

フレッシュコンクリートの流動シミュレーション （市販の流動解析コードの適用性）

安藤建設（株）技術研究所 正会員 石黒 和浩
安藤建設（株）技術研究所 富谷 潤一

1. はじめに

シールド工法の一つであるECL工法は、シールド機内に内型枠を組み立てシールド機の進行に伴い地山と内型枠の間にコンクリートを打設し、覆工体とするものであり、コンクリートの充填状況が重要となる。充填性については、品質に加えて打設管の位置、打設方法等が重要と考えられるが、実験的にすべての可能性について確認することは、コストの面等から不可能と考えられる。フレッシュコンクリートの施工性を合理的に評価するため、各種粘度計によりレオロジー定数を測定し、その結果からワーカビリティを評価する研究、流動現象を解析的に取り扱う研究等が現在盛んに行われている。ECL工法におけるフレッシュコンクリートの流動現象を解析的に取り扱うことができれば、施工実験を行う以前により広い可能性について検討できる。本報告では市販の流動解析コードをECL工法のコンクリート打設シミュレーションに適用することを目的として、スランプ試験についてパラメータスタディを行い検討した結果について報告する。

2. 解析の概要

2. 1 解析手法

市販の流動解析コードを用いてスランプ試験や型枠内充填状況のシミュレーションを行う場合、自由表面を含む流動解析を行う必要があり、一般的な運動方程式や連続の式に加えて、自由表面を適切に評価する必要がある。評価方法として、(1)SURF⁽¹⁾、(2)MAC⁽²⁾、(3)ALE⁽³⁾、(4)VOF⁽⁴⁾⁽⁵⁾があげられ、その代表的モデルであるVOF法によって行った。VOF法は、流動現象を解析するための解析領域内流体要素に、その要素内に流体が占める流体体積の比率（流体体積率VOF）を定義し、移流計算を行うことによって、時々刻々と変化する自由表面を求めるものである。また、VOF値は $0.0 \leq \text{VOF} \leq 1.0$ の範囲であり（VOF=0.0 気相、VOF=1.0 液相、 $0.0 < \text{VOF} < 1.0$ 表面要素）、各要素のVOF値より表面要素が決定される。

2. 2 降伏関数

フレッシュコンクリートは、降伏値(τ_f)を持つBinghamが提案した降伏関数⁽⁶⁾で表されることが考えられる。本解析に用いた流動解析コードにおいては、Newton流体の降伏関数の使用を想定しているため、Bingham流体の降伏関数を使用するためには見かけの粘性係数(η')を与える必要があり、 η' は一定値ではなく、ひずみ速度($\dot{\gamma}$)の関数として与えられる。スランプ試験について降伏関数もパラメータとして取り扱い、Bingham流体、Newton流体、非Newton流体についてパラメータスタディを行った。

Bingham流体	非Newton流体	Newton流体	
$\tau = \eta' \cdot \dot{\gamma}$	$\tau = \eta' \cdot \dot{\gamma}$	$\tau = \eta' \cdot \dot{\gamma}$	τ :せん断応力
$\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{\text{LIM}} \quad \eta' = \tau_f / \dot{\gamma} + \eta$	$\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_{\text{LIM}} \quad \eta' = A \cdot \dot{\gamma}^B$	$\eta' = \text{const}$	A, B, const:定数
$\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\text{LIM}} \quad \eta' = \text{const}$	$\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\text{LIM}} \quad \eta' = \text{const}$		

ただし、上記において $\dot{\gamma}$ が、0.0に近づくとき η' は大きくなり0.0の時発散する。このため、あるひずみ速度($\dot{\gamma}_{\text{LIM}}$)以下の η' を一定値として与えた。

2. 3 境界条件

流体（フレッシュコンクリート）と固体（スランプ試験における鉄板）間の境界条件を定める必要がある。今回使用した流動解析コードでは、(1)流体と固体間に抵抗がないとするfree-slip、(2)流体と固体間にすべりがいないとするnon-slip、(3)境界面からの速度分布を指数で与えるべき乗則から選択できる。境界条件によ

