

防衛施設庁 正会員 鍋田克己
 埼玉大学工学部 正会員 町田篤彦
 埼玉大学工学部 正会員 岩下和義
 (株) ハザマ 佐々木尊廣

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む中、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。このため、施工改善技術として高流動コンクリートを始めとする様々な流動性状を持つコンクリートが実用化されているが、フレッシュコンクリートの流動・変形性状を定量的に把握し、精度の良いシミュレーション手法を確立した例はない。本研究は、個別要素法を用い、フレッシュコンクリートの流動を2次元的にシミュレーションする手法について研究したものである。

2. 個別要素法の基本原理

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。そして、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く。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。

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

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

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

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解くのは困難である。そこで、連立方程式を直接解くのではなく、時間領域で差分近似することにより数値解析で追跡するのが個別要素法である。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)により加速度角速度を求め、数値積分により変位を求めた。

3. シミュレーション方法

シミュレーションに用いるコンクリートの粗骨材の粒径は5~20mmとし土木学会標準粒度範囲に適用する連続粒度とした。要素の形状は完全な円形とした。実際の粗骨材は表面に凹凸があるため、円形要素より表面摩擦が大きいので、要素間摩擦定数なるシミュレーションパラメーターを設けて対応した。本研究では、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、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。力の伝達は、つけ加えられたモルタル部分で生ずるとし、要素相互の重なり合いについては、モルタル部分の重なり合いは許すが、粗骨材相互が重なり合わぬように配慮した。

4. 実験方法

スランブ試験と箱型フロー試験の2種類を行った。スランブ試験については、スランブ値を指標とすると、これが20cm以上となり差異が明確でなくなるため、スランブフロー値を指標とした。考案し

た箱型フロー試験器は図-1に示す形状で、試験器具の左端の区切られた部分に、全高の半分までフレッシュコンクリート（20リットル）を充填させ、その後仕切板を引き抜き、流動の様子を観察し、最終状態のフロー値を箱型フロー値として計測した。

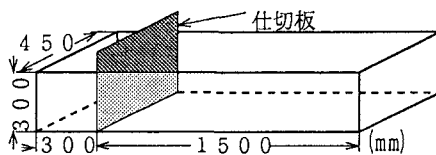


図-1 箱型フロー試験器

5. 実験配合

実験に用いたコンクリートの粗骨材の最大寸法は20mmでシミュレーションと同様に土木学会標準粒度範囲に適用する連続粒度とし、水セメント比は50%、細骨材率は40%とし、高性能減水剤は高縮合トリアジン系化合物、増粘剤はセルロース系水溶性高分子化合物を用いた。単位水量は175, 190, 205kg/m³とし、それぞれに、増粘剤の使用量が1.0, 3.0kg/m³とした合計6種類の実験を行った。

6. 結果および考察

図-2ではシミュレーションパラメーターであるバネの引張り許容百分率とスランブフロー値および箱型フロー値を比較した。フレッシュコンクリートの流動・変形の最終状態である各フロー値と引張り許容百分率は強い相関がみられ、引張り許容百分率は、スランブフロー値および箱型フロー値を決定する最も大きな要因であると同時に、レオロジ的に考えた場合、流動・変形の最終状態を支配する降伏値に相当することが明かとなった。図-3の結果から、単位水量および増粘剤の使用量と、バネの引張り許容百分率の関係は直線的になり、シミュレーションのパラメーターであるバネの引張り許容百分率が、ある程度、コンクリートの配合である単位水量および増粘剤の使用量から予測することが可能となった。実験結果とシミュレーション結果の比較は図-4のようである。底面と要素間の摩擦定数は、スランブ試験の解析では0.15とし、箱型フロー試験でも同値を用いたが、実験値と解析値が一致しないため、箱型フロー試験の解析では底面と要素間の摩擦定数は0.004とした。その他のシミュレーションパラメーターは、スランブ試験、箱型フロー試験で同一とした。このような実験値とシミュレーション値が良い一致を見たことは、個別要素法によるシミュレーションに用いたパラメーターが適切であったためであり、パラメーターさえ適切に設定できれば、個別要素法はフレッシュコンクリートの流動性状をシミュレーションする上で有望な手法であると言える。

〔参考文献〕 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

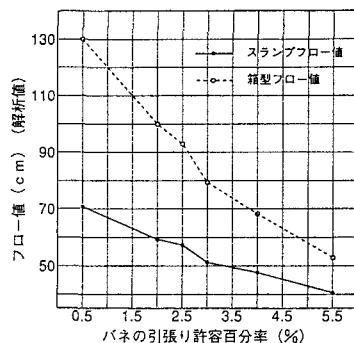


図-2 引張り許容百分率とフロー値の関係

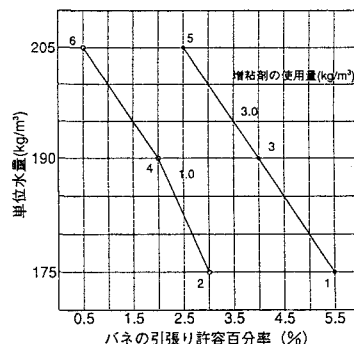


図-3 引張り許容百分率と単位水量の関係

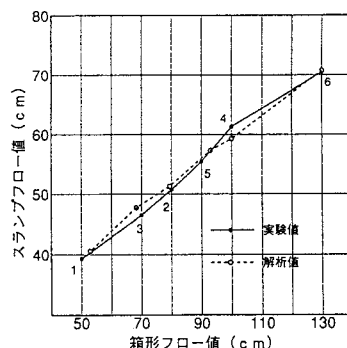


図-4 実験値と解析値の比較