

論文 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 間隙通過挙動および材料分離挙動に関する解析的研究

森博嗣^{*1}・谷川恭雄^{*2}・黒川善幸^{*3}・名口芳和^{*4}

要旨：本研究では、フレッシュコンクリートの間隙通過挙動および材料分離挙動に関して検討を行うため、粘塑性サスペンション要素法に改良を加え、配筋型Lフロー試験および流出分離試験のシミュレーションを行った。その結果、鉄筋の周囲や境界壁面近傍において粗骨材の回転運動を伴って流動する様子や、レオロジー定数の違いにより回転の状況に違いがあることがわかった。また、従来の解析手法では表現できなかった最終流出量の違いを表現することができた。

キーワード：粘塑性サスペンション要素法, フレッシュコンクリート, 間隙通過, 材料分離

1. まえがき

フレッシュコンクリートに求められる性能は、より高度で多様なものとなっており、その中でも、高い流動性と十分な材料分離抵抗性という一見相反する性能の両立が要求されることが多い。高性能AE減水剤の開発によって、従来では考えられなかった性能を持つ高流動コンクリートが実用化されたが、複雑化した材料性質および施工条件の下では、コンクリートの打設結果を経験のみによって予測することが困難となっている。したがって、フレッシュコンクリートの流動状況を的確に予測するとともに多様な品質を管理できる技術を確立する必要がある。

上記の目的から、既に多くの評価試験方法が提案されてきた。Lフロー試験¹⁾や流出分離試験²⁾などはその一例である。Lフロー試験は生コンクリートプラントや施工現場で、フレッシュコンクリートの流動性を簡便に把握するための試験方法であり、流出分離試験は筆者らが提案した材料分離抵抗性の評価試験の1つである。

本研究では、フレッシュコンクリートを粗骨材とマトリックスからなる2相材料として捉え、粘塑性サスペンション要素法(VSEM)³⁾を一部改良して解析的な検討を行った。改良点は、節点の回転運動の考慮と仮想粗骨材径の導入の2点であり、それぞれ配筋Lフロー試験および材料分離試験のシミュレーションを行った。前者は間隙通過挙動を、後者は材料分離挙動に対して検討したものである。

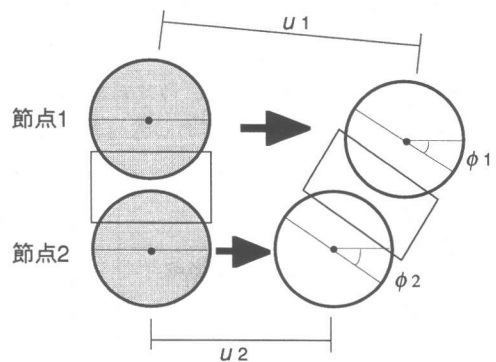


図-1 骨材節点の変位 u と角変位 ϕ

*1 名古屋大学助教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博（正会員）

*2 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 工博（正会員）

*3 名古屋大学助手 環境学研究科都市環境学専攻 工修（正会員）

*4 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻

2. 節点の回転運動を考慮したLフロー試験のシミュレーション

2.1 節点の回転運動

従来のVSEMにおいては、節点の回転運動は考慮されていなかったが、高流動タイプのコンクリートでは、粗骨材の回転運動が比較的多く発生しているものと考えられる。そこで、各節点の回転を考慮して、式(1)の変位 u に関する運動方程式に、式(2)の角変位 ϕ に関する運動方程式を付加し、解析プログラムの変更を行った。図-1に節点の変位と角変位を示す。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} - f = 0 \quad (1)$$

$$I\ddot{\phi} + C\dot{\phi} = 0 \quad (2)$$

ここに、 M : 質量、 C : 粘塑性による減衰、

I : 慣性モーメント、 u : 変位、

ϕ : 角変位、 f : 節点力

2.2 解析の概要

図-2は、Lフロー試験の解析モデルを示したものである。無配筋のもの(a)を基準に、直径13mmの鉄筋を1本配したもの(b)および3本配したもの(c)についても解析を行った。粗骨材節点の直径は17mm、モルタル節点の直径は予備解析により8mmとした。粗骨材体積比は0.36とし、降伏値(Pa)および塑性粘度(Pa·s)はともに5, 10, 20および50の4水準とした。また、すべり性状を考慮するため、境界壁面との間に形成されるサスペンション要素のビンガム定数には、通常要素の0.1倍の値を用いた。さらに、節点の回転運動を考慮

