

J 型フロー試験によるレオロジー定数を用いたコンクリートの流動解析

佐藤工業(株) ○歌川紀之, 黒田千歳

(株)数値流体力学コンサルティング 川村隆文

筑波大学 京藤敏達

1. はじめに

自己充填コンクリートをトンネル覆工コンクリートの打設に使うことを検討している. その際に打設実験とともに流動解析を活用するための予備的研究として, J 型フロー試験によってコンクリートのレオロジー定数を決定し, その値を用いてスランプフロー試験および覆工コンクリート打設のシミュレーションを実施した.

2. 流動解析手法の選定

無筋のトンネル覆工への自己充填コンクリート打設では骨材の干渉の影響は小さいと考えられるので, 自由表面を有する連続なビンガム流体としてコンクリートを扱う解析手法を用いる. ビンガム流体モデルには Herschel-Bulkley モデル ($n=1$) を用いた. 解析には Ansys Fluent を用い, 自由表面は VOF 法により取り扱う.

3. J 型フロー試験を用いた粘性の物性値の検討

山本らにより考案された J 型フロー試験¹⁾では, 写真-1 に示す J 型フロー試験器にコンクリートを充填させて出口の栓を抜き, コンクリートの落下挙動(時間とコンクリート高さの関係)を測定した結果からレオロジー定数を求める. ここでは, コンクリートの上面の高さの変化は, レーザ変位計を用いて 40Hz のサンプリング周波数で測定した.

測定したコンクリートの高さの時間変化を図-1 に示す. 管内の流れが十分発達した後は高さの変化率は管内の平均流速に等しくなると考え, 計測データの 2 秒ごとの区間に対して最小 2 乗法により高さ h と平均流速 U の関係を求めた.

ビンガム流体の管内流では駆動圧 ΔP と平均流速 U の間に以下の Buckingham-Reiner の式が成り立つ.

$$U = \frac{R^2}{8\mu l} \left\{ \Delta P - \frac{4}{3} \Delta P_0 + \frac{1}{3} \frac{(\Delta P_0)^4}{(\Delta P)^3} \right\} \quad (1)$$

$$\Delta P_0 = \frac{2l\tau_0}{R} \quad (2)$$

ただし μ は塑性粘度, τ_0 は降伏応力, R は管の半径, l は管の長さであり, J 型フロー試験においては

$$\Delta P = \rho g h \quad (3)$$

$$l = h + L \quad (4)$$

となる. (2)~(4) 式を(1)式に代入すると, 高さ h と平均流速 U の間の関係を表す(5)式が得られる.

$$U = \frac{\rho g R^2}{8\mu} \cdot \left(\frac{h}{h+L} \right) - \frac{R\tau_0}{3\mu} + \frac{2}{3\mu R^2} \cdot \frac{\tau_0^4}{(\rho g)^3} \quad (5)$$

(5) 式に実験で計測された高さ h_i と平均流速 U_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) を代入して残差を求め, 残差の 2 乗和が最小になるような μ と τ_0 を非線形計画法の手法によって求めたところ, $\mu = 50.7$ [Pas], $\tau_0 = 65.3$ [Pa] という値が得られた.

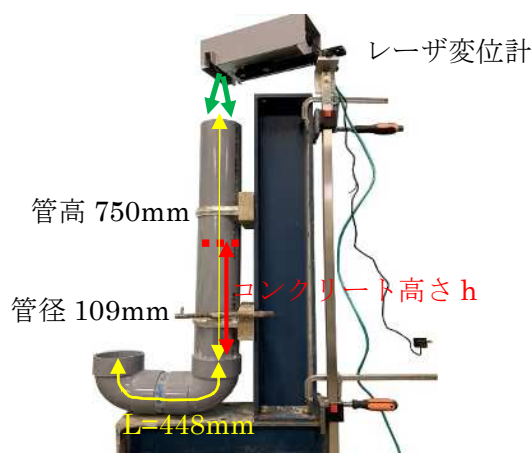


写真-1 J 型フロー試験

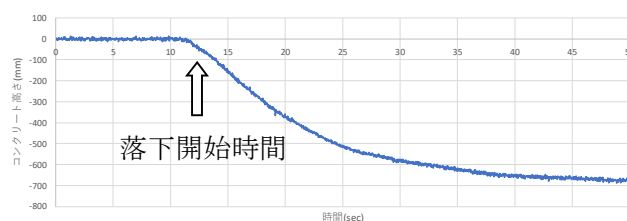


図-1 コンクリート高さの時間変化

Keyword: コンクリート流動解析, ビンガム流体, J 型フロー試験, 自己充填コンクリート, 覆工コンクリート

連絡先: 〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10 佐藤工業(株)技術研究所 TEL 046-270-3091

