

論文

[1078] 個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション

鍋田克己*1・町田篤彦*2・岩下和義*3・佐々木尊廣*4

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化や高層化が進み、コンクリート現場作業者の不足や高齢化が顕在化しているため、コンクリート工事の省力化や合理化が求められている。その様な中において、高流動コンクリートは施工改善技術として大きな期待を持たれているが、その流動性状は理論的に十分に解明されるには至っていない。フレッシュコンクリートの物性を捕らえ、流動シミュレーションを行うことはコンクリート工事の省力化のための技術開発において、重要な位置を占めるものと考えられる。

本研究では、個別要素法(Distinct Element Method)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、粘塑性流体としての高流動コンクリートの流動解析を試みたものである。

2. 個別要素法の基本原理

個別要素法は非連続体をシミュレーションするための一手法であり、有限要素法や境界要素法のような連続体を解析する手法ではない。個別要素法はその性格上、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適しているため、フレッシュコンクリートへ適用しやすいと考えられる。個別要素法では、要素の変形は別の要素との接触点のみで生じるものとし、この接触点を通じて粒子間の力の伝達が行われるものとする。各要素ごとに独立な運動方程式をたて、時間領域で漸進的に解き、個々の要素の運動を追跡していくものである。そして物質の線形・非線形は、要素の接触点に弾性スプリング、粘性ダッシュポット、スライダーを想定することで表現する。各要素ごとの力とモーメントの運動方程式は、以下の式で表される。[1-2]

$$F = \sum f_c + \sum f_{body} + \sum f_{bound} = m \ddot{u} \quad (1)$$

$$N = \sum m_c + \sum m_{bound} = I \ddot{\phi} \quad (2)$$

F : 要素に働く合力 m : 要素の質量 u : 要素の変位
 $\sum f_c$: 要素間の相互作用による力 (要素間のバネとダッシュポットによる力)
 $\sum f_{body}$: 要素に働く重力等の体積力 $\sum f_{bound}$: 要素表面に働く表面力の和
 N : 要素に働く合モーメント I : 要素の慣性モーメント ϕ : 要素の回転変位
 $\sum m_c$: 要素間の相互作用力によるモーメント
 $\sum m_{bound}$: 表面力によるモーメントの和

*1 防衛施設庁、工修 (正会員)
 *2 埼玉大学教授 工学部 建設工学科、工博 (正会員)
 *3 埼玉大学助教授 工学部 建設工学科、工博
 *4 (株) ハザマ

これらの式を全ての粒状要素について求めるが、運動方程式を連立して直接解くのは困難であるので、時間領域で差分近似することにより数値解析で追跡を行う。以前の時刻の要素の位置より、各接触点に作用する相互作用力を求め、式(1)、(2)により加速度、角加速度を求め、数値積分により変位を求める。

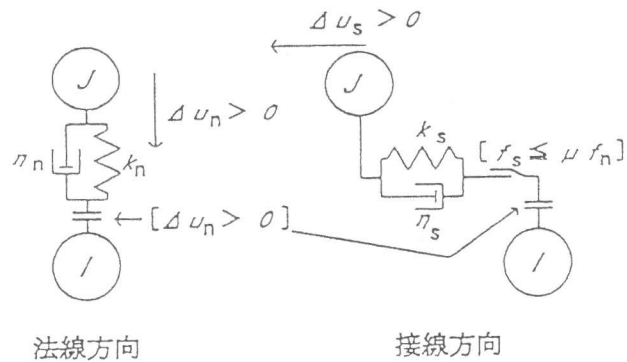


図-1 個別要素法の接触点モデル

3. 個別要素法のフレッシュコンクリートへの適用

個別要素法をフレッシュコンクリートの流動シミュレーションに適用するためいくつかの改良を行った。[3-5]

3.1 粒径

本研究においては、フレッシュコンクリートをモルタルと粗骨材からなる二成分系と考えた。粗骨材の粒径は5~20mmとし土木学会標準粒度範囲に適合する連続粒度とし、形状は完全な球形とした。

