

非ニュートン流体の粘性特性を考慮したグラウト注入に関する理論式の検討

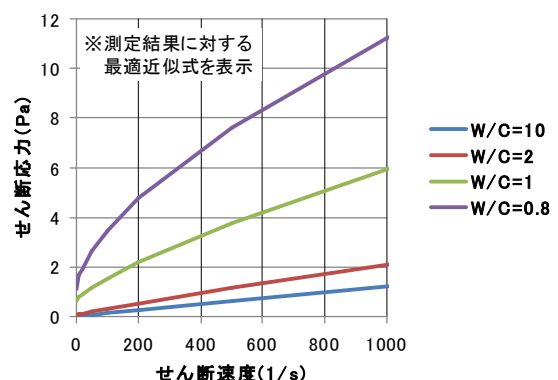
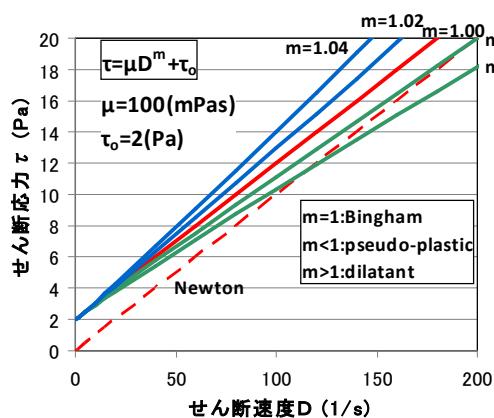
茨城大学理工学研究科(東京電力(株)) 正会員 ○岸 裕和
茨城大学 正会員 小峯 秀雄

1. 目的

グラウトには溶液型、懸濁液型など様々な種類が存在し、そのためグラウトの種類ごとに流体としての粘性特性が異なる。グラウトを効率的に対象地盤へ注入させるためには、注入するグラウト濃度(配合)や注入圧力、流量についてよく吟味し最適化する必要がある。その条件としてグラウトの粘性特性について十分に考慮する必要がある。グラウトの粘性特性は、溶液型や低濃度(貧配合)の懸濁液型については、ニュートン流体に近い粘性特性を示すが、比較的高濃度の懸濁液型については、非ニュートン流体的な特性が強まる。この粘性特性の考慮の程度により、グラウト注入中の挙動に関して予測と実測の乖離が大きくなるため注意が必要である。今回、種々のグラウトの粘性特性に対応するため、非ニュートン流体に相当する粘性特性を考慮し、グラウト注入圧力と流量の理論的な関係について検討した結果に基づき新たな理論式を提案する。ここでは、グラウトの浸透する場は、典型的な亀裂系の場合(平行平板割れ目)と均質な多孔質媒体系の場合を想定した。

2. グラウトの粘性特性の考慮について

流体の粘性特性を明解に把握するためには、流体に働くせん断速度とせん断応力の関係に着目するのがよい。この代表的な分類は図-1に示すものであり、周知のとおり、ニュートン流体の粘性特性は原点をとる直線で表される。非ニュートン流体では、この関係が曲線状(非線形)なものであったり、静止状態から流動を始めるまでの抵抗を有することから、この関係が原点を通らず切片(降伏値)を有するものとなる。一般的に、非ニュートン流体は、図-1に示される関係の特徴に基づいて、ビンガム流体、擬塑性流体、ダイラタント流体の3種に分類される¹⁾。土木構造物基礎への恒久グラウトとして一般的に用いられる懸濁液型(セメント系)のグラウトの多くは、これらに準ずる粘性特性を有する。ここで、高炉B種セメントグラウトの粘性特性を調査した結果²⁾を図-2に引用する。配合が貧配合から富配合になるにしたがい、非ニュートン流体的な特性が強くなる。ここで注目すべき特性は、富配合になれば、shear-thinning 特性が強くなるとともに、一般的な擬塑性流体と異なり降伏値を有するようになることである。よって、本検討ではこの条件を考慮した検討を行った。



