

論文

[1043] 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解析

正会員 谷川恭雄 (三重大学工学部)
 同 森 博嗣 (名古屋大学工学部)
 同 ○渡辺健治 (三重大学大学院)
 野田 豊 (三重大学工学部)

1. まえがき

フレッシュコンクリートの流動性を解析的に予測する技術は、「施工設計法」[1]を確立するための基礎となるものであるが、一方では、コンクリート工事の合理化・省力化、さらには自動化を目的とした新材料と新工法の開発・研究にも貢献する重要な課題のひとつである。

近年、フレッシュコンクリートの各種特性を、レオロジーの立場から整理し、解析の入力データとなりうる定量的な表現を試みた研究が数多く報告されており、比較的軟らかいフレッシュペーストおよびフレッシュモルタルの性質を、ビンガムモデルによって表現することが一般的になりつつある[2]。しかしながら、粗骨材を含んだフレッシュコンクリートの構成則に関しては、かなり軟らかい調合のものであっても、その挙動を均質な材料として単純なモデルで表現することは難しく、コンクリートをビンガムモデルと仮定して求めたレオロジー定数の測定値には、研究者や試験方法によって大きな差異が見られるのが現状である[3]。

一方では、フレッシュコンクリートを固体相と流体相から成る複相材料とみなして解析を行った研究[4]が報告されており、また、比較的軟らかいコンクリートでも、骨材のインターロックを考慮した、すなわちビンガムモデルの降伏条件を修正した構成則を用いることの必要性が実験および解析によって示されている[5]。つまり、コンクリートの流動性状を正確にシミュレートするためには、ビンガムモデルよりもさらに複雑な構成則を用いてコンクリートの流動性状を実験的に定量化するか、あるいは、モルタルのレオロジー性質を入力値として、骨材の影響を考慮した解析手法を用いるか、のいずれかのアプローチが必要である。

筆者らは、既にフレッシュコンクリートの汎用的な流動シミュレーション手法として、粘塑性有限要素法 (Viscoplastic finite element method、VFEM) を提案し、その妥当性および適用範囲を示してきたが[6]、上記の理由から、骨材相とマトリックス相から成る二相モデルを用いたサスペンション要素法 (Viscoplastic suspension element method、VSEM) [7] を新たに開発した。既報[8]では、フレッシュコンクリートのテーパー管内での流動挙動のシミュレー

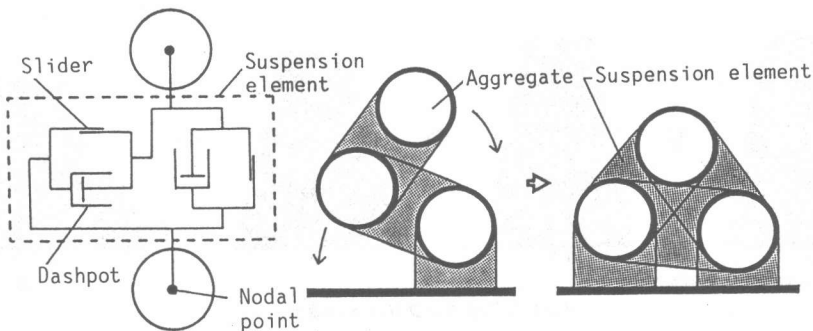


図-1 VSEMの解析モデルの概念図

ションをパーソナルコンピュータを用いて行い、その流動性状の解明に解析的なアプローチが可能であることを示した。引き続き本報では、大型計算機を用いてVSEM解析を行い、各種条件下におけるフレッシュコンクリートの流動性状に関する解析例を示し、本解析手法の適用性について述べる。