3.2 修正粒径

さらに、3.1で求めた粒径を1.2倍したものを修正粒径として解析に用いた。これは、図-2に示すように、それぞれの粗骨材の周辺にモルタルが付着している様子を粒径を1.2倍にすることによって理想化したもので、このモルタル部分で力を伝達できるようにしたものである。また、要素相互の重なり合いは、モルタル部分で生じ、実際の粗骨材相互が重なり合わぬ様に、鉛直・せん断方向のバネ定数を定めた。

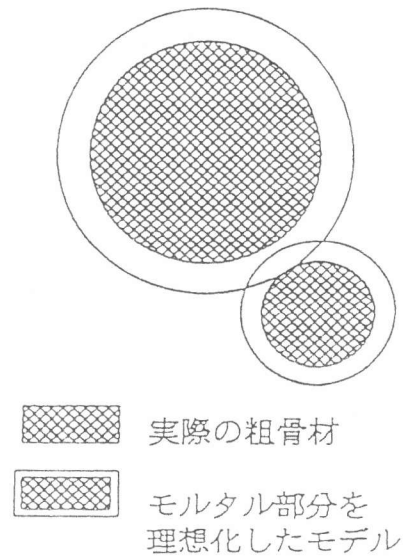


図-2 モデル化された要素

4. スランプ試験のシミュレーション結果

4.1 初期設定

第一に、フレッシュコンクリートをスランプコーンに充填させるシミュレーションを行った。(以下、パッキングと言う)。パッキングの方法は落下法とした。落下法は、図-3に示すように、要素を不規則に発生させた後、自由落下させ各要素の運動エネルギーの総和が0と成った時点締め十分と考えた。なお、パッキングのシミュレーションに用いた要素数は92個であり、粒径の決定方法は3.2に従う。パッキングに要した計算時間は、大型計算機を使用して30時間程度であった。