3. グラウト注入に関する新たな理論式の提案について

グラウト注入に関するモデルを検討するにあたり、前節のグラウト粘性特性の考慮に加え、グラウトが浸透する場について考慮する必要がある。一方、近年、地盤のモデル化は計算機の発展にともない複雑化する傾向にある。このようなモデルは精密(リアル)なメカニズムを理解する等のためには有効であると考えられるが、実務的な検討に導入するには多々困難な点がある。そのため、従来から比較的シンプルなモデルを想定して、グラウトが浸透する場を考慮するアプローチが検討されている。代表的なものとしては、グラウトの浸透する

キーワード グラウト, 非ニュートン流体, 平行平板モデル, 多孔質媒体モデル, Navier-Stokes 方程式

連絡先 〒100-8560 東京都千代田区千代田 1-1-3 東京電力株式会社建設部 TEL 03-6373-1111

場を岩盤の亀裂を平行平板に近似した平行平板モデルにより検討された, Gustafson-Stille モデル³⁾, ならびに, 砂礫・土質地盤をイメージし, 場を均質な多孔質媒体とするモデル⁴⁾が存在する.

したがって, 本検討では, 地盤の特徴に応じた検討が可能となるよう, これらの典型的なモデルを援用してモデル化(定式化)を検討することとした. 定式化を検討するにあたり, 流体(グラウト)の粘性特性を反映するために, 基礎方程式は Navier-Stokes の方程式ならびに連続の式とした. 座標系は円筒座標を基本とし, これらの基礎式を図-3, 4に示す平行平板間放射流モデルと多孔質媒体内放射流モデルについて適用を図った. このとき, 注入孔からのグラウトの影響範囲(半径)を想定し, 注入孔からグラウトにかけての領域とその外側の地下水の領域との間に成立する力の釣り合いの関係を導いた. なお, グラウトの進行過程を取り扱うことを可能とするため, 基礎方程式の非定常項を考慮した. 各モデルに関する検討結果を以下に示す. それぞれの特徴として, 平行平板間放射流モデルでは, 慣性力の影響を考慮するため, 流れの断面に関する運動量に関する運動量補正係数⁵⁾を導入した. また, 多孔質媒体内放射流モデルでは, 間隙内の流れは代表径を与えた管路内の流れとみなし, その媒体内での屈曲の程度と流れの進行にともなう管路の分岐による圧力損失を考慮した.

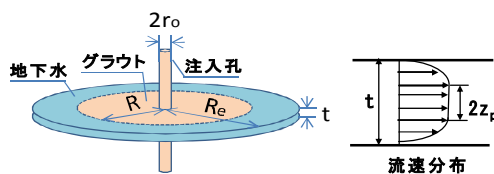


図-3 平行平板間放射流モデル

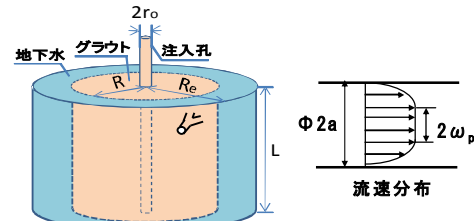


図-4 多孔質媒体内放射流モデル

【平行平板間放射流モデル理論式】

$$P_o = \frac{1}{2\pi t} \left[\rho_g \ln \left(\frac{R}{r_o} \right) + \rho_w \ln \left(\frac{R_e}{R} \right) \right] \frac{\partial Q}{\partial T} - \frac{Q^2}{4\pi^2 t^2} \left[\int_{r_o}^R \frac{\eta_p \rho_g}{r^3} dr + \int_R^{R_e} \frac{\eta_N \rho_w}{r^3} dr \right] + \int_{r_o}^R \frac{\tau_y}{z_p} dr + \frac{6\mu_w Q}{\pi t^3} \ln \left(\frac{R_e}{R} \right) \quad [\text{eq.1-1}]$$