2. 解析手法の概要

図-1に本解析手法の概念を示す。フレッシュコンクリートの流動は、粗骨材間のモルタルマトリックス部の変形によるものであるが、粗骨材の接触による抵抗性もコンクリートとしての見かけのレオロジー性質に影響を与える。本解析では、粘塑性流体で覆われたある一定の大きさの粗骨材(球体)を考え、ある程度接近した2つの粗骨材間の力の伝達が、これらの粗骨材間に形成された粘塑性性質をもつ円柱形の要素(サスペンション要素)によって行われると仮定して計算する。コンクリートの変形が進むにしたがって、粗骨材の位置関係は変化し、サスペンション要素は発生あるいは消滅するので、連続体モデルでは、表現できない複雑な変形をシミュレートすることができる。サスペンション要素が発生するために必要な粗骨材間の距離(d_1)は、コンクリートの調合の関数となるはずであり、また、本来は凹凸を持つ粗骨材同士の接触が発生する距離(d_2)は、粗骨材の形状・寸法の関数となるものと考えられるが、これらを一義的に決定するにはまだデータが不足しており、現在、仮

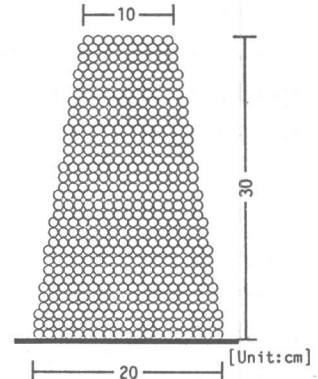


図-2 骨材配置

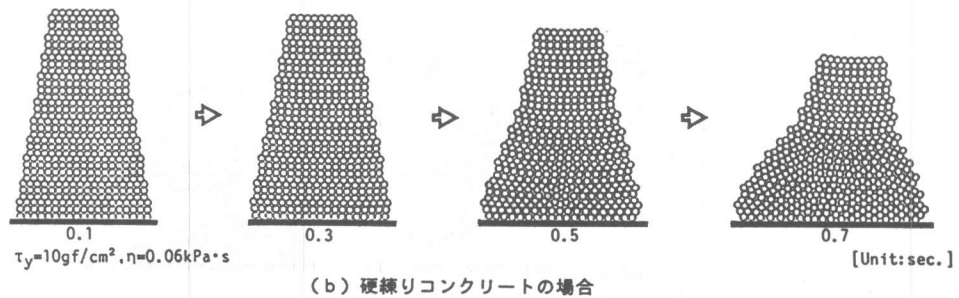
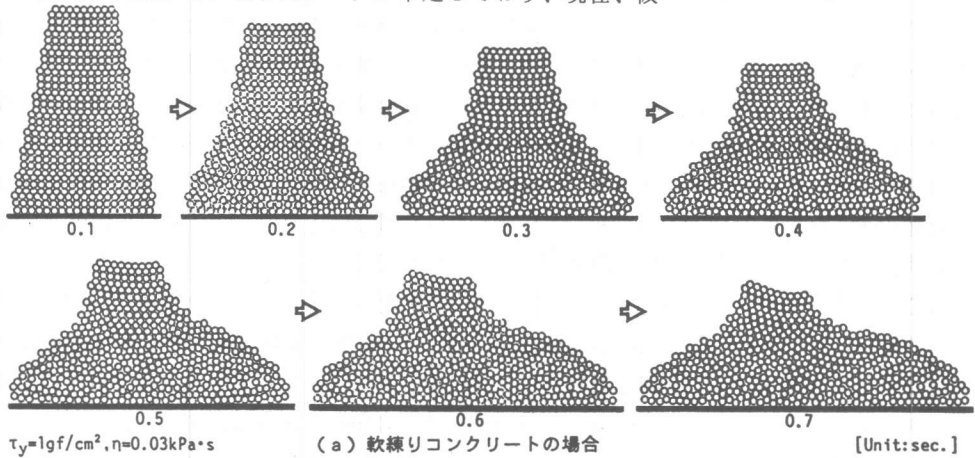


図-3 2次元スランプ試験の解析結果の一例

の値（粗骨材中心間距離で、 $d_1 = 4r$ 、 $d_2 = 2r$ 。但し、 r ：粗骨材半径）を用いている。マトリックス部の構成則としては、ビンガムモデルを用いており、モルタルのレオロジー性質を入力値としている。なお、本報で紹介する解析例では、いずれも1/1000秒以下の微小時間刻みで計算を繰り返し、この範囲であれば、時間刻みによる解析結果への影響が少ないことを確認している。本解析手法の詳細および簡単なモデル実験による妥当性の確認については、既報[7]を参照されたい。

