



Geoscience Research Laboratory Co., Ltd. Technical Report

仮想ドレーンモデルによる3次元浸透流解析（1）

トンネル掘削時の湧水量予測や周辺の地下水環境への影響を評価するにあたっては、3次元浸透流解析を用います。ただし、分水嶺まで距離がある場合やトンネル延長が大きい場合などでは、解析領域が広がる一方で、トンネル周辺では細かい要素分割が求められます。また、複雑な地質モデルを対象として要素分割を行う場合や、地質モデルを更新して再度要素分割を行う際に、多くの労力と時間が必要です。この問題を解決するために、トンネルをモデル化せず仮想的にトンネル掘削を行う方法を考案しました。

仮想ドレーンからの湧水量の算定

広域の地質モデル作成後、分水界を境界として最小辺長 $5D$ (D : トンネル径) 程度のメッシュを作成します。要素の物性値は、地質モデルから反映します。トンネルの線形と交わる要素に対しては、下に示した式に基づき湧出する地下水量を求めて、要素内での損失量として処理します。この方法の利点は、次のとおりです。

- トンネルのメッシュを作成しないため、広域を対象とした解析でも要素数を抑制できます。また、要素サイズが大きいため、 Δt を大きくとることができ計算を高速に行うことができます。
- トンネル掘削の進行に対して、境界条件やメッシュを変えることなく計算を続けることができます。地質モデルを更新した場合でも、既存のメッシュへの物性の反映を変更するだけで解析ができます。
- トンネル外側に、改良工などにより透水性が低い領域が形成される場合にも対応できます。

■ 改良工が無い場合

$$Q = 2\pi Lk \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_1/r_0)} \quad (1)$$

Q : 単位時間あたりの流量 (m^3/s)

L : 要素内のトンネル長さ (m)

k : 地盤の透水係数 (m/s)

h_0 : トンネル中心の全水頭 (m)

h_1 : 要素境界の全水頭 (m)

r_0 : トンネル半径 (m)

r_1 : 要素の内接円の半径 (m) \equiv 要素の最小辺長/2

■ 改良工がある場合

$$Q = 2\pi Lk_c \frac{h_1 - h_0}{\ln(r^*/r_0)} \quad (2)$$

$$r^* = \left(\frac{r_1}{r_c}\right)^{k_c} r_c$$

k_c : 改良域の透水係数 (m/s)

r_c : 改良域までの半径 (m)

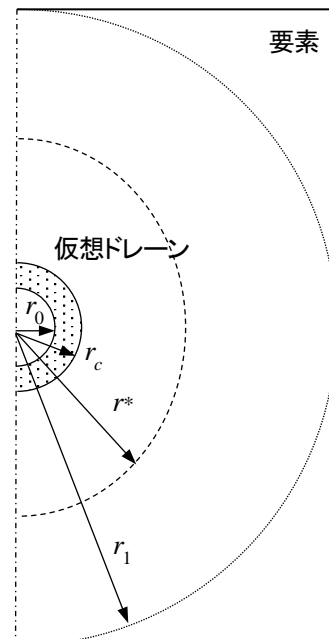
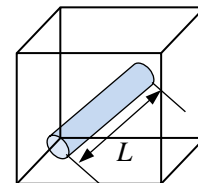


図-1 仮想ドレーンモデルの概念

仮想ドレーンモデルの定式化

まず、トンネル直径よりも大きな辺長を持つ要素中にトンネルが掘削されるものとし、トンネルが掘削された場合の単位時間あたりの湧水量 Q を、トンネル軸を中心とする円筒座標系における定常解より求めることとします。具体的には、地下水の流速 u が、地盤の透水係数を k 、全水頭を h として、式(3)のダルシー則にしたがうものとししました。

$$u = -k \frac{dh}{dr} \quad (3)$$

トンネル壁面 ($r=r_0$) と壁面から離れた場所 ($r=r_1$) で、全水頭がそれぞれ h_0 と h_1 に保たれた場合の Q を、要素を横切るトンネルセグメント長さを L として次のように求めました。

$$Q = -2\pi Lk \frac{dh}{dr} \quad (4)$$

$$\int_{h_0}^{h_1} dh = -\frac{Q}{2\pi Lk} \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} \quad (5)$$

$$h_1 - h_0 = -\frac{Q}{2\pi Lk} (\ln r_1 - \ln r_0) \quad (6)$$

$$Q = -2\pi Lk \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_1/r_0)} \quad (7)$$

式(7)より求まる湧水量 Q を要素内で生じた吸込み量とし、この吸込みが微小時間継続した際の水頭変化を有限要素解析により求め、要素構成節点における新たな水頭値を求めます。この値とトンネルの掘進長をもとに湧水量 Q の値を更新し、以下この作業を繰り返して水頭分布の変化を求めました。

計算には Q の節点値 Q_i が必要ですが、これは式(8)と式(9)に示すように、トンネルセグメント距離 L の中心から各節点までの距離を l_i として、式(10)のように距離で重み付けをして割り振りました (図-2 参照)。

$$w_i = \frac{1/l_i}{\sum_{j=1}^m (1/l_j)} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (9)$$

$$Q_i = w_i Q \quad (10)$$

ここに、 m は要素構成節点数です。

また、トンネル壁面の全水頭 h_0 には、ここでの圧力水頭を 0 とするため、基準面からのトンネル壁面の平均高さを用いました。 h_1 には、要素構成節点における全水頭を式(8)の重み付けを考慮して、式(9)に示す平均値を用いました。また、 r_1 には式(12)に示す要素と同じ体積を持つ球の半径を用いました。

$$h_1 = \sum_{i=1}^m w_i h_i \quad (11)$$

$$r_1 = V_e^{1/3} / 2 \quad (12)$$

ここに、 V_e は要素体積です。

なお、時間差分には後退差分を適用することとし、このときの Q は式(13)のように求めました。

$$Q = -\frac{2\pi Lk}{\ln(r_1/r_0)} (h_1^{n+1} - h_0) \quad (13)$$

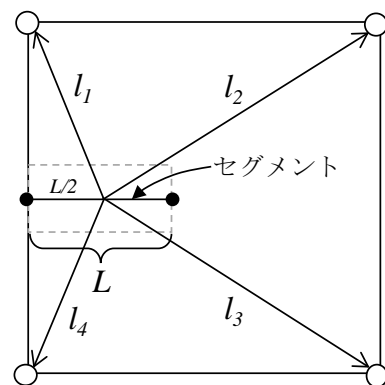


図-2 要素中のトンネルの扱い

<http://www.geolab.jp> お問い合わせは chisouken@geolab.jp