

論文

[1057] 動的粘塑性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

小高茂央*1・谷川恭雄*2・森 博嗣*3・黒川善幸*4

1. まえがき

RC構造物の施工分野では、多くの労力を必要とするコンクリートの現場打設など、生産システム全般に関する合理化・省力化の要求は高く、そのため、現場や工場においてコンクリートの施工性を合理的に予測する必要が生じている。この一手段として、各種条件下におけるフレッシュコンクリートの変形・流動性状、すなわちワーカビリティをレオロジーに基づいて予測するための各種流動解析技術が開発・提案されつつあり、将来的には「施工設計法」[1]確立のための基礎技術として期待されている。

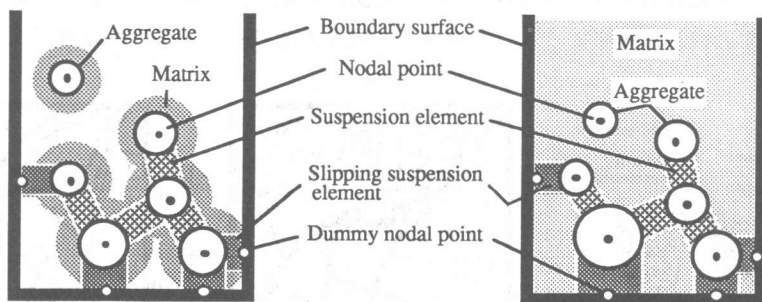
筆者らは既に、粘塑性流体を対象とした均質連続体の有限要素解析手法(VFEM)および非連続体のサスペンション要素法(VSEM)を提案し[2,3]、さらに、これらに運動方程式を組み込むことにより、動的解析へと発展させた[4]。本報では、既報[4]に引き続き、動的粘塑性サスペンション要素法における新たな解析モデルを提案し、その適用例として、フレッシュコンクリートのロート試験、スランピング試験[5]および振動による材料分離現象に関する解析結果を示す。

2. 解析モデル

ここでは、従来、粘塑性サスペンション要素法で用いてきた二相モデルを、完全付着モデルと完全充填モデルの二つに発展させ、分類・整理する。

2.1 完全付着モデル

このモデルでは、粗骨材、マトリックスモルタルおよび空隙の三相材料を考える。図一1に示すように、空気中においてモルタルで表面を覆われた粗骨材の運動を解析する。モルタルの量は



図一1 完全付着モデル

図一2 完全充填モデル

*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*3 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*4 名古屋大学助手 工学部建築学科、工修 (正会員)

粗骨材全表面に付着するのに十分であり、与えられた体積によって、各粗骨材に均等な比率の厚さで完全に付着するものと仮定する。解析では、モルタルと粗骨材の質量の合計が節点質量となり、見かけ上増加した質量より物体力ベクトルを算定する。この処理方法は、ロート試験におけるコンクリートの落下運動などの取扱いに適している。

2. 2 完全充填モデル

このモデルでは、粗骨材とマトリックスモルタルの二相材料のみを考え、空気相や空隙がない条件を仮定する。すなわち、図一2に示すように、対象とする領域内が粗骨材とマトリックスモルタルで完全に充填されている場合の挙動を解析の対象としている。この場合、粗骨材とマトリックスモルタルとの密度差が節点外力として粗骨材に加わる。この処理方法による解析は、粗骨材とマトリックスモルタル間の材料分離を対象とし、振動による粗骨材沈下や鉄筋間通過時の粗骨材閉塞のシミュレーションに適している。

なお、実際の打設過程は、上記の両モデルの条件が複合された状態にあるものと思われる。

3. ロート試験

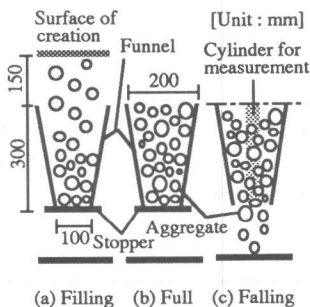
ここでは、粘塑性サスペンション要素法の完全付着モデルの適用例として、フレッシュコンクリートのロート試験のシミュレーションを取り上げ、実験結果との比較・検討を行った。