る影響についても、パラメータスタディを行った。

3. スランプ試験のシミュレーション

降伏関数, η' について図-1に示す。各降伏関数について解析した結果を図-2に示す。本解析の検証を行うにあたって、時刻歴のスランプの変化として谷川ら⁽⁷⁾の実験結果と比較を行った。降伏関数に用いた値は、谷川らの実験結果を近似できるものをパラメータスタディにより決定した。また、 γ_{LIM} については、スランプ試験中の γ の分布を考慮して決定した。実測値と比較すると、本解析結果は試験開始から終了するまでのすべてに時間帯において一致しているものとはいえない。特に流動初期の時間帯において、解析結果は、流動速度が遅くなっている。解析で使用している降伏関数が、 γ が0.0近傍でBingham流体の挙動を示していない点、流動解析コードが流動状態をシミュレートすることを目的としている点と考えられる。一方、コンクリート全体が流動している時点の変形速度については、近似されることが確認でき、 γ が γ_{LIM} 以上ではBinghamの降伏関数となるためと考えられる。

4. 考察およびまとめ

- (1)境界条件による差異は、認められなかった。
- (2)Newton流体については、物性値としての粘性係数を用いたとき初期において表現できるが、0.5秒以後スランプ値は過大となる。また、Bingham流体を考慮した η' を用いると、スランプ値は近似できるが、初期の沈降速度が表現できない。
- (3)非Newton流体, Bingham流体の両者は、同じ傾向を示す。実測値に比較して、初期流動状態が異なるためにスランプの進行する速度が遅い。
- (4) γ_{LIM} 以下の η' の取り扱いを一定値でなく γ による線形関数としたものが、より実測値に近似され適用の可能性が見いだせた。

[参考文献] (1)C.W. Hirt, B.D. Nichols, N.C. Romero: "SOLA" A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, Los Alamos Scientific Laboratory (2)F. H. Harlow, J. E. Welch: "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", Physics of fluids, Vol. 8, No. 12, 1965 (3)C.W. Hirt, A. A. Amsden, J. L. Cook: "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for all Flow Speeds", Los Alamos Scientific Laboratory (4)C.W. Hirt et al.: "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, 39(1981)p. 201 (5)B.D. Nichlos et al.: "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundary", LA-8355(1980) (6)Y. C. 777: 連続体の力学入門, 培風館, PP132-172, 1974 (7)谷川, 森, 福島: 粘弾性有限要素法によるフレッシュコンクリートのスランプ挙動の解析, 日本建築学会大会学術講演概要集, No. 1243, PP. 485-486, 1985. 10

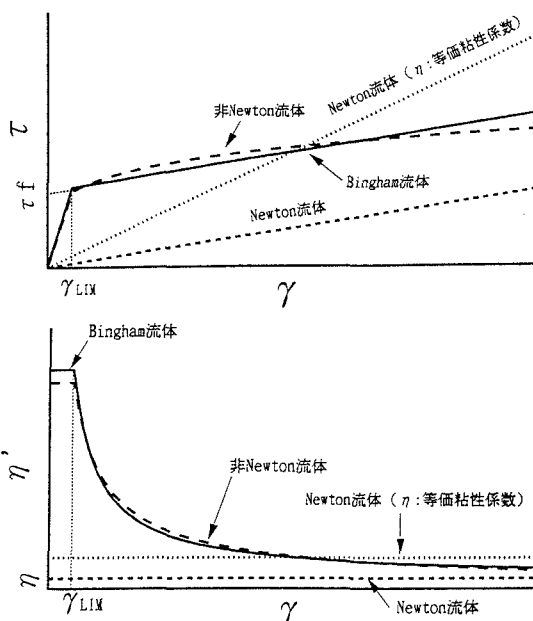


図-1 降伏関数 見かけの粘性係数

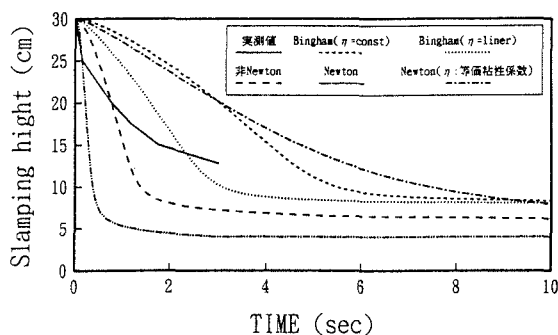


図-2 スランプ-沈下時間