しない場合の計算も行い、これらの解析結果についても比較・検討した。

2.3 解析結果およびその考察

図-3は、回転を考慮した場合のLフロー試験の解析結果の一例である。同図では、回転速度の大きな節点ほど濃い色で表現している。図より、降伏値および塑性粘度の小さい試料(a)においては、鉄筋の周囲や境界壁面近傍などの広い範囲で節点が回転しているが、降伏値および塑性粘度の大きい試料(b)では、鉄筋の周囲でわずかに回転しているだけであることが判る。

Lフロー値と配筋数の関係を図-4に示す。降伏値および塑性粘度が増加するほど、また、配筋数が増加するほど、Lフロー値は減少する。ただし、配筋数 $N=1$ の場合で、降伏値および塑性粘度が5Paおよび5Pa·sのものは、全試料が鉄筋位置よりも低くなるまで流動したため、無配筋のものとの差は小さい。いずれの結果も、回転を考慮した解析の方が、Lフロー値が大きくなるが、これは、底面部における節点の回転の影響と考えられる。また、降伏値および塑性粘度の小さい試料においては、配筋数が増加するに従って、回転を考慮した場合と考慮しない場合のLフロー値の差が増加する。全体的な傾向としては、降伏値および塑性粘度が大きい場合ほど、回転の考慮による差は減少する。したがって、通常のコンシステンシーのコンクリートでは、回転を考慮する効果は小さいといえる。

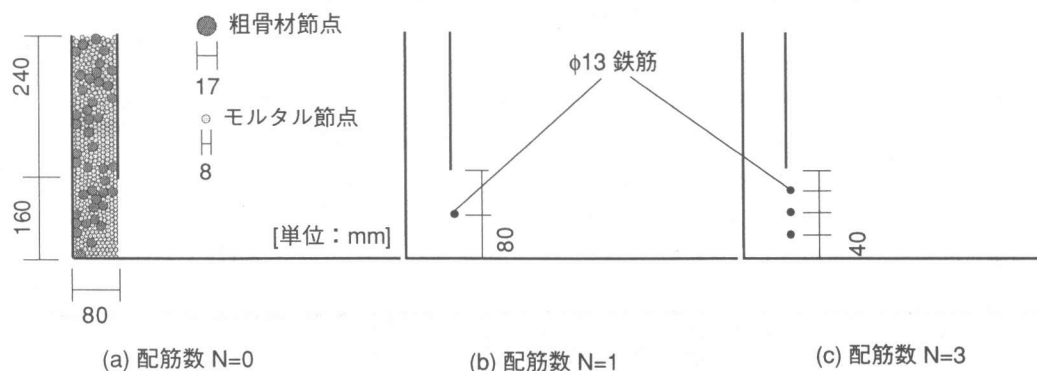
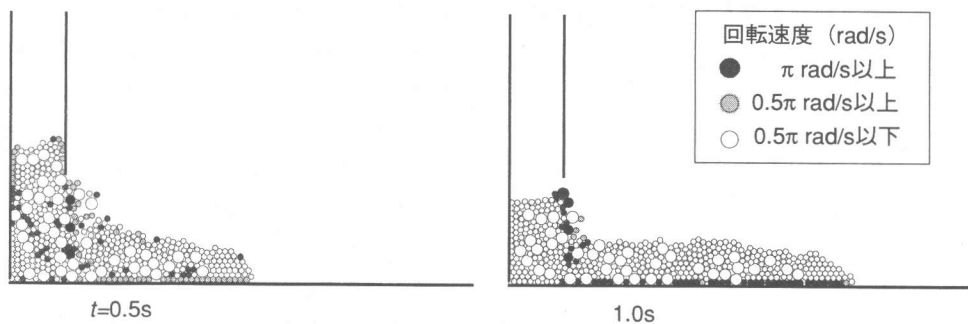
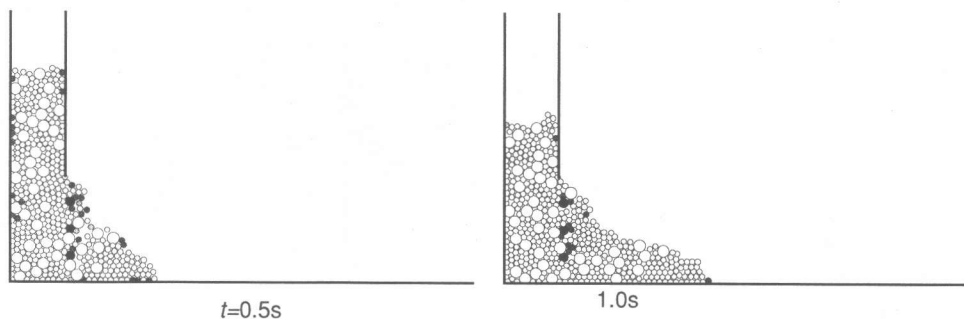


