

トンネル掘削に伴う塑性領域と地山の安定性について

大成建設 ○文村 賢一 鳥取大学 木山 英郎
鳥取大学 藤村 尚 鳥取大学 西村 強

1. はじめに

NATM (New Austrian Tunneling Method) は, Fenner-Pacher 型の支保特性曲線を基礎概念としており, 地山の支保能力を十分に活用する工法として広く世界で採用されている。しかしながら, 基本となる地山支保力や地山特性曲線を定量的に評価する方法が確立していないために, 支保工は実績に基づく標準パターンを中心として, 施工者の経験と勘に頼らざるを得ない状況にある。本論文では, 地山特性曲線の構築を念頭に置きながら, 数値解析の手法としてひずみ軟化型弾塑性構成式を導入した流動要素法(FLow Element Method)を用いて, トンネルの掘削に伴う塑性領域と地山の安定性についてまとめたものである。

2. 流動要素法の概要

FLEM は, 時刻 t での運動方程式を時間増分 Δt について差分近似し, 未知数を陽な形で近似する逐次解放を用いている。

$$\{M\}\{\dot{u}\} = \{R\} - \{F\} - \{c\}\{\dot{u}\} \quad (1)$$

ここに, $\{R\}$: 時刻 t の外力ベクトル, $\{F\}$: 時刻 t の内部等価節点力ベクトル, $\{M\}$: 質量マトリックス, $\{\dot{u}\}$: 時刻 t の加速度ベクトル, $\{c\}$: 減衰マトリックス, $\{\dot{u}\}$: 時刻 t の速度ベクトル

内部の等価節点力 $\{F\}$ は, 以下に示す式から求められる。まず, 増分ひずみ $\{\Delta\varepsilon\}$ は, 変位・ひずみマトリックス $[B]$ と増分変位ベクトル $\{\Delta u\} = \{u\} - \{u\}$ から次のようになる。

$$\{\Delta\varepsilon\} = [B]\{\Delta u\} \quad (2)$$

本研究では, Drucker-Prager 型降伏条件 $f(\sigma) = I_1/3 + J_2^{1/2}(\cos\theta - \sin\theta \sin\phi/\sqrt{3})$, I_1 : 応力の第一不変量, J_2 : 偏差応力の第二不変量と関連流動則により, 増分型の構成式を導入している。塑性状態に達したとき, 応力状態が降伏条件を満足するように修正を施している。節点力および応力は次のように更新する。

$$\{F\} = \{F\} + \int_v [B]\{\Delta\sigma\}d(vol) \quad (3) \quad \{\sigma\} = \{\sigma\} + \{\Delta\sigma\} \quad (4)$$

式(1)より, 時刻 t における加速度ベクトルが求めれば, これを時間増分 Δt について積分し, 変位増分ベクトル $\{\Delta u\}$ と速度ベクトル $\{\dot{u}\}$ を求め, (1)~(4)により, 節点力および応力が更新される。この過程を繰り返せば, 与えられた条件のもとでの変形が表現される。

3. トンネル掘削解析への適用

2で述べた解析方法によって, トンネル掘削に伴う塑性領域と地山の安定性について解析を行った。図-1に解析モデルを示す。図-1は一辺30mの解析領域に半径 $R_0=5m$ のトンネル掘削領域を設定したものである。地山の材料定数として, ヤング率 $E=15000(tf/m^2)$, ポアソン比 $\nu=0.3$, 密度 $\rho=2.10(t/m^3)$, 粘着力 $c=50(tf/m^2)$, 内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ を与える。また, 地山の初期応力状態は一軸圧縮強度 ($q_u=2c \cdot \cos\phi/(1-\sin\phi)$) と初期地圧 (P_0) の比で表される地山強度比 (q_u/P_0) が $q_u/P_0=1.0\sim 3.0$ の範囲内で解析を行う。

トンネルの掘削過程は, 所定の初期応力のもとで掘削部要素のヤング率 E^* (当初は $E = E^*$) を nE^* ($0 < n < 1$) に低下させ, それと同時に応力も解放することでモデル化した。以後 E^* を一定に保持したまま, 掘削部要素の応力を解放しては静的安定を求めることを繰り返して, 塑性領域の進展と安定性について検討する。周辺地山の応力-変位を示す代表変位を次式で与える。この時, クラウン ($\theta=0^\circ$) と側壁中央 ($\theta=\pi/2$) に位置する掘削要素内応力の半