3. 解析結果とその考察

3.1 2次元スランプ試験のシミュレーション

骨材の配置方法や計算容量の関係から、スランプ試験を2次元問題としてシミュレートした。コーンを引き上げる際のコンクリートとコーンとの接触は考慮していない。図-2および図-3に、それぞれ初期骨材配置およびシミュレーション結果の一例を示す。

2次元解析ではあるが、コンクリートの上面が変形後凹んで残る様子や、底面の摩擦を受けながらフローする変形挙動など、全体の形状は、粘塑性有限要素法による軸対称解析の結果[6]や実験で観察される性状と非常に類似している。解析では、骨材が垂直に積み重なるのを防ぐため、初期節点座標を数値的にわずかにずらしており、そのため左右非対称に崩れている。

図-3中に示したレオロジー定数は、コンクリート中のモルタル部のレオロジー性質を表しているが、図-3(a)より(b)の方がレオロジー定数が大きくなっており、

同一粗骨材量の軟練りから硬練りのコンクリートの変化に対応している。

3.2 L型フロー試験のシミュレーション

高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー試験として開発されたL型フロー試験(図-4参照)[9]のシミュレーションを行った。図-5にシミュレーション結果を示す。同図に示されるように、軟練りコン

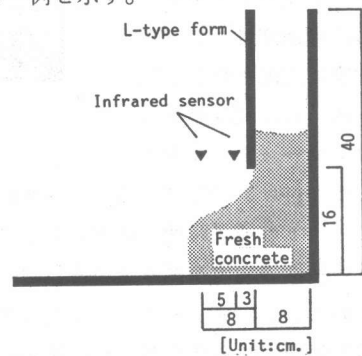


図-4 L型フロー試験装置

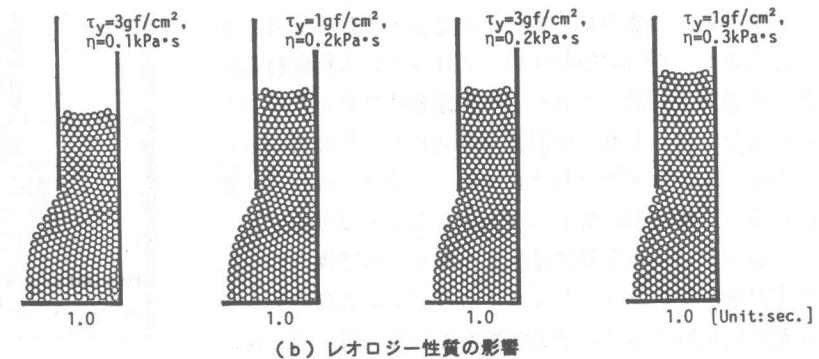
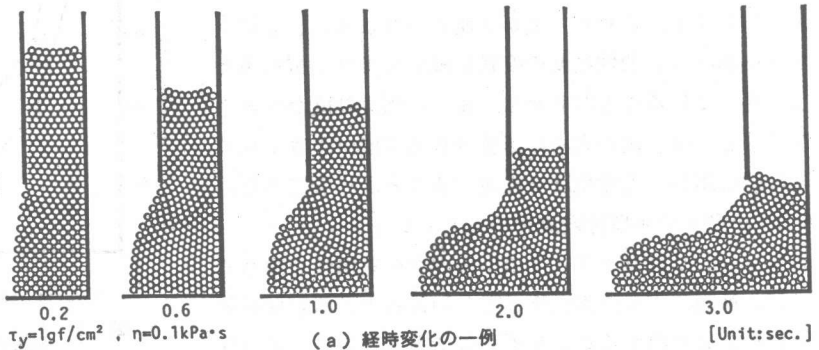


図-5 L型フロー試験の解析結果の一例

クリートほど、試験装置下部に設けられた開口部からの流出速度が速い。

この試験では、容器内のコンクリートの降下量（L型スランプ値）および開口部からのコンクリートの流出距離（L型フロー値）を測定する。同一スランプ値のフレッシュコンクリートであれば、その変形速度は、ほぼ塑性粘度に支配される。筆者らは、この試験装置に