図-2 Lフロー試験の解析モデル

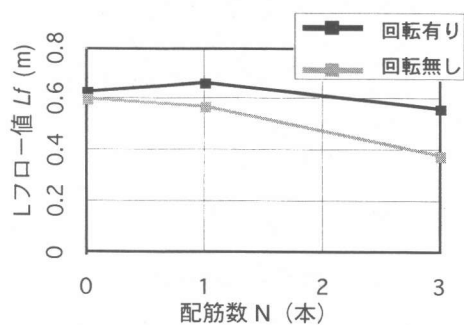


(a) 配筋数 $N=3$ 降伏値 $\tau_y=5Pa$ 、塑性粘度 $\eta=5Pa\cdot s$

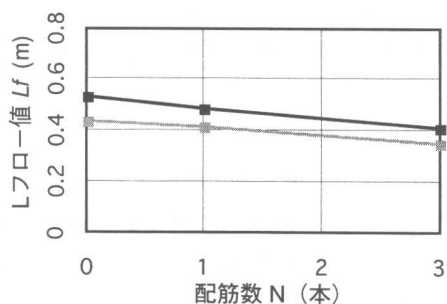


(b) 配筋数 $N=3$ 降伏値 $\tau_y=20Pa$ 、塑性粘度 $\eta=20Pa\cdot s$

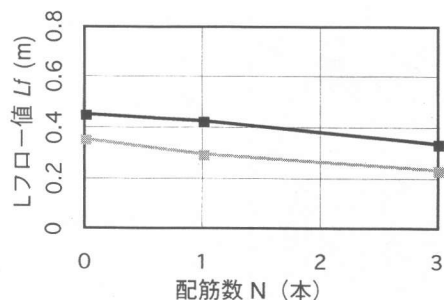
図-3 Lフロー試験の解析結果の一例



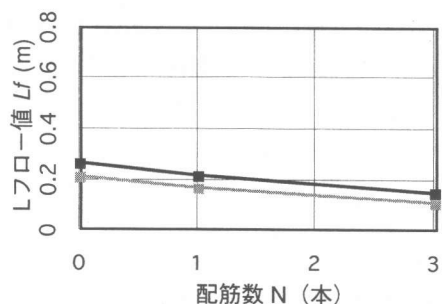
(a) 降伏値 $\tau_y=5Pa$ 、塑性粘度 $\eta=5Pa\cdot s$



(b) 降伏値 $\tau_y=10Pa$ 、塑性粘度 $\eta=10Pa\cdot s$



(c) 降伏値 $\tau_y=20Pa$ 、塑性粘度 $\eta=20Pa\cdot s$



(d) 降伏値 $\tau_y=50Pa$ 、塑性粘度 $\eta=50Pa\cdot s$

図-4 Lフロー値 L_f と配筋数 N の関係

3. 仮想粗骨材径を導入した流出分離試験のシミュレーション

3.1 仮想粗骨材径

実際の粗骨材とマトリックスの運動は3次元の現象であるが、3次元解析は莫大な計算量を必要とするため、未だ現実的ではない。そこで2次元解析によって現象のメカニズムを近似的に解明する手法を検討した。

図-5に示すように、3次元解析では粗骨材節点が密に充填している間隙をマトリックス節点が通過できるのに対して、2次元では、接触した粗骨材がマトリックスの間隙通過を完全にブロックしてしまう。

