は移動させない。この点が本解析手法の最大の特徴であり、この処理によって、要素構成にとらわれることなく、コンクリートの大変形（流動）を表現することが可能となる。

VDEMとVFEMの特徴の比較を表—1に示す。

2.2 構成則

一般に、フレッシュコンクリートは、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表現し得ることが知られている⁸⁾。Binghamが提案した降伏関数は、単純せん断状態

(a) VFEM

(b) VDEM

図—2 VFEMおよびVDEMのフローチャート

にある粘塑性材料を表現するものであるが、VDEMではVFEMと同様に、Hohenemser・Pragerによって任意応力状態に対して拡張された式を用いる⁹⁾。この降伏関数を図—3に示す。

筆者らは、フレッシュコンクリートの降伏関数として、応力状態に依存した降伏条件を持つ複合モデルを提案しており¹⁰⁾、本解析手法もこの複合モデルに対応しているが、入力データが不足しているため、本報告では応力状態に依存しない条件（ビンガムモデル）で解析を行った。しかし、コンシステンシー試験などの小規模なシミュレーションとは異なり、一般の施工条件下ではコンクリートの自重などによる応力がレオロジー定数に比較してかなり大きくなり、特に内部摩擦角が試料の流動挙動に大きく影響することが考えられるため、今後、入力情報の整備が必要と思われる。

2.3 境界条件

VDEMでは、節点を変位させずにマーカーの移動に

表—1 粘塑性空間要素法 (VDEM) と粘塑性有限要素法 (VFEM) の比較

Items	Viscoplastic divided space element method - VDEM -	Viscoplastic finite element method - VFEM -
Input parameters	*Rheological constants of fresh concrete	
Analytical method	*Divide all space into elements and cells, calculate whether fresh concrete exists in each cell or not.	*Divide fresh concrete into elements, and calculate deformation of elements.
Description of flow	*Displacement of markers.	*Displacement of nodal points.
Characteristics	*Large deformation, separating and gathering of concrete are easily analyzed. *Accuracy of solution depends on size of cell. *Boundary condition is simple.	*Applicable subjects are limited for restraint of element construction. *It is applicable to micro problem. *Accurate solution can be obtained if deformation is small. *Boundary condition is complicated.

図—3 構成則と降伏関数

よってその流動挙動を表現しているため、VFEM に比較して境界条件を簡単に設定することができる。また、VDEM では、垂直応力とすべりせん断速度の双方に依存したすべり抵抗力を持つ境界節点を設けることによって、試料と境界壁面の間に生じるすべり挙動を表現することができる。すべり抵抗力に関するレオロジーモデルおよび構成則を図—4 に示す。VDEM では、流動をマーカーによって表現することから、ある要素の一部の節点が固定されている場合でも、図—5 に示すように、その要素が変形すればマーカーは移動し、壁面近傍の空間要素のサイズや性質を調整することによって疑似的に壁面におけるすべり挙動を表現することが可能となる。この手法を用いると、境界条件を非常に単純化させることができる。また、3次元壁体の前後面におけるすべり抵抗力を、みかけのレオロジー定数の増加としてとらえることによって、2次元問題として解析することが可能であり、大規模問題を比較的少ない計算容量で取り扱うことができる。後述の解析例では、本解析手法のこの特徴を生かして、フレッシュコンクリートの流動挙動を小規模な計算能力で再現することに重点を置いている。本報では、すべり挙動などの局所的な現象を考慮していないが、

図—4 すべり挙動に関する構成式

(a) すべりに関する性質を (b) すべり要素を別に設けた場合要素に含ませた場合

図—5 VDEM 固有のすべり挙動の表現方法

入力データが整備されればより精度の高い解析を行うことができる。

3. 解析結果とその考察

3.1 部材の形状・寸法が流動挙動に及ぼす影響

先に提案した粘塑性サスペンション要素法 (VSEM) では、骨材寸法を解析上の最小単位としており、コンクリートの流動挙動を正確に表現することができる反面、計算量の関係から事実上は小規模な対象しか取り扱うことができなかった。VDEM は、VFEM と同様にフレッシュコンクリートを均質体として取り扱っているため、空間要素の大きさを解析対象に合わせて任意に設定することができる。また、境界条件に関しては VFEM より

高い自由度を持っているなど、両解析手法の長所を兼ね備えている。

図—6 および図—7 に梁型枠へのコンクリート打設に関する VDEM シミュレーション結果の一例を、また、図—8 に実大規模の壁状型枠への打設に関する VDEM シミュレーション結果の一例を示す。

