サスペンション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方法[†]

谷 川 恭 雄* 森 博 嗣**
梅 本 宗 宏*** 渡 辺 健 治***

Flow Simulation of Fresh Concrete by Suspension Element Method

by

Yasuo TANIGAWA*, Hiroshi MORI**, Munehiro UMEMOTO***
and Kenji WATANABE***

The authors have proposed a visco-plastic finite element method (VFEM) to estimate the deformation of fresh concrete by using a homogeneous continuum model. In this paper, a new method which is called the suspension element analysis (SEM) is proposed as another approach to the flow simulation of fresh concrete. The simulation method by SEM supplements the weakness of one phase model in VFEM by using a two phase model consisting of aggregate and matrix. SEM can consider the effects of aggregate, segregation and more complex behaviors of concrete such as collapse, separation, and mixing, and some examples of analytical results obtained by SEM are shown herein.

Key words : Fresh concrete, Flow simulation, Bingham model, Suspension element method, Segregation, Visco-plastic finite element method

1 ま え が き

コンクリート工事における合理化・省力化は、RC構造物の経済性と耐久性の向上につながる重要な課題のひとつであり、フレッシュコンクリートの挙動に関するレオロジー的研究が近年数多く報告されている¹⁾。フレッシュコンクリートのレオロジーに関する研究のうち、特に、材料の性質に基づく流動解析技術の開発・確立を目的とした研究は、フレッシュコンクリートという不確定性を多分に含んだ解析対象を取り扱うため、技術的な困難さ・複雑さとともに、解析結果の妥当性および適用範囲など多くの障害を克服しなければならず、現在、発展途上の段階にあるといえる^{2),3)}。

筆者らは、フレッシュコンクリートをビンガムモデルと仮定して、粘塑性有限要素法(VFEM)を用いた汎用的な流動シミュレーション方法を提案し⁴⁾、これまでに、各種コンシステンシー試験、各種レオロジー試験および型枠内で振動締固めを受けるコンクリートの流動に関する解析を行い、その適用例を示してきた^{5),6)}。しかし、VFEMは、解析モデルとして連続体要素を用いているため、打設、混練、ポンプ圧送時など

におけるフレッシュコンクリートの複雑な流動挙動のシミュレーションを行う際には、適用範囲に制約を受けることが少なくない。

本報では、VFEMの問題点を解決するため、フレッシュコンクリートを骨材とマトリックスからなる二相材料として取り扱う新しい解析手法、すなわちサスペンション要素法(SEM)を提案し、若干の解析例を示す。

2 解析手法の提案

2・1 サスペンション要素

フレッシュコンクリートの流動は、骨材間のマトリックス部の変形によるものである。本解析は、レオロジー流動する粘塑性流体中に点在するある大きさの球体(剛体)の運動をシミュレートするため、Fig. 1に示すように、ある程度接近した2つの骨材の間に円柱形の要素(サスペンション要素、以下、サス要素と呼び、本解析方法をSEMと呼ぶ)を設け、この要素の変形量から全骨材の移動量を計算するものである。すなわち、骨材を節点とし、この節点間にサス要素を立体トラス構造のように形成するものである。サス要

[†] 原稿受理 昭和63年11月7日 Received Nov. 7, 1988

* 正 会 員 三重大学工学部 津市上浜町, Faculty of Engineering, Mie University, Kamihama-cho, Tsu

** 三重大学工学部 津市上浜町, Faculty of Engineering, Mie University, Kamihama-cho, Tsu

*** 三重大学大学院 津市上浜町, Graduate Student, Mie University, Kamihama-cho, Tsu

Fig. 1. Suspension element.

Fig. 2. Coordinate system and deformation of suspension element.

素の変形としては、Fig. 2に示すように、軸方向およびせん断方向のひずみを考える。

サス要素は、骨材、すなわち節点の座標値から、隣接する2節点を結び、粘塑性有限要素法の計算に入る前に形成される。粘塑性解析では、時間で刻んで変形量を逐次計算するが、サス要素の形成は、この繰返し計算ごとに行われる。したがって、SEMでは、要素の個数や要素と節点の構成関係が固定したものではなく、流動に応じて変化する点が、通常の連続体の有限要素法と大きく異なる。

2・2 境界条件

Fig. 3に示すように、フレッシュコンクリートが、容器や型枠などの壁面に接している部分にも、サス要素が形成される。この場合は、1節点で要素が構成されるが、解析上、仮定の固定節点が壁面上に作られ、サス要素の変形によって、コンクリートと壁面のすべりを表現する。この壁面上のサス要素（すべりサス要素）の場合も、壁面と節点の座標値から両者の距離がある程度接近すると自動的に構成される。

2・3 構成則

サス要素に用いる構成則を、Table Iに示す。これは、降伏値および塑性粘度からなるビンガムモデルの構成則である。筆者らは、既に、骨材のインターロック（内部摩擦）を考慮できる構成則として、ビンガムモデルに内部摩擦を組み合わせた複

Fig. 3. Formation of suspension elements.