3. 1 解析結果とその考察

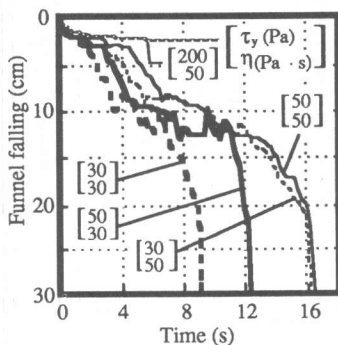
解析に用いたロートの形状・寸法を図一3に示す。ここでは、スランブコーンを逆さに設置したロートを想定している。また、解析は三次元問題として取り扱っている。

解析は、ロート内に試料を充填する過程と試料が流出する過程に分けられる。まず、粗骨材容積比および骨材径を入力し、粗骨材（節点）を所定の高さの平面よりランダムに発生・落下させた（図一3 (a)）。試料がコーン容積の分量だけ充填された後（図一3 (b)）、ストッパーをはずして自由に流下させた（図一3 (c)）。また、流下途中の性状は、図一3 (c)に示すようにロート中央の円柱領域内で最も高い位置に存在する粗骨材の高さをを用いて評価した。

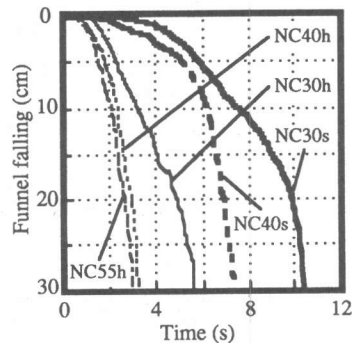
本解析より得られたロート流下曲線（ロート試験におけるコンクリート上面高さ－時間曲線）を図一4に示す。同図に示すように、レオロジー定数の相違によって、流下終了までの時間が異



図一3 解析の概要



図一4 ロート流下曲線の解析結果



図一6 ロート流下曲線の実験結果

なる。塑性粘度が小さい試料の流下時間は降伏値の影響が大きい、塑性粘度が大きくなると、ある程度以下の降伏値では降伏値の影響をほとんど受けない。

また、流下曲線は大きく三つの部分に分けられる。まず、流下直後の約1秒間は下に凸の曲線部がどの試料でもほぼ共通してみられる。その後、流下が定常状態となり、この領域の流下は、降伏値と塑性粘度の影響が支配的となる。最後に、流下速度はしだいに速くなり、この領域では塑性粘度が曲率に大きく影響を与えている。

なお、比較的大きい降伏値 ($\tau_y = 200\text{Pa}$) を入力値として用いた場合は、吐出口付近で閉塞が生じ、流下しなかった。

3.2 実験結果とその考察

解析結果を検証するため、ロート試験およびスランピング試験[5]を行った。実験では、図-5のような試験装置を用い、ロート流下曲線およびスランピング曲線ともに非接触型の変位計を用いて測定した。また、ロートは、解析の場合と同様に、スランプコーンを逆に設置したものをを用いた。

実験に用いたコンクリートの調合表とロート流下時間 T_e および実測スランプ値 Sl を表-1に示す。サスペンション要素法では、マトリックスモルタルのレオロジー定数が入力値となるので、単位粗骨材量を 987kg/m^3 の一定とした。また、ウェットスクリーニングモルタルについて1/2サイズのスランプコーンによるスランピング試験を行い、降伏値および塑性粘度を推定した結果[5]を表-1に併示した。なお、NC55sシリーズはモルタルの降伏値が小さく、粗骨材がやや分離気味であったため、吐出口においてアーチングを起こし、閉塞したものと考えられる。

実験により得られたロート流下曲線を図-6に示す。流下曲線の形状は、高性能AE減水剤の添加量の少ないhシリーズと添加量の多いsシリーズとでは大きく異なっており、hシリーズでは流下曲線は直線的であり、sシリーズでは曲率が大きい。前者は降伏値が大きく粘性が小さいタイプ、後者は粘性が大きく降伏値が小さいタイプである。今回の実験の範囲では、流下時間が同じでも流下曲線の曲率が異なる例は得られなかったが、2つのレオロジー定数の値の組合せによってはこのような現象が実際には起こり得るものと考えられる。なお、流下時間のみを測定してもコンシステンシーを把握することは理論的にも困難である。