いずれのシミュレーションも同一の解析プログラムとパーソナルコンピュータによって計算されたものである。鉄筋やフランジおよび開口部の下面における充填性などの局所的な問題を取り扱う場合は、周辺のコンクリートの流入状況を再度入力データとして、クローズアップされた領域のみを再度細かい分割の要素を用いてシミュレートし直すことも可能である。ただし、要素サイズの大小とコンクリートのレオロジー定数の入力値は無関係ではない¹¹⁾。コンクリートの変形性質は複合材料としての見かけのものであり、取り扱うサイズに依存し

図—6 RC 梁断面内での流動挙動（解析結果）

図—7 SRC 梁断面内での流動挙動（解析結果）

(a) 型枠上部からの打設

(b) 型枠下部からの圧入打設

図—8 打設位置が流動挙動に与える影響（解析結果）

ている。この問題に関する入力情報は現在皆無であるが、前述の VDEM などの解析結果と組み合わせたシミュレーションが将来的には必要になるものと思われる。

3.2 打設方法が流動挙動に及ぼす影響

VFEM では、フレッシュコンクリートを連続体として取り扱うため、ポンプ吐出口を移動・停止させる場合、障害物などでコンクリートがちぎれ、再度結合する場合、コンクリートの打設容積が変化する場合などのシミュレーションを行うことが極めて困難であった。VDEM では、マーカーによってコンクリートの存在を表現することから、打設位置の要素に対して節点力（圧力）やマーカーの発生条件などを設定することによって、打設位置や打設時の圧力・速度などを考慮した施工シミュレーションを行うことが可能である。

ポンプの吐出口を移動させながら打設した場合のシミュレーション結果の一例を図—9 に示す。この例では、打設口を毎秒 30 cm で左方へ移動させることによって、比較的硬練りのコンクリートでもコンクリート上面の傾斜角が小さくなり、施工効率が改善される様子を確認することができる。

3.3 振動・配筋の取り扱い方法

3.1 で示した解析例のように、型枠内の鉄筋・鉄骨などの障害物を直接考慮することも可能であるが、VDEM では空間要素の性質を制御することができるため、流動抵抗や流動促進効果を特定の部位の性質として与えることができる。ただし、この場合も、振動や配筋

図—9 打設口を移動させた場合の打設

などの条件によるみかけのレオロジー定数の変化性状をあらかじめ把握しておく必要があるが、この種のデータは非常に少ないのが現状である。

筆者らは、みかけのレオロジー定数の測定を行うために、配筋や振動が流動挙動（みかけのレオロジー性質）に与える影響について既に実験的検討を行っている¹²⁾。

VDEM による解析および実験結果の比較の一例を図—10 に示す。図中の点および線は、それぞれ解析および実験の結果を示しており、本解析が実験結果を十分な

(a) 無筋・加振の場合

(b) 配筋・無振動の場合

図—10 配筋・振動の有無による流動挙動の変化

図—11 レオロジー定数の分布

精度でシミュレートしていることがわかる。図—11 に、各条件下における試料のみかけのレオロジー定数を示す。配筋によって流動抵抗が増すにつれて、みかけのレオロジー定数（降伏値 τ_y および塑性粘度 η ）は増大する。また、無振動から振動への変化に着目すると、一般に、加振することによって τ_y が大幅に減少するが、鉄筋を配置した型枠では η の減少も顕著である。これらの実験結果を実施工シミュレーションの入力情報として還元し、配筋や振動による影響を疑似的に考慮することが可能となるが、反面、求められる入力パラメータとしては各種条件下におけるバリエーションを網羅する必要がある。

3.4 鋼管内の充填状況およびポンプの圧力損失の予測

一般の RC 部材では、型枠を除去した後コンクリートの不充填部に対して事後修復することができるが、鋼管充填コンクリートの場合は、その充填状況を確認することは困難であり、施工性の合否判定が難しい。また、直管やテーパ管などの場合は、その圧力損失を理論的に計算することが可能であるのに対して、この種の構造に用いられる鋼管は径が大きく細管の層流理論を適用することが難しく、また内ダイヤフラムなどの障害がある場合も多く、圧入打設の際の圧力損失を算定するためには数値解析による予測が有効な手段の一つとなる。

VDEM を用いた鋼管充填シミュレーションの一例を図—12 に示す¹²⁾。この解析では、ダイヤフラムの開口面積を変化させ、この値が圧力損失に及ぼす影響について調べた。試料上面の形状にプラグフロー現象がみられ、内ダイヤフラム下部に空隙が残りにくい状況を示している。また解析より得られた有効開口面積率 (D^* : 圧力および流量に相当する理想管の径を実際の管径で除した値) と実際の開口面積率 (D : ダイヤフラムの開口面積を管径で除した値) の関係を図—13 に示す。同図中の