そこで、粗骨材節点が接触していてもその間にマトリックス節点を通過させるため、同図(c)に示すように、通常の粗骨材半径 r_1 とは別に、粗骨材節点とマトリックス節点の接触を判定する仮想の粗骨材半径 r_2 を設定した。粗骨材節点どうしは粗骨材半径 r_1 によって接触するが、マトリックス節点は、粗骨材半径内にも進入して、仮想粗骨材半径 r_2 までは接近することができる。ここでは、粗骨材半径に対する仮想粗骨材半径の比 r_2/r_1 を仮想粗骨材半径比と呼び、この値が1のときは、従来の解析手法⁴⁾と同じ条件を意味する。

3.2 解析の概要

図-6に、流出分離試験の解析モデルを示す。この解析では、粗骨材節点の直径を17mm、マトリックス節点の直径を6mm、粗骨材体積比を0.40、ふるい目の間隔を15mmと設定した。仮想粗骨材半径比は、1および0.5の2種類、降伏値(Pa)および塑性粘度(Pa·s)はともに、5, 10および20の3水準に変化させた。今回の解析では、粗骨材節点のブロック効果を観察することが目的であり、ふるいは粗骨材節点のみをブロックして、マトリックス節点は抵抗なく通過させる設定とした。

3.3 解析結果およびその考察

解析結果の一例を図-7に示す。いずれの結果

も、粗骨材節点がふるいによって止められ、マトリックス節点のみが分離流出する様子が表現されている。仮想粗骨材径を導入しない半径比が1の場合、流出の最終状態では、ふるい上に粗骨材節点が並び、マトリックス節点が粗骨材節点間を通過できない状況になる。一方、仮想粗骨材径を導入した半径比が0.5の場合では、ふるいの上に粗骨材節点が並んだ状態になっても、粗骨材半径 r_1 と仮想粗骨材半径 r_2 の差によって生じる間隙を、マトリックス節点が流下する。