Table I. Constitutive law and yield function used.

Constitutive law and yield function	
$2\eta V_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F\sigma'_{ij} & (F \geq 0) \end{cases}$	
$F = 1 - \tau_y / \sqrt{J_2}$	
η : plastic viscosity	
V_{ij} : rate of deformation tensor	
σ'_{ij} : tensor of stress-deviation	
τ_y : yield stress	
J_2 : second invariant of stress-deviation	

合モデルを提案しているが⁷⁾、SEMでは、粗骨材のインターロックは、節点間のメカニズムとして考慮できるため、今回の解析には用いていないが、マトリックス自身に発生する内部摩擦を考慮する際には、複合モデルを導入する必要がある。

2・4 解析手順および本解析方法の特徴

SEM解析には、2つのタイプの計算手順が考えられる。1つは、筆者らが提案したVFEMの計算方法を用いるもの（静的サス要素法、SSEMと略記する）で、Fig. 4に示すようなフローチャートで計算を行う。SSEMでは、非定常問題に対して、基本的には静的な力の釣合から解を求め、VFEMと同様に慣性力も考慮する。

もう一つは、振動理論による多質点非定常解析によって計算する、Fig. 5に示すような手法（動的サス要素法、DSEMと略記する）である。速度変化の激しい問題に対して、DSEMは比較的高い精度が期待できるが、安定した解を得るためには、時間分割をかなり細かくする必要がある。

これらの解析は、いずれも、微小な時間刻みで前進するが、SEM解析では、サス要素を各ステップごとに組み立てる。外力および自重は、SSEMの場合には等価な節点力、DSEMの場合には加速度として与えられる。また、VFEMの場合には、コンクリートのレオロジー性質

Fig. 4. Flow-chart for static suspension element method (SSEM).

Fig. 5. Flow-chart for dynamic suspension element method (DSEM).

を入力データとして用いたのに対して, SEM では, マトリックス部のレオロジー性質を解析に用いる.

3 解析例

3・1 2次元小型モデル型枠内の流動シミュレーション

SEM 解析の妥当性を確認する目的で, 簡単なモデル実験を行った. 実験では, 直径 24 mm のガラス玉の骨材と, 水中コンクリートに用いられる分離低減剤の 5% 水溶液のマトリックスからなるモデル試料を用い, Fig. 6 に示すような透明アクリル製型枠内における試料の流動を, VTR によって撮影した. 試料は, まず, Fig. 7(a)に示すような骨材配列で, 型枠の左半分にてんされ, 中央の仕切り板を引き上げた後, 自重で変形する. 実験結果の一例を Fig. 7(b)および(c)に示す. また, 実験と同様の条件を入力データとして

Fig. 6. Two-dimensional model form.

与え, SEM 解析を行った結果を Fig. 8 に示す. Fig. 7 および Fig. 8 の比較から明らかなように, 個々の骨材の位置に若干の相違はあるが, 実験における試料全体の変形を解析結果はよく表現している. また骨材の

(a) 0.0 sec.

(b) 8.0 sec.

(c) 20.0 sec.

Fig. 7. Flow behavior in two-dimensional model form (Experiment).

個々の運動に注目すると, 初期に発生する右上部の 6 個の骨材の崩れ現象や, その後に起こる試料全体の沈み現象が, 実験結果と解析結果でほぼ一致している. 骨材の崩れによる流動は, VFEM ではシミュレートすることができず, SEM を用いることによって, より正確なシミュレーションが可能となる.

実験結果と解析結果の相違は, 骨材に使用したガラス玉の形・サイズのばらつきや, 仕切り板を引き上げる際の微細な振動などの実験上の不確定要素に加えて, 解析上の仮定に起因するものと思われるが, フレッシュコンクリートの変形性状の予測に関しては十分な精度が得られるものと考えられる.

3・2 振動を受ける 3次元小型モデル型枠内の流動

Fig. 8. Flow behavior in two-dimensional model form (Analysis).