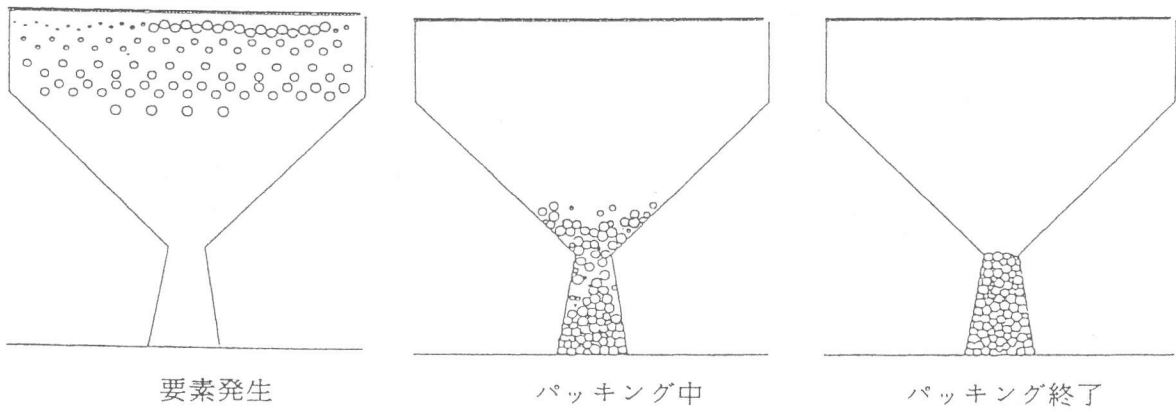


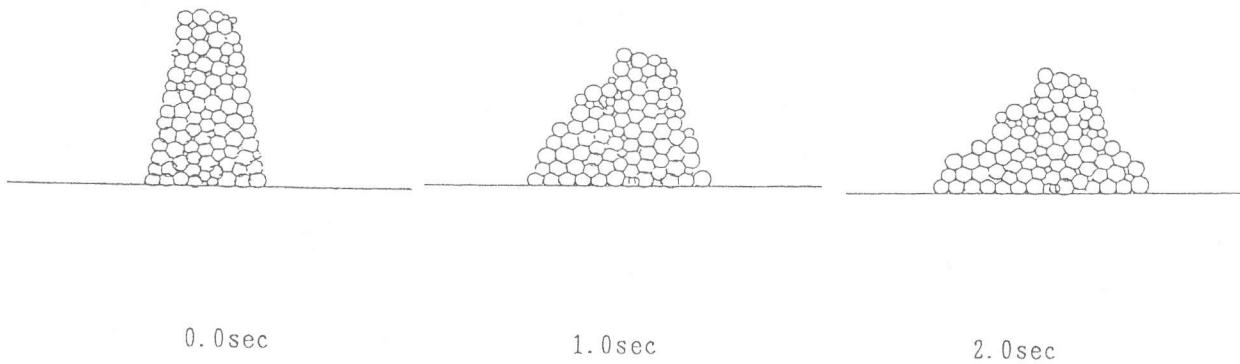
図-3 落下法によるスランブコーンへのパッキング

4.2 スランブ試験

図-4 にスランブ試験のシミュレーション結果の一例を示す。この図の様に、スランブ試験時におけるコンクリートの変形状況は、解析結果で概ね良く表現されている。シミュレーションに用いた各定数はパッキングに用いた定数と同様であり、表-1 に示す。[6-8]

表-1

鉛直方向バネ定数 (N/m)	30.0	せん断方向バネ定数 (N/m)	7.5
鉛直方向ダッシュポット定数 (Nsec/m)	5.7	せん断方向ダッシュポット定数 (Nsec/m)	7.0
要素間摩擦定数	0.01	底面と要素間の摩擦定数	0.1
バネの引張り許容百分率 (%)	0.06	タイムステップ (sec)	1.0×10^{-4}



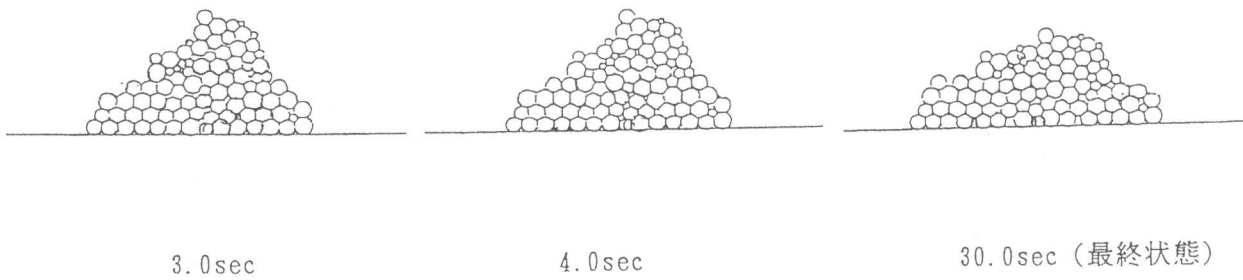


図-4 スランプ試験のシミュレーションの一例

4.3 各定数とスランプフローの関係

図-4と同様のシミュレーションを鉛直方向ダッシュポット定数を $5.7(\text{kg}/\text{sec})$ 、せん断方向ダッシュポット定数を $7.0(\text{kg}/\text{sec})$ を100%とし、同時に両方向の定数を低減させた場合について行った。図-5は、このシミュレーションで得られた、ダッシュポット定数とスランプフローの関係である。ダッシュポット定数の変化百分率が60%のときにスランプフロー値が最小となっているが、ダッシュポット定数の変化によるスランプフロー値の変化は少なく、最大でも10cm程度の違いしかないため、最終状態への影響は小さいと考えられる。