4. 流動シミュレーション

(1) スランプフロー試験

J 型フロー試験で特定された物性値を用いてスランプフロー試験のシミュレーションを実施した。解析の種類は軸対称 2 次元とし、底面半径 10cm, 頂面半径 5cm, 高さ 30cm の円錐台形の初期液相分布を与えて計算を実施した。スランプコーンの引き抜きは考慮せず、時刻 0 においてコーンが消失する状況の計算となる。メッシュは高さ方向と半径方向ともに 1mm の等間隔格子とし、時間刻みは 0.01 秒とした。 τ_0 と μ については J 型フロー試験で特定した値 $\mu = 50.7$, $\tau_0 = 65.3$ を用い、モデル定数である臨界ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ は 0.01 [1/s] とした。

図-2 にコンクリート面の形状の計算結果を示す。スランプフロー半径は時間とともに広がり、約 30 秒でスランプフロー試験の結果の値である 301mm に達する。計算では流動が完全に停止する状況を表現できないため、その後もゆっくりと広がり続けるが、おおむね実験に近い挙動を再現していると言える。

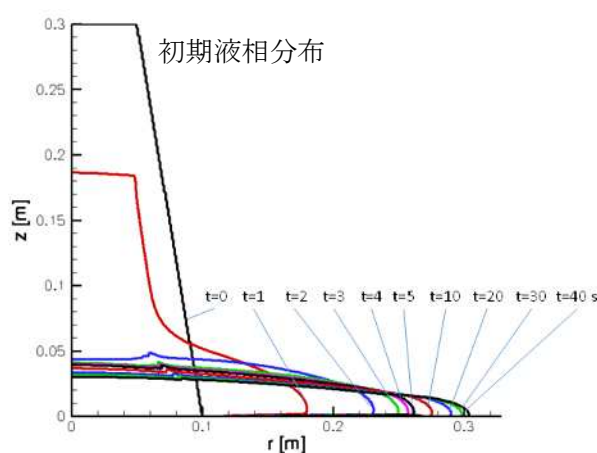
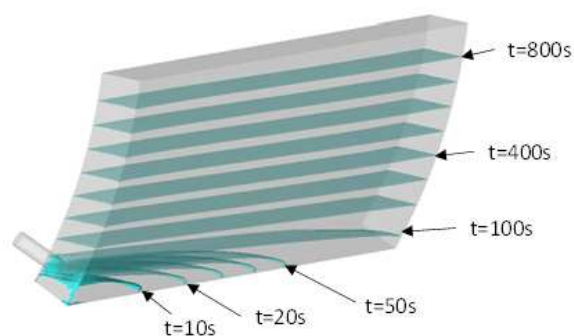


図-2 スランプフロー試験における形状の時間変化

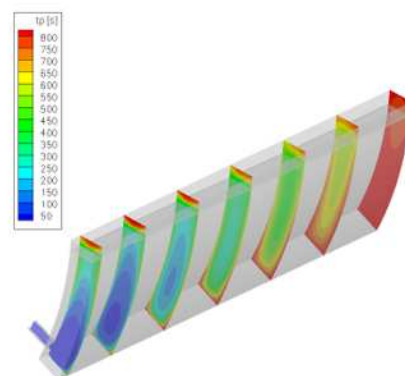
(2) トンネル覆工の打設シミュレーション

覆工の厚さは 300mm, 内側の半径は 5010mm, 奥行きは 6000mm である。コンクリートは両側に 1 つずつ設置された打設口からそれぞれ 20m³ 毎時の速度で注入される。計算領域は片側断面の打設口周辺の奥行 6000mm, 高さ 3000mm の範囲とし、コンクリートの注入開始から 840 秒間の挙動の解析を行った。 $\mu = 50$ [Pa・s], $\tau_0 = 60$ [Pa] を用いた。空間解像度は 20mm で計算セル数は約 70 万である。時間刻みは 0.1 秒とした。

図-3(a)にコンクリート面の推移を示す。端から打設した場合は打設開始から約 90 秒で奥行き方向の端部までコンクリートが到達し、その後はコンクリート面がほぼ水平な形状を保ったまま上昇していく。図-3(b)には計算の最終状態(時刻 840 秒)における粒子滞在時間の分布を示した。粒子滞在時間はコンクリート粒子が打設口を出てからの時間の経過を表しており、赤い色の部分は打設開始直後に注入されたコンクリートを、青い部分は注入されてから間もないコンクリートを示す。コンクリートの粒子滞在時間は材料分離や物性の変化などと関係があると考えられるため、今後実施する打設実験と比較して流動解析の結果の妥当性について検討を行う。



(a) コンクリート高さの時間変化



(b) コンクリート粒子滞在時間 (t=840sec)

図-3 打設シミュレーションの結果

5. まとめ

J 型フロー試験により、コンクリートの物性を検討し、その物性値により、流動解析を実施した。

参考文献: 1) 山本康弘, 本間礼人, 橘高義典: 高流動コンクリートの流動特性の試験方法 (J 型フロー試験) に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 489 号, 9-16, 1996 年 11 月。