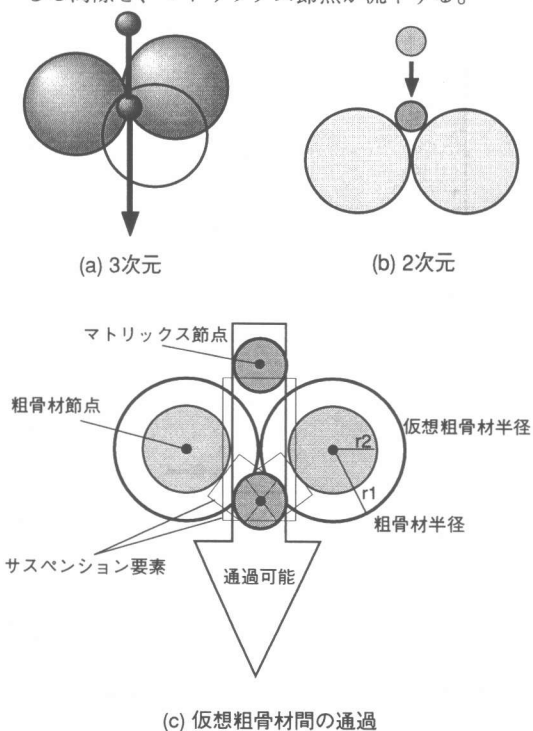


図-5 仮想粗骨材径の概念

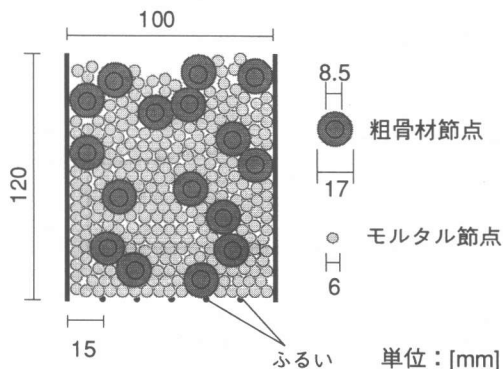
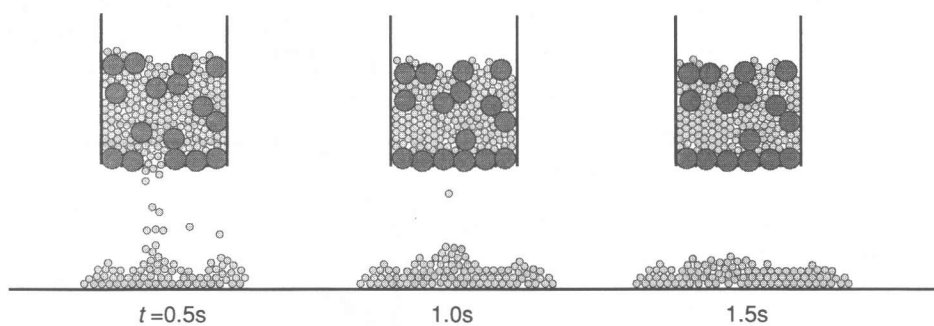
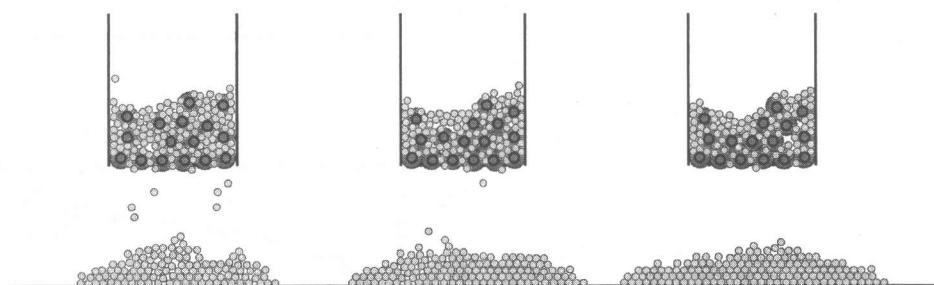


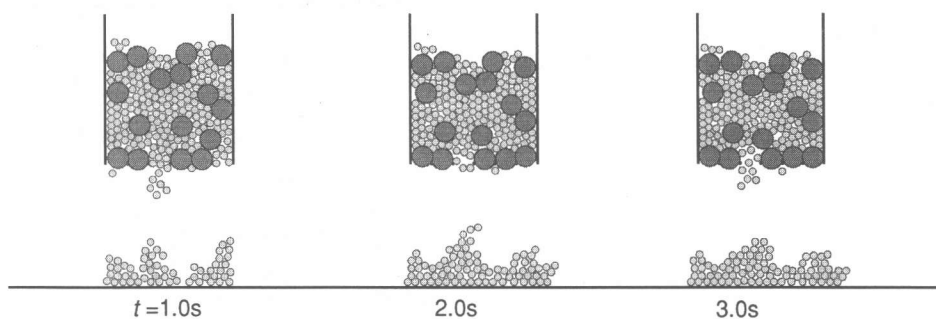
図-6 流出分離試験の解析モデル



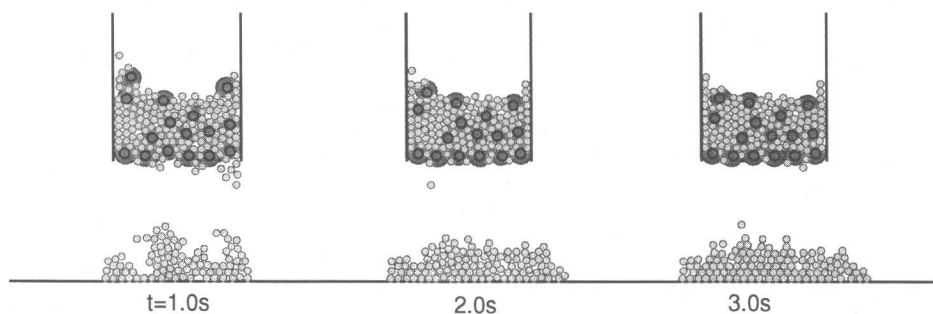
(a) 降伏値 $\tau_y=5Pa$ 、塑性粘度 $\eta=5Pa\cdot s$ 、仮想粗骨材半径比 $r_2/r_1=1$