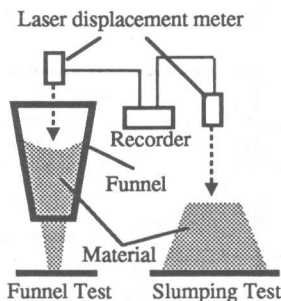


図-5 実験の概要

表-1 コンクリートの調合表および各測定値

Series	W/C	W	C	S	G	HAE	τ_{ym}^*	η_{m}^*	T_e	Sl.
NC55h	55	185	336	765	987	—	348	10	2.9	16.6
NC55s						0.5	195	10	∞	22.2
NC40h	40	175	438	720		0.5	327	10	3.3	18.2
NC40s						0.6	207	30	7.4	21.5
NC30h	30	165	550	680		1.1	661	10	5.6	14.7
NC30s						2.3	72	40	10.4	24.0

[Notes] W/C: Water - cement ratio (%), W: Water (kg/m^3), C: Cement (kg/m^3), S: Sand (kg/m^3), G: Gravel (kg/m^3), HAE: High - performance AE water reducing agent (%/C), τ_{ym}^* : Estimated yield value of mortar (Pa), η_{m}^* : Estimated plastic viscosity of mortar (Pa · s), T_e : Funnel falling time (s), Sl.: Slump value (cm)

3. 3 解析結果と実験結果の比較

解析と実験による流下曲線の形状はほぼ類似しているが、解析に用いた入力値と実験より得られた推定値は大きく異なっている。これは、両者の骨材サイズが異なることや、境界面(この場合はロート内壁面)におけるすべりが解析では正確に考慮されていないことに起因するものと考えられる。特にロート試験の場合、スランピング試験に比べて、境界面による流動拘束効果が大きくなる。前者はコンピュータのハード性能による制限であり、後者はすべり抵抗性状に関する実験データの不足によるものであるが、これらの点に関しては今後の課題といえる。

4. スランピング試験

4. 1 解析結果とその考察

既報[4]では、粘塑性有限要素法を用いてスランピング試験の解析を行ったが、ここでは、粘塑性サスペンション要素法の完全付着モデルの適用例として、スランピング試験の三次元解析を行った。

本解析により得られたスランピング試験のシミュレーション結果の一例を図-7に示す。メモリの関係で粗骨材径を30mmから40mmとしたが、粘塑性有限要素法では表現することができない、粗骨材が崩れながら流動する様子がシミュレートされている。また、図-8および図-9は、それぞれ解析結果より得られたスランピング曲線およびスランプフローイング曲線[5]を比較したものである。図から明らかなように、最終的なスランプ値およびスランプフロー値はともに降伏値に、また、曲線の形状は塑性粘度に支配されており、これは、既報[4]に示した粘塑性有限要素法による解析結果と同様の傾向を示している。