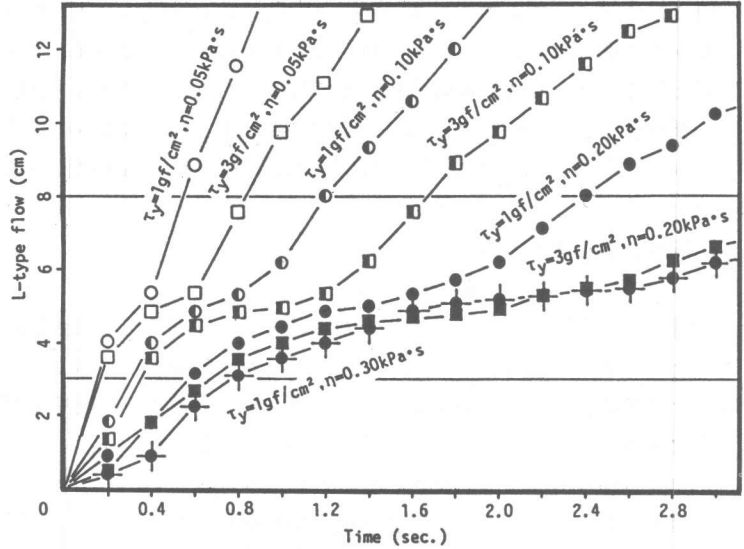


図-6 L型フローの経時変化

を取り付け、開口部から3 cm～8 cmの区間におけるコンクリートの通過時間を計測して、フレッシュコンクリートの粘性の検出を試みている[10]。実験結果と比較するために、シミュレーションによって得られたL型フロー値の初期経時変化を図-6に示す。また、変形速度（L型フロー初速度）とモルタルの塑性粘度(η)の関係を図-7に示す。これらの図から明らかなように、L型フロー初速度は、塑性粘度の変化に敏感であり、試験値として適していることがわかる。また、塑性粘度が大きくなるほど、降伏値の大小に影響される程度が小さくなり、この値を用いて塑性粘度を推定することが可能である。

3.3 小型モデル型枠内流動のシミュレーション

フレッシュコンクリートの型枠内での充填性を論じるには、鉄筋による流動抵抗性と、加振による流動促進効果の両方を考慮することが不可欠である。特に、狭い鉄筋間を通過する能力は、粗骨材の寸法・形状・量に大きく左右され、同時に振動下のマトリックスと粗骨材の結合力も重要な要因となるが、単相連続体モデルを用いた解析手法では、これらの影響を評価することが難しい。しかし、二相モデルを用いたVSEMでは、これらの性状をすべて直接的に解析に導入することができる。

筆者らは、振動を受ける配筋小型モデル型枠内での流動実験を行い、フレッシュコンクリートの上記のような流動特性に関するデータを収集している[11]。図-8に示すような形状・寸法の配筋小型モデル型枠試験をV S

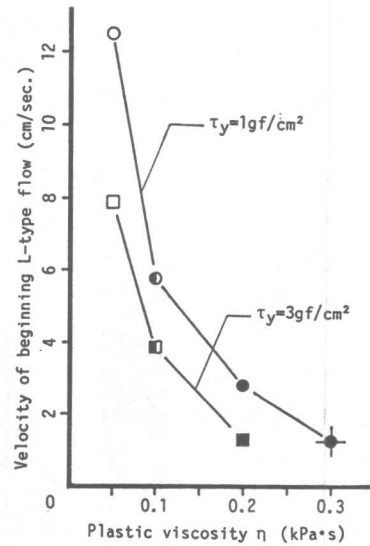


図-7 L型フロー初速度と塑性粘度の関係

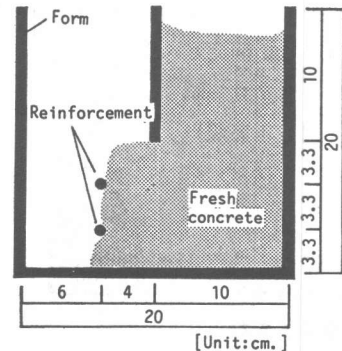


図-8 配筋小型モデル型枠

EMによってシミュレートした結果を図-9示す。また、図-9には、実験で得られたコンクリート上面の降下量（スランピング）を▲印で示してある。この解析では、実験で得られたレオロジー定数、周波数・加速度の振動力を入力値として用いている。