(b) 降伏値 $\tau_y=5Pa$ 、塑性粘度 $\eta=5Pa\cdot s$ 、仮想粗骨材半径比 $r_2/r_1=0.5$



(c) 降伏値 $\tau_y=20Pa$ 、塑性粘度 $\eta=20Pa\cdot s$ 、仮想粗骨材半径比 $r_2/r_1=1$



(d) 降伏値 $\tau_y=20Pa$ 、塑性粘度 $\eta=20Pa\cdot s$ 、仮想粗骨材半径比 $r_2/r_1=0.5$

図-7 流出分離試験のシミュレーション結果の一例

図-8は、マトリックス節点の流出量の時刻変化を示したものである。仮想粗骨材半径比が1の場合は、初期の流出速度に違いが見られるものの、最終流出量は、初期節点配置に支配され、降伏値および塑性粘度の違いにかかわらず、一定値に収束する結果となる。一方、仮想粗骨材半径比が0.5の場合では、最終流出量にも違いが生じており、実現象により近い挙動が再現されている。

4. まとめ

本研究では、粘塑性サスペンション要素法に変更を加え、フレッシュコンクリートの間隙通過挙動および材料分離挙動に関するシミュレーションを行った。これにより、実現象により近い状況を、2次元解析によって近似的に計算することが可能となった。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 骨材の回転を考慮した粘塑性サスペンション要素法を用いることにより、フレッシュコンクリートが、鉄筋の周囲や境界壁面近傍において、骨材の回転を伴って流動する現象を表現できる。
- 2) 降伏値および塑性粘度が増加するにしたがって、骨材の回転は減少し、回転を考慮することの効果は小さくなる。
- 3) 仮想粗骨材径を導入した粘塑性サスペンション要素法を用いることにより、近接した粗骨材節点間をマトリックス節点が通過することが可能となり、より実現象に近い挙動を解析によって再現できる。
- 4) 流出分離試験の解析では、従来のプログラムにおいては不可能だった最終流出量の変化の再現が可能となった。

このように、フレッシュコンクリートの流動状況を的確に予測できる技術を向上させることによって、施工不良などを減少させることが可能になるものと考えられる。

謝辞

本研究に際して、金泰植君（名古屋大学大学

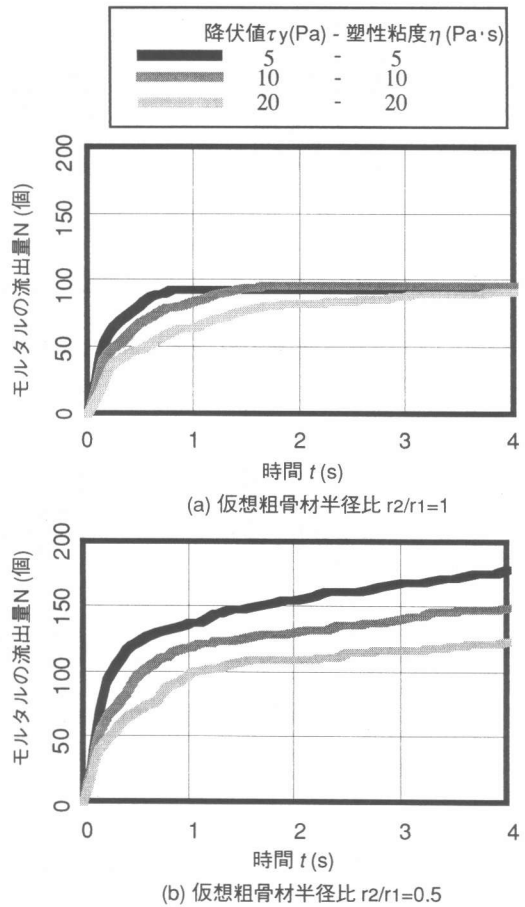


図-8 モルタルの流出量Nの時刻変化

院生)・柘植崇徳君（名古屋大学大学院生）の協力を得た。本研究費の一部は、平成12年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)によった。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 吉野公・西林新蔵・井上正一・黒田保：高流動コンクリートの鉄筋間通過性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.93-98，1996。
- 2) 王迎華・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：フレッシュコンクリート中のマトリックスモルタルの流出分離抵抗性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，No.514，pp.1-7，1998.12。
- 3) 森博嗣・渡辺健治・梅本宏宗・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) 名口芳和・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：モルタル節点を導入した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分離現象に関する解析的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），A-1，pp.709-710，2000.9。