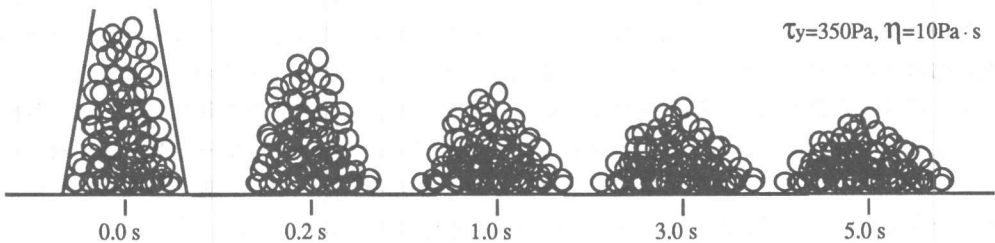


図-7 スランピング試験の解析結果の一例

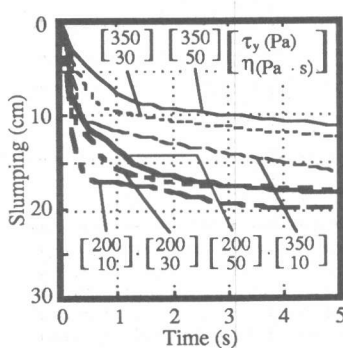


図-8 スランピング曲線の解析結果

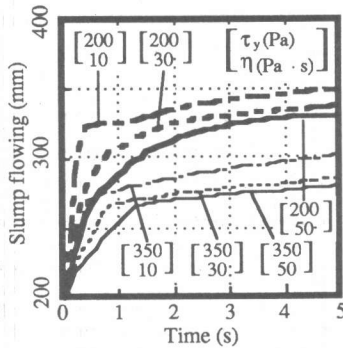


図-9 スランプフローイング曲線の解析結果

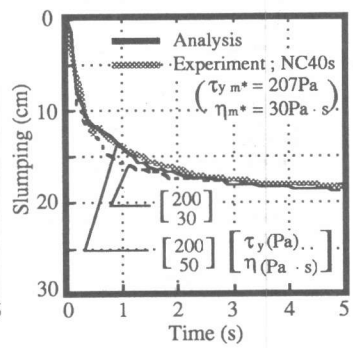


図-10 スランピング曲線の解析結果と実験結果の比較の一例

4. 2 解析結果と実験結果の比較

スランピング曲線の解析結果と、3. 2で求めた実験結果の比較の一例を図一10に示す。解析では、表一1に示したモルタルのレオロジー定数の推定値を入力値として用いた。同図にはすべての試料について表示していないが、解析結果は実験結果を十分な精度でシミュレートしているといえる。ロート試験と異なり、スランピング試験の解析の場合では、境界が底面しか存在しないので、境界面のすべりの影響が少なく、上記のような結果になったものと考えられる。また、本解析の場合、原点を通る割線粘性を用いているので、スランピング曲線は厳密には最終スランピング値に収束せず、この点に課題が残されている。

5. 振動締固め時の材料分離抵抗性

ここでは、サスペンション要素法の完全充填モデルの適用例として、振動下におけるフレッシュコンクリートの粗骨材分離問題を取り上げた。

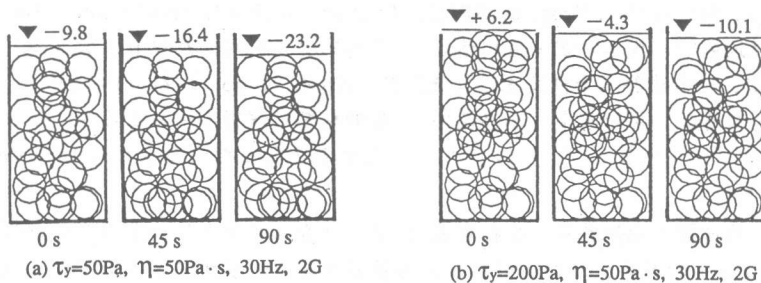
解析では、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱型枠に充填したフレッシュコンクリートに、振動力を加えた場合の粗骨材沈下挙動をシミュレートした。なお、前述のロート試験およびスランピング試験の解析同様、粗骨材をランダムに発生・落下させ試料を充填した後、加振している。解析は三次元問題として取り扱った。

本解析により得られた粗骨材沈下のシミュレーション結果の一例を図一11に示す。型枠内はモルタルにより完全に充填されているが、粗骨材が存在する高さを図中に併示した。また、図一12は、解析結果より得られた粗骨材沈下曲線を比較したものである。粗骨材沈下曲線もスランピング曲線と同様に割線粘性を用いているため、厳密には収束しない。