図-12 鋼管内での試料の流動状況

図-13 有効開口面積率 (D^*) と開口面積率 (D) の関係

一点鎖線は、ダイヤフラムによる圧力損失が、開口部と同じ径の円管の理論解¹³⁾に相当することを示している。同図より明らかなように、実際の開口面積率 (D) に比べて有効開口面積率 (D^*) は 20～30 % 程度大きな値となっており、ダイヤフラムを持つ鋼管の圧力損失は、その開口部と同径の直管よりは小さいことが明らかとなった。

4. 本解析手法の位置づけ

コンシステンシー試験のシミュレーションに実績のある粘塑性有限要素法 (VFEM) を基準に考えると、図-14 に示すように、粘塑性サスペンション要素法 (VSEM) は、粗骨材相互の接触などを詳細に考慮したミクロな解析に適しており、逆に本報で提案した VDEM は、フレッシュコンクリートの諸性状を単純化させたマクロな解析手法として位置づけることができ

図-14 VDEM 解析手法の位置付け

る。VSEM ではペーストレベルのレオロジー定数を入力値とした解析が可能であるのに対し、VFEM ではコンクリートのレオロジー定数が、また VDEM では施工条件を加味した入力値が必要となる。一方では、VSEM がレオロジー試験、ワーカビリティ試験および模型実験などの小規模なシミュレーションにしか適用できないのに対し、VDEM では模型実験や実大施工を効率よくシミュレートすることが可能となる。

以上のように、実験データの整備状況に応じて各種の解析手法を適宜選択し、要求される解析精度を満足させることが可能となる。

また、VSEM によって得られたミクロな数値解析の結果を VFEM の入力値として用い、さらにその出力結

果を VDEM の入力値として用いることが可能である。このような利用形態は、各解析手法の長所を組み合わせた合理的な方法といえる。

5. まとめ

本研究では、フレッシュコンクリートの流動解析手法として粘塑性空間要素法 (VDEM) を提案した。また、本手法を用いて、各種条件下におけるコンクリートの流動挙動について解析し、その適用範囲と妥当性を示すとともに、解析に要求される入力情報について検討した。本研究で提案した VDEM は、他の解析や実験から得られた情報に依存する割合が大きく、基礎物性のみの入力情報では実用的な解析を行うことが困難であるが、新材料および新工法が開発されるたびに、大規模な施工実験が繰り返されている現状を考えれば、現行の施工実験のかなりの部分をシミュレーションに置き換えることが可能であり、基礎的な実験データを蓄積することによって VDEM 解析の有用性が高まるものと考えられる。

謝 辞

本研究費の一部は、平成 4 年度文部省科研費・奨励研究 (A)、同一般研究 (B)、同特別研究員奨励研究、並びに牧田国際育英会学術研究助成金によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) Tanigawa, Y., Mori, H. and Watanabe, K. : Flow Simulation of Fresh Concrete by Viscoplastic Divided Space Element Method, Proc. of the 33rd Japan Congress on Materials Research, pp. 227~233, 1990. 3.
- 2) 谷川恭雄, 森 博嗣, 渡辺健治, 寺西浩司 : 空間要素法によるコンクリートの打設シミュレーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 415~420, 1992. 6.
- 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, コンクリート工学, Vol. 25, No. 5, pp. 4~16, 1987. 5.
- 4) Tanigawa, Y. and Mori, H. : Analytical Study on Deformation of Fresh Concrete, Jour. of Engineering Mechanics, Proc. of ASCE, Vol. 115, No. EM3, pp. 493~508, 1989. 3.
- 5) 森 博嗣, 谷川恭雄 : 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解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 374, pp. 1~9, 1987. 4.
- 6) Tanigawa, Y., Mori, H. and Watanabe, K. : Analytical Study on Flow of Fresh Concrete by Suspension Element Method, Proc. of the RILEM Colloquium on Properties of Fresh Concrete, Hanover, pp. 309~316, 1990. 10.
- 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) Tattersall, G. H. and Banfill, P. F. G. : The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, 356 pp., 1983.
- 9) Fung, Y. C. : 固体の力学 / 理論, 培風館, 524 pp., 1970. 4.
- 10) 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.
- 11) 江守一郎・Schuring, D. J. : 模型実験の理論と応用, 技報堂, 255 pp., 1974.
- 12) 谷川恭雄, 森 博嗣, 渡辺健治, 寺西浩司 : 空間要素法によるコンクリートの打設シミュレーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 415~420, 1992. 6.
- 13) 谷川恭雄, 森 博嗣, 野田 豊 : フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 203~208, 1991. 6.

(1992 年 12 月 28 日原稿受理, 1993 年 6 月 14 日採用決定)