$$\eta_p = \frac{\frac{4}{n+1} \left\{ \frac{n+1}{(n+2)(2n+3)} \left(\frac{1}{2} - \frac{z_p}{t} \right) + \frac{1}{2(n+1)} \frac{z_p}{t} \right\}}{\frac{1}{(n+2)^2} \left(1 + \frac{2}{n+1} \frac{z_p}{t} \right)^2} \quad [\text{eq.1-2}]$$

$$\frac{Q}{2\pi r t} = \frac{t^{n+1}}{n+2} \left(\frac{\tau_y}{\mu_p z_p} \right)^n \left(\frac{1}{2} - \frac{z_p}{t} \right)^{n+1} \left(1 + \frac{2}{n+1} \frac{z_p}{t} \right) \quad [\text{eq.1-3}], \quad R = \sqrt{r_o^2 + \frac{\int Q dT}{\pi t}} \quad [\text{eq.1-4}]$$

【多孔質媒体内放射流モデル理論式】

$$P_o = \frac{\xi}{2\pi n_e L} \left[\rho_g \ln \left(\frac{R}{r_o} \right) + \rho_w \ln \left(\frac{R_e}{R} \right) \right] \frac{\partial Q}{\partial T} + \int_{r_o}^R \frac{2\xi \tau_y}{\omega_p} dr + \frac{4\mu_w \xi Q}{\pi n_e a^2 L} \ln \left(\frac{R_e}{R} \right) + \frac{K_d Q^2}{4\pi^2 n_e a^2 L} \left[\rho_g \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{R} \right) + \rho_w \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_e} \right) \right] \quad [\text{eq.2-1}]$$

$$\frac{Q}{2\pi n_e r L} = \frac{a^{n+1}}{2^n (n+3)} \left(\frac{\tau_y}{\mu_p \omega_p} \right)^n \left(1 - \frac{\omega_p}{a} \right)^{n+1} \left\{ 1 + \frac{2}{n+2} \frac{\omega_p}{a} + \frac{2}{(n+1)(n+2)} \left(\frac{\omega_p}{a} \right)^2 \right\} \quad [\text{eq.2-2}], \quad R = \sqrt{r_o^2 + \frac{\int Q dT}{\pi n_e L}} \quad [\text{eq.2-3}]$$

P_o : 注入圧力, Q : 注入流量, r_o : 注入孔半径, R : グラウトの浸透半径, R_e : 流れの影響半径, T : 時間, t : 平行平板間隙幅,

a : 多孔質媒体間隙代表径, ρ_g : グラウトの密度, μ_p : グラウトの塑性粘度, τ_y : グラウトの降伏値, ρ_w : 地下水の密度,

μ_w : 地下水の粘度, η_p, η_w : グラウト・地下水の運動量補正係数 ($\eta_p = 1.0 \sim 1.2, \eta_w = 1.2$), ξ : 屈曲率, K_d : 分岐損失係数, $n = 1/m$

4. 今後の検討について

今後は, グラウトの粘性特性による注入挙動について, モデル式を用いた数値シミュレーションによる評価, ならびにこれから予測される注入挙動を検証するための室内実験について取り組むこととしたい.

参考文献 1) 中村喜代次: 非ニュートン流体力学, コロナ社, pp.68-71, 1997.

2) 岸裕和: ダム基礎岩盤におけるセメントミルクの注入特性に関する基礎的検討, 電力土木, No.281, pp.14-18, 1999.

3) Gustafson, G. and Stille, H.: Stop criteria for cement grouting, Felsbau 23(3), pp.62-68, 2005.

4) 佐藤邦明: 均質多孔媒体におけるグラウト注入液の流動機構に関する基礎的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.25, No.3, pp.157-166, 1985.

5) 角江俊明: 節理性岩盤のルジオン値と透水性の関係とその評価方法, 土木学会論文集, No.736/III-63, pp.67-82, 2003.