図には示していないが、無振動の場合は、ほぼ鉄筋位置で流動が停止してしまう。これと比較すると、振動によって流動が促進される様子が図-9から観察される。また、開口部から流出するときの形状は実験で観察されるものとよく一致している。解析結果から、右下部分のコンクリートがほとんど動かず、上部のコンクリートが覆いかぶさるように左側へ流出していく様子が観察される。鉄筋が存在する図-9(b)の場合、粗骨材が鉄筋を回避しながら左側へ移動し、無筋の場合に比べて、流動は抑制されている。

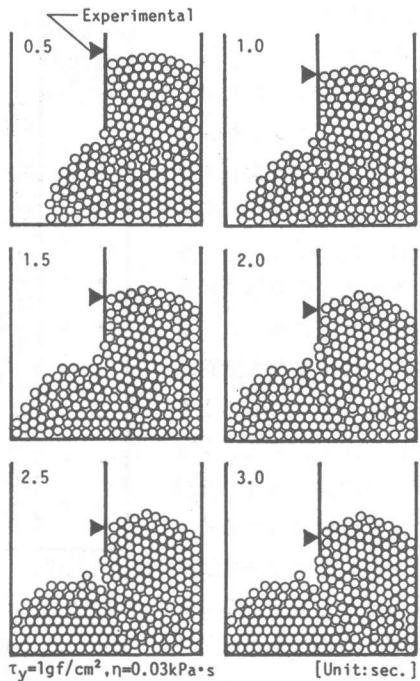
今回は、2次元問題として解析したため、実験結果と直接比較することはできないが、VSEMは、実験結果を比較的よくシミュレートしているといえる。

3.4 壁断面への打設シミュレーション

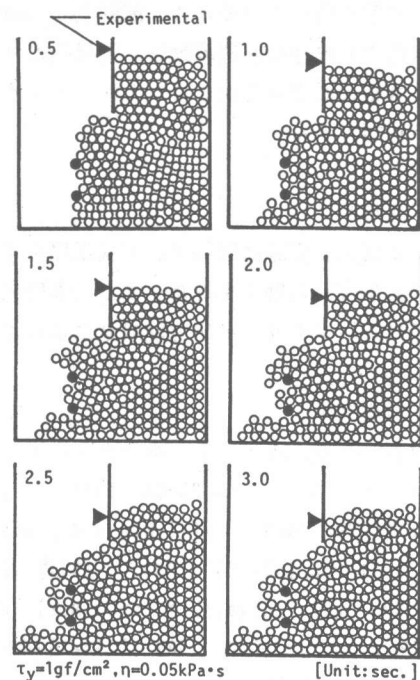
図-10に型枠・配筋の位置を、図-11にシミュレーション結果の一例を示す。鉄筋は10cmピッチで90cmの高さまで並列に配置されている。100cmより上部には、フレッシュコンクリートが十分存在すると仮定し、バケットによる打設などを想定している。100cm以上の位置に存在する粗骨材に対して、その上部のコンクリートの自重に相当する節点力を与えて計算を行った。

図-11によれば、コンクリートは、一番上部の鉄筋によって流動を抑制され、まず、開口断面積の比較的大きい中央部（鉄筋間）から下部へ落下する。その後、型枠近傍のコンクリートが落下する様子が観察される。

また、下部では、中央部に堆積したコンクリートが鉄筋のかぶり部に流出することは少なく、この部分にコンクリートがまわりにくいことがわかる。本解析では、骨材径を一定としているが、今後、粒度分布なども考慮した解析を行うことによって、粒径の小さい骨材によるベアリング効果や、鉄筋のかぶり部や下部へのコンクリートの充填状況など、さらに詳細な流動挙動を予測できるものと思われる。