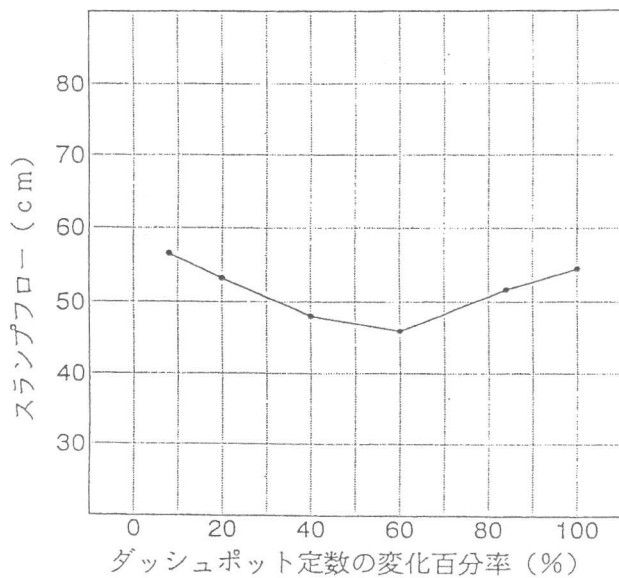


図-5 ダッシュポット定数とスランプフローの関係

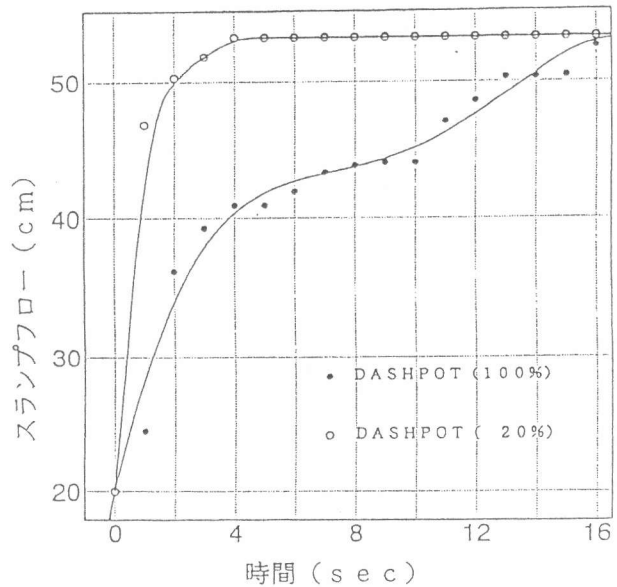


図-6 ダッシュポット定数が変形速度に与える影響

しかし、図-6に示すようにダッシュポット定数は変形速度に大きく影響する。ダッシュポット定数が小さい場合には、変形速度は速く、短い時間で最終状態に達する。逆に、ダッシュポット

ト定数を大きくすると、ゆっくりと変形し、同一の、最終状態になる。このことから、ダッシュポット定数は、スランプ試験の、変形速度を決定するパラメーターであることが分かった。

図-7は要素間摩擦定数とスランプフローの関係である。両者は直線的な関係にあるが、要素間摩擦定数の変化に対するスランプフローの変化は比較的小さく、最終状態への影響は小さいと考えられる。