シミュレーション

VFEMで3次元解析を行う場合には、境界面のすべり挙動を考慮するための工夫が必要であったが、SEMの場合は、特別な問題もなく比較的容易に3次元解析が可能である。Fig. 9は、SEMによる3次元小型モデル型枠内の流動シミュレーション結果の一例である。

3・3 2次元テーパ管内のシミュレーション

フレッシュコンクリートの管内流動に関しては、実験的な検討とともに、簡単なモデルによる解析的な研究が既に数多く報告されているが、テーパ部における圧力損失・閉塞の問題は、骨材の形状・寸法が大きな影響要因となるので、均質な力学モデルによる解析では、そのメカニズムを十分に把握することができない。SEMは、この点を補うことができる解析手法として、今後この方面での利用が期待できる。

本報では、パーソナルコンピュータのメモリ上の制約からテーパ管を2次元にモデル化し、数例の解析を行った。Fig. 10は、2次元テーパ管内を圧送されるフレッシュコンクリートの流動性状をSEMによって計算した結果の一例である。図の左側から圧送されてきたフレッシュコンクリートは、テーパ部で骨材同士が接近し、インターロックによる抵抗力が発生しやすい状態になる。閉塞機構の第一段階といえる骨材の接近は、テーパ管の形状・寸法および骨材の量・寸法と、マトリックスのレオロジー性質によって

Fig. 9. Flow behavior in three-dimensional model form (Analysis).

決まる⁹⁾。また、第二段階として、接近して集中した骨材同士に摩擦抵抗力が発生し、この場合には骨材形状等が影響要因となる。SEMによる解析では、この管内閉塞の第一段階の現象と、各種要因の関係を定量的に把握することができる。

3・4 傾斜流動実験とシミュレーション

打設時のフレッシュコンクリートにとって、鉄筋は狭いすき間をつくる障害物であるが、この付近における充てん性はRC構造物の耐力や耐久性の観点から重要である。フレッシュコンクリートの鉄筋を回避する流動性を論じるには、コンクリートのレオロジー性質のみでなく、骨材寸法の影響を考慮しなければならない。

本報では、フレッシュコンクリートの鉄筋回避流動の基礎的な情報を得るために簡単なモデル実験を行った。Fig. 11に装置の概要を示す。実験では、容器上部に充てんしたコンクリートが振動を受け、鉄筋のすき間から流動して下部容器に充てんされるまでの様子をVTRで撮影した。実験結果の一例をFig. 12に示す。また、Fig. 13は、同様の条件下におけるコンクリートの流動をSEMによってシミュレートした結果の一例である。この解析では、容器に骨材が一層に並んでいるが、容器の傾斜角と振動の方向が一致してい

Fig. 14. Simulation of mixing of concrete.

ート打設を想定した SEM によるシミュレーション結果の一例である。Fig. 15 は、上部から自重によって充てんされる場合、Fig. 16 は、下部からの圧入によって充てんされる場合であり、いずれも、振動による締固めを考慮している。解析は 2 次元で行っており、サイズのにも実際の施工条件とはかなり相違するが、今後、各種の入力データが充実すれば、不充てん箇所などの予測が可能となる。

4 ま と め

本報では、フレッシュコンクリートを二相材料とし

Fig. 15. Flow behavior of concrete under self-weight (Analysis).

Fig. 16. Flow behavior of concrete under pressure (Analysis).

て取り扱う新しい流動解析手法、すなわちサスペンション要素法を提案し、その原理と解析手順について述べた。また、簡単な実験によって解析手法の妥当性を調べるとともに、本解析手法によってはじめて解析可能となる数例の問題を紹介した。

本報では紙数の都合で、若干の解析例を紹介するにとどめたが、これらの解析結果と実験結果との詳細な比較・分析から得られる情報については、さらに検討した上で、別の機会に報告する予定である。

本研究に際して、増田一幸君（三重大学大学院生）と三輪正保君（三重大学学生）の協力を得た。また、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金・総合研究(A)（研究代表者・森田司郎京大教授）、日本スパンクリート協会研究助成金および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。

参 考 文 献

- 1) 村田二郎, 土木学会論文集, No. 378, 21 (1987).
- 2) 森 博嗣, 谷川恭雄, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 374, 1 (1987).
- 3) 小谷勝昭, 神田 亨, フジタ工業技術研究所報, No. 21, 103 (1985).
- 4) Y. Tanigawa and H. Mori, Proc. of the 29th Japan Congress on Materials Research, 129 (1986).
- 5) 森 博嗣, 谷川恭雄, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 377, 16 (1987).
- 6) 森 博嗣, 谷川恭雄, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 388, 18 (1988).
- 7) 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論文報告集, 9, 1, 115 (1987).
- 8) 村田二郎, 鈴木一雄, セメント技術年報, 38, 210 (1984).
- 9) A. Nanayakkara, D. Gunatilaka, K. Ozawa and K. Maekawa, コンクリート工学年次論文報告集, 10, 2, 819 (1988).