(a) 無筋の場合



(b) 配筋を有する場合

図-9 小型モデル型枠内流動の解析結果の一例

4. まとめ

本報では、サスペンション要素法 (VSEM) を用いて、フレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行い、若干の解析例を示した。本解析手法は、要素構成の自由度が高いため、コンクリートの複雑な大変形をシミュレートすることが可能である。また、レオロジー試験によって比較的容易に求められるモルタルのレオロジー性質を入力値として用いることができることも本解析手法の特長の一つである。

さらに、フレッシュコンクリートを二相材料として取り扱っているため、流動空間に障害物が存在する場合の回避流動を、骨材相とマトリックス相の影響を考慮してシミュレートすることが可能である。

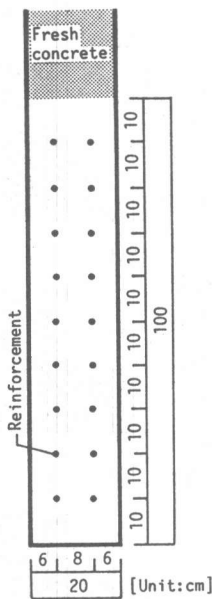


図-10 壁断面の寸法と配筋

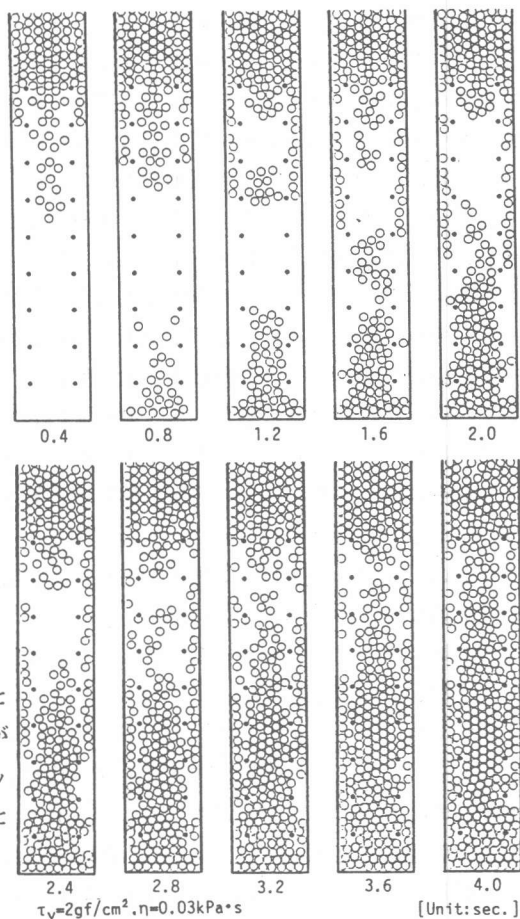


図-11 壁断面への打設シミュレーション結果の一例

[謝辞]

本研究の実施に際して、三輪正保君 (三重大学大学院) の助力を得た。また、本研究費の一部はスパンクリート研究助成金によった。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- [1] 谷川・森, セメント・コンクリート, No. 501, pp.11-20, 1988. [2] 村田, コンクリート工学, Vol.15, No.1, pp.25-34, 1977. [3] 村田・越川・大作, コンクリート工学, Vol.26, No.8, pp.20-29, 1988. [4] Ozawa, K., Nanayakkara, A. and Maekawa, K., Proc. of JSCE, No. 408, Vol.11, pp.187-193, 1989. [5] 森・谷川, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 396, pp.9-16, 1989. [6] Tanigawa, Y. and Mori, H., Jour. of Eng. Mech., Proc. of ASCE, Vol.115, No.3, pp.493-508, 1989. [7] 谷川・森・梅本・渡辺, 材料, Vol.38, No.431, pp.900-905, 1989. [8] 谷川・森・渡辺・三輪, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.727-732, 1989. [9] 谷川・森・米沢・和泉・三井・奥野, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.255-256, 1989. [10] 谷川・森・渡辺・三輪, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, 1990. [11] 谷川・森・増田・渡辺, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.241-242, 1989.