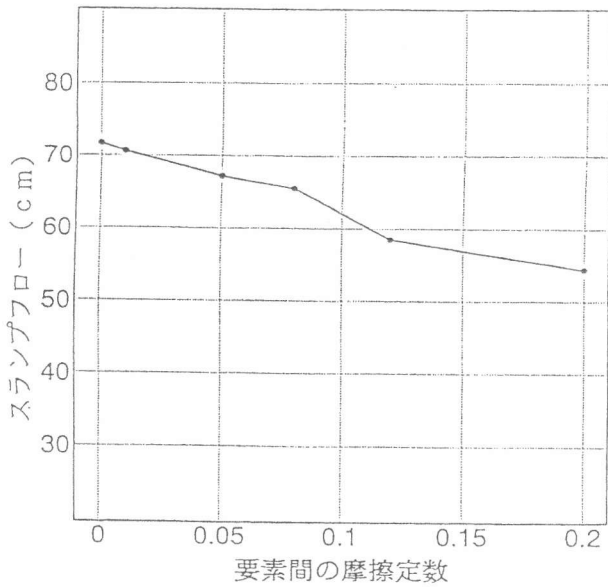


図-7 要素間摩擦定数とスランプフローの関係

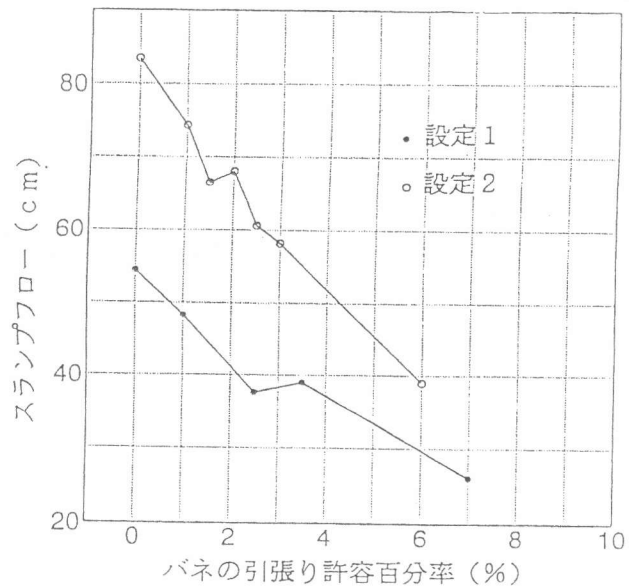
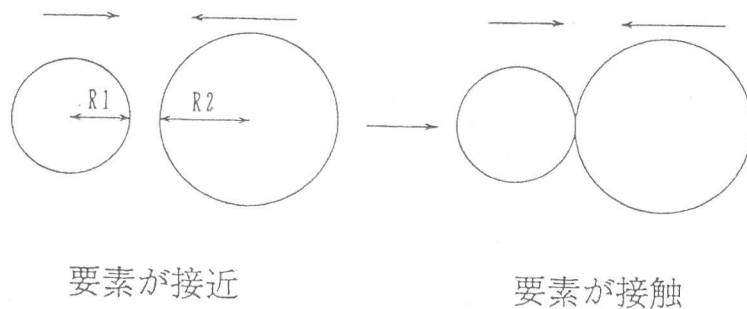


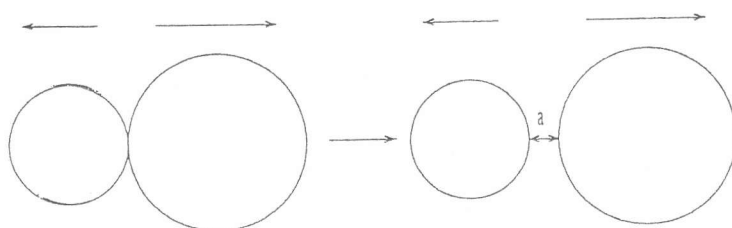
図-8 バネの引張り許容百分率とスランプフローの関係

図-8にバネの引張り許容百分率とスランプフローの関係を示す。バネの引張り許容百分率については、以下に示す。設定1はパッキングに用いた定数、設定2は要素間摩擦定数のみ2倍としたものである。両者とも、バネの引張り許容百分率とスランプフローは直線的な関係がみられ、フレッシュコンクリートの最終状態を支配するパラメーターであると考えられる。



バネの引張り許容百分率は、要素相互の力の伝達を行うモルタル部分を、シミュレーションパラメーターにするために設けた。具体的には、要素が接近するときは全く関係がない。要素が接触したときも、引張り許容百分率とは関係なく力の伝達をする。次に、要素が離れようとしたと

き、要素が多少離れても接触していると仮定して、計算するのが、バネの引張り許容百分率となる。



$$\text{バネの引張り許容百分率 (\%)} = \frac{a}{R1+R2} \times 100$$

5. まとめ

本研究では、個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの解析手法の基本原理と解析結果を示した。数種類のシミュレーション結果から以下のことが言える。

- (1) ダッシュポット定数の影響は、最終状態にはほとんどみられず、変形速度と関係する。
- (2) 要素間摩擦定数、バネの引張り許容百分率は共にスランプフローと直線的な関係があり、変形の最終状態を考える上で重要な指標となる。
- (3) これらの結果をもとにすれば、型枠内を流動する場合のような、さらに複雑な流動状態のシミュレーションが可能と考えられる。

[参考文献]

- 1) 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析—その1—、地震研究所彙報、Vol. 63、pp. 201-235、1988
- 2) 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析—その2—、地震研究所彙報、Vol. 64、pp. 71-118、1989
- 3) 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
- 4) 小高茂央・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 345-350、1993. 6
- 5) 黒川善幸・谷川恭雄・森博嗣・小村理恵：フレッシュコンクリートのスランピング試験に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 351-356、1993. 6
- 6) 鍋田克己・睦好宏史・町田篤彦：特殊混和剤を用いたフレッシュコンクリートの流動性状の解明、土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp. 574-575、1992. 9
- 7) Treval, C. Powers: The Properties of Fresh Concrete、John Wiley & Sons, Inc、pp. 87-304、1968
- 8) 村田二郎・岡田清：最新コンクリート技術選書1 フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ、山海堂、pp. 1-91、1981