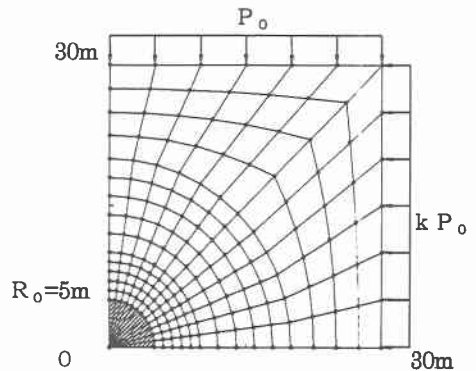


図-1 トンネル要素分割

径方向成分 σ_r と掘削断面上的の節点変位 Δu_r を出力し、次式のように代表値とする

$$\sigma_r^* = (\sigma_{r,\theta=0^\circ} + \sigma_{r,\theta=\pi/2})/2 \quad \Delta u_r^* = (u_{r,\theta=0^\circ} + u_{r,\theta=\pi/2})/2 \quad (5)$$

4. 解析結果および考察

図-2は、解析の一例として側圧係数 $k=1$ における $\sigma_r^*/P_0 - \Delta u_r^*/R_0$ 関係を q_u/P_0 の変化とともにまとめたものである。この図より q_u/P_0 が小さくなる、すなわち一軸圧縮強度の低下とともに内径収縮量が增大していく様子がわかる。しかしながら今回の解析では、 σ_r^*/P_0 が極小値を示した後、増大するようなことを再現するには至らなかった。図-3は $q_u/P_0=1.0$ の解析において塑性領域を図-4は図-3に対応してひずみエネルギー ($1/2\sigma_{ij}\epsilon_{ij}$) の増加領域を示したものである。これらの図より塑性化(軟化)によって負担しきれなくなった掘削解放力は、塑性領域の外側の領域で吸収されている様子がわかる。

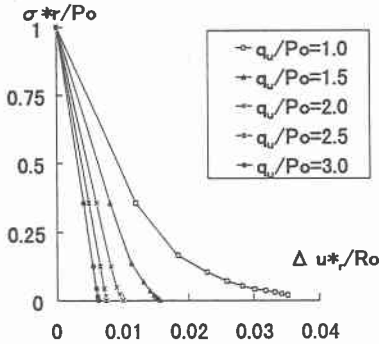


図-2 $\sigma_r^*/P_0 - \Delta u_r^*/R_0$ 関係

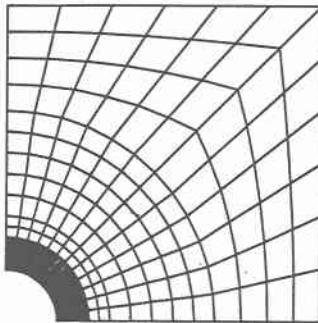


図-3 塑性領域図

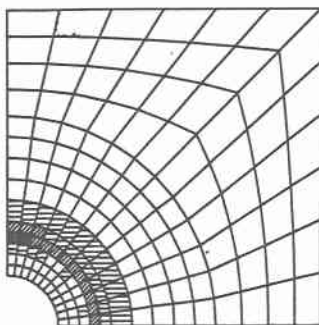


図-4 ひずみエネルギー増加領域

そこで、図-5に示すように、領域を $r < 2R_0$ に限定した円環モデルの解析を実施した。外境界上には、一様な半径方向応力 $\sigma_r = P_0$ が作用しており、陰影部に示す掘削部のモデル化等に関する条件は、図-1と同様である。このモデルでは、 $R_0 < r < 2R_0$ で負担しきれなくなった掘削解放力はトンネル部で負担せざるを得ないため、図-6で示すように σ_r^* は極小値を示したのちに増大することになる。

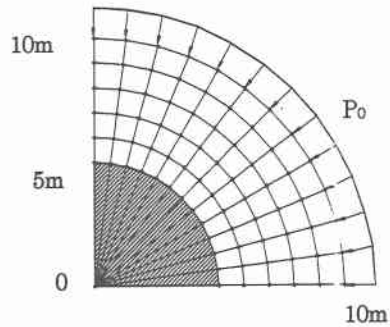


図-5 円環モデル

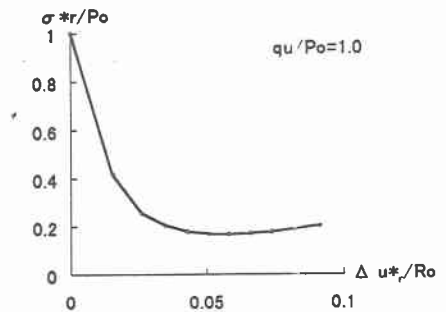


図-6 $\sigma_r^*/P_0 - \Delta u_r^*/R_0$ 関係 (円環モデル)

参考文献：塑性・粘塑性；培風館，pp76～pp104，
山田 嘉昭 著