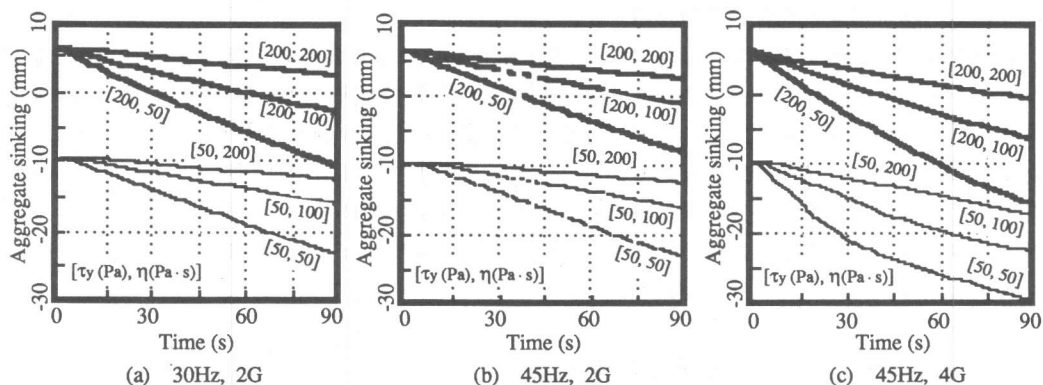
図一11および図一12から明らかなように、降伏値が小さい試料の場合、無振動の状態において既に粗骨材の自重により粗骨材が若干沈下しており、加振によって、さらに粗骨材が沈下していく様子がみられる。一方、降伏値が大きい試料では、初期の沈下がほとんどみられない。また、加振の種類にかかわらず、試料の粘性が大きくなるほど沈下速度は遅くなる傾向を示す。

図一12(a)および図一12(b)より、振動力を変化させずに周波数のみを変化させた場合を比較することができる。これによると、降伏値が小さい試料の場合、その差はほとんど見られないが、降伏値が大きい試料の場合、周波数が小さい加振時において、わずかに沈下量が大きくなっており、試料のレオロジー定数によっては加振時の周波数の影響をうけることがわかる。

図一12(b)および図一12(c)より、振動力の影響を把握することができる。振動力が大きくなると、いずれの試料においても最終沈下量が増加する傾向を示す。また、45秒前後までの沈下速度が速くなるが、それ以後の沈下速度は振動力の大きさの影響は小さく、振動力の影響は沈下の初期において顕著に現れることが確認された。



図一11 粗骨材沈下挙動の解析結果の一例



図一12 粗骨材沈下曲線

6. まとめ

本研究では、動的粘塑性サスペンション要素法のための二つの解析モデルを示し、ロート試験、スランピング試験および振動下の粗骨材沈下挙動のシミュレーションを行った。本研究によって得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 完全付着モデルを用いることにより、フレッシュコンクリートのロート試験およびスランピング試験の精度の高い解析が可能となった。実験との比較・検討から解析の追従性の確認を行ったが、骨材サイズや境界面とのすべりの正確な考慮が不可欠であることが明らかとなった。
- 2) 完全充填モデルを用いた振動下の粗骨材沈下挙動のシミュレーション結果によれば、沈下曲線は、マトリックスモルタルのレオロジー定数の影響を受けることが明らかとなった。また、レオロジー定数によっては、加振時の振動力の大きさだけでなく、周波数の影響も受けることが確認され、これらを解析的に予想することが可能であることが明らかとなった。

なお、本研究では国際単位系 (SI) を用いた ($1 \text{ Pa} = 0.0102 \text{ gf/cm}^2$, $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ poises}$)。

【謝辞】本研究に際して、小村理恵氏 (名古屋大学大学院生) および森堅太郎氏 (名古屋大学学生) の助力を得た。また、本研究費の一部は、平成4年度文部省科学研究費・奨励研究 (A)、同一般研究 (B) および東海学術奨励会助成金によった。付記して謝意を表する。

【引用文献】

- 1) 谷川恭雄・森博嗣 : コンクリートの「施工設計法」の確立をめざして(続)、セメント・コンクリート、No.551、pp.2-11、1993.1.
- 2) 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, Mar.1989.
- 3) 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.
- 4) 谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・小高茂央 : 動的粘塑性解析手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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.409-414、1992.6.
- 5) 谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・小村理恵 : フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察、コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集、JCI、pp.43-48、1992.5.