

フジタ工業（株）技術研究所 正員 小谷勝昭
同 上 正員 ○神田 亨

1) はじめに

コンクリートの施工に当り、使用するコンクリートが現場の施工条件に対して、どのような流動性を持てば良いのか、あるいは、そのコンクリートの持つ流動性に対して最適な施工法は、いかにあるべきかを事前検討しておくことは、極めて重要といえる。

例えば、プレパクトコンクリートで注入モルタルを施工する時、目づまりせず、なおかつ空隙の生じないよう充填するには、どのような配合が良いのだろう。また配管のピッチはどのくらいが適当なのだろう。コンクリートをポンプ圧送する時、管のエルボー部の圧力損失はどのくらい見積れば良いのだろう。吹き付けコンクリートを施工する時、リバウンド量を最小に押えるには、どのような配合が良いのだろう。またノズルからの流出速度はどのくらいが適当なのだろう。連続地中壁のコンクリートをトレミー管で施工する時掘削安定液を巻きこまずに打設するには、どのような流動性を持たせれば良いのだろう。

このような実施工におけるコンクリートの多様な流動状況をあらかじめ予測できれば施工管理上、非常に有用であらうと思われる。本研究のねらいは、実測で得られたレオロジー定数をインプットデータとしてコンクリートやモルタルの流動状況を電算機を用いた解析により追跡していく手法を提案することにある。

2) 解析手法

フレッシュコンクリートの流動の特徴としては、Reynolds数は比較的小さいが非Newton流動であり、実施工においては自由表面を伴う場合が大半であることが上げられる。そこでこうした自由表面問題に対して、実績のある『MAC』の差分スキームを採用し、これをコンクリートの様な非Newton流体に拡張することにした。簡単のため、2次元で話を進める非圧縮性流体の基礎方程式はNavier-Stokesの方程式と連続の式である。

Navier-Stokes Equation

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vw}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)\end{aligned}$$

Equation of Continuity

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

空間を直交等間隔メッシュにて有限個のセルに分割し、流速は各成分方向軸に直角なセル面の中央で定義する。N・S方程式を時間に前進、空間に中心の差分近似を行ない step by step で計算を進める。連続の方程式は圧力を通じて満足させる。N・S方程式を交差微分して加えあわせ、圧力に関するPoisson方程式を導出し、次タイムステップにおいて連続の方程式を満たすべく圧力を計算する。Poisson方程式の解法はSORを使用した。自由表面が存在する場合には、流体セル中に質量を持たない仮想粒子“マーカー”を配置し、近接セルの流速で直線内挿して移動させる。マーカーの有無で流体と空間とを識別する。このマーカーは流れの可視化のためにも非常に有効である。アルゴリズムの詳細は紙面の都合上、省略する。この手法をコンクリートに適用するに当って、問題となるのは、粘性係数 μ がせん断速度依存性を持つ点である。

通常、コンクリートはビンガム体として近似されているが実際のコンシステンシー曲線とは、かなり掛けはなれたものである。このため時間積分の過程で大きな誤差を生じる可能性がある。指数法則流体として近似すればかなり改善されるが、いずれにしろインプットデータの段階で誤差を含むのは避けるべきであり、コンシステンシー曲線を直接スプライン近似するのが最良の方法であろう。

3) 解析例

右図は前述のマーカーの軌跡（流体の動き）を時間の経過とともに描写したものである。Case-1はホッパーにコンクリートを満たし出口のゲートを瞬間的に開いた時のコンクリートの落下状況をシミュレートしたものである。対象とする工種としては連続地中壁を想定している。底面に衝突した後のコンクリート動きはレオロジー定数により異なる。これにより、安定液を巻きこまないような配合を探すことができる。

Case-2はコンクリートの球状のかたまりが下のコンクリート中に落下した時のシミュレーションである。対象とする工種は吹き付けコンクリートである。衝突後の衝撃の吸収能力の大きな配合がリバウンドを少なくできると思われる。

4) おわりに

実測によって得られたレオロジー定数を実施工に役だてたいという観点から数値シミュレーションを行ない、比較的リーズナブルな解が得られた。N・S方程式が解析的に解けない以上、計算の結果は物理実験により検証されねばならない。しかしながら現象自体が非定常であり、この検証は、なかなか難しいと思われるが、現在、二、三の模型実験を進めており、この結果は別の機会に発表したい。今後は3次元問題にまでプログラムを拡張しここでは、触れなかったレオロジー定数の時間依存性やチキソトロピーまで考慮した解析を行なう予定である。

<参考文献>

- 1) F.H.Harlow, J.E.Welch: "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscos Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", Physics of Fluids, Vol.8, No.12, 1965

