ビンガム流体挙動および目詰まり効果を考慮した岩盤亀裂グラウト予測解析手法の検討

清水建設(株) 正会員 〇米山 一幸、 延藤 遵

<u>1. はじめに</u>

山岳トンネルや放射性廃棄物処分施設などの岩盤構造物の建設において、空洞湧水を抑制する目的で岩盤 亀裂に対するグラウチングがしばしば施工されるが、近年の施工の合理化や情報化施工の進展に伴ない、グ ラウト浸透範囲や地山改良効果に関する定量的な予測評価に対するニーズが高まりつつある。本研究では、 数値解析によるグラウト挙動予測評価手法について、従来の検討されてきたグラウト材料の粘性の経時変化 に加え、グラウト材料のビンガム流体挙動とグラウト材料粒子による流路閉塞(目詰まり効果)をモデル化 した解析手法を開発し、理論解との比較およびモデル亀裂を用いた試解析によりその有効性の検証を行う。

<u>2. グラウト挙動の数値解析手法</u>

地盤内のグラウト浸透挙動の数値解析手法としては、積分差分法による汎用地下多相流-熱流動連成解析 プログラム TOUGH2 のアプリケーションとして、粘性の経時変化を考慮した水-空気-グラウト3成分3相 モデルの状態方程式モジュール(EOS11)が開発され、ソースコードが公開されている¹⁾。本研究では、こ のプログラムをベースに、以下の物理モデルを新たに組み込んだ状態方程式モジュールを開発した。

①ビンガム流体挙動

ー般にセメントスラリーはビンガム流体として流動することが知 られており、セメント系グラウト材料の浸透挙動についても同様の モデル化が必要となる。ビンガム流体の塑性方程式を以下に示す。

 $\tau = \tau_0 + \mu D$

(1)

ここで、 τ : せん断応力、 μ : 粘性係数、D: せん断速度、 τ_0 : 降 伏せん断応力であり、 $\tau_0 = 0$ のとき(1)式はニュートン流体の塑性方 程式となる。また、岩盤亀裂を平行平板と仮定した場合、亀裂内の ビンガム流体流動について以下の運動方程式が導かれている²⁾。

$$u = -\frac{dp}{dx}\frac{b^2}{12\mu}\left(1 - 3\cdot\frac{Z}{b} + 4\cdot\left(\frac{Z}{b}\right)^3\right), \quad Z = \min\left(\tau_0 \cdot \left|\frac{dp}{dx}\right|^{-1}, \frac{b}{2}\right)$$
(2)



ここで、*u*:流速、*dp/dx*:圧力勾配、*b*:亀裂開口幅である。本検討では、上記の運動方程式をプログラムに組み込み、一定濃度以上のグラウト懸濁液に同式を適用することによりビンガム流体挙動をモデル化する。 ②目詰まり効果

セメント系材料によるグラウトでは、凝集したセメント粒子が岩盤亀裂や地盤孔隙中の流路を閉塞して 水・グラウト材の流動を抑制する「目詰まり現象」が発生する。本検討では、岩盤亀裂面の離散化において 各差分要素を微小な平行亀裂と仮定することにより開口幅分布をモデル化し、亀裂開口幅(下流側)、グラウ ト濃度(上流側)、圧力勾配から任意の目詰まり発生条件を定義し、発生条件が満たされた場合に要素間の移 流計算における液相相対浸透率を低下させる方法により、上記の目詰まり現象をモデル化する(図1)。

3. 理論解との比較検証

開発したモジュールの有効性検証を目的に、開口幅一定の1次元モデル(線状流)および2次元モデル(放 射状流)を用いた解析を実施し、目詰まりが発生しない条件下において、平行平板内のビンガム流体流動の

キーワード: 岩盤亀裂、グラウト、数値解析、ビンガム流体、目詰まり 連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL. 03-3820-5557 FAX. 03-3820-5959 理論解³⁾と比較を行なった。亀裂内のグラ ウト浸透距離の比較結果を図2に示す。図 より、1次元流(1D)、2次元流(2D)と もに解析結果は理論解と良好に一致してお り、開発モジュールの有効性が示された。

<u>4. モデル亀裂による試解析</u>

実際の岩盤亀裂と同様の開口幅分布を有 する平面亀裂モデルを仮想的に作成し、開 発モジュールを用いて試解析を実施した。

解析モデルの概念図を図3に示す。モデ

ル亀裂の開口幅は、頻度分布が対数正規分布に従うと仮定し、その統計 値と空間的相関モデル(バリオグラム)を設定した上で、やきなまし法 (Simulated Annealing)により開口幅分布のリアライゼーションを作成し

た。設定したヒストグラムと統計値を図4、開口幅分布を図5に示す。 解析結果の一例として、グラウト注入開始から3時間後の亀裂内のグ ラウト濃度分布を図6に示す。ここで、①はグラウト材料をニュートン 流体としてモデル化したケース、②はビンガム流体(τ₀=4*MPa*)とし てモデル化したケースで、③は②に目詰まりモデルを追加したケースで ある。本検討では、下流側の差分要素の開口幅が仮に 0.13mm(限界開 ロ幅b_{min})以下の場合に目詰まりが発生する条件とした。図6より、ビ ンガム流体モデルを適用した場合は、ニュートン流体モデルと比較して 亀裂内のグラウト浸透範囲が相対的に小さくなることが示された。また、 目詰まり現象を考慮したケースでは、亀裂内の開口幅が大きい領域をグ ラウト材料が選択的に流動する状況が再現されており、流動経路が限界 開口幅以上の領域の分布(図7)と整合することが示された。

5. まとめ

ビンガム流体挙動、グラウト粒子の目詰まり効果を組み込んだグラウ ト解析手法を開発し、理論解との比較とモデル亀裂による試解析により、 基本機能の検証を行なった。今後は複数亀裂のネットワークモデルを含 む、より現実的なモデルへの適用について検討を行なう予定である。

参考文献 1) Finsterle, S. et al.: LBL-36086, Lawrence Berkeley Natl. Lab., 1994 2) Hässler, L.: Grouting of rock—Simulation and classification, 1991 3) Gustafson, G. and H. Stille: Felsbau 23(3), 2005



ニュートン流体モデル ②ビンガム流体モデル ③ビンガム流体+目詰まりモデ 図 6 解析結果:注入開始から 3 時間後のグラウト濃度分布









図5 亀裂内の開口幅分布



図7 限界開口幅(0.13mm) 以上の領域分布(白色部)