

III-340

流動要素法(FLEM)によるトンネル支保特性曲線の解析

ニュージェック ○脇本 公朋 鳥取大学工学部 木山 英郎
鳥取大学工学部 藤村 尚 鳥取大学工学部 西村 強

1. はじめに

地山支保力を定量的に評価するために、これまでに弾性理論を用いて特性曲線を構成する方法について報告した。これらの過程を非線形な特性を有する地盤へ発展させるべく、流動要素法によるトンネル周辺地盤の応力・変形解析を実施した。要素を線形弾性体としたとき、およびモール・クーロンの破壊規準を適用した計算を実施しており、特に、後者では、トンネル掘削に伴う塑性域進展の様子、トンネル支保特性曲線の再現を試みている。

2. 掘削のモデル化と掘削解放力の算定

図-1において、表面には外力は作用していないものとし、掘削領域 V と掘削解放面 S を考え、仮想仕事の原理を適用すると、 S 上での応力ベクトル $\mathbf{t}_0$ は掘削領域中の応力 σ_0 と物体力 $\mathbf{g}=[0, -\rho g]^T$ により、

$$\int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t}_0 ds = \int_V (\delta \boldsymbol{\epsilon}^T \sigma_0 - \delta \mathbf{u}^T \mathbf{g}) dv$$

掘削段階において、掘削領域の密度が $(1-\Delta)\rho$ に、応力が $(1/n)\sigma_0$ に減少したとすると、掘削解放力 f_v は

$$\begin{aligned} \int_S \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f}_v ds &= \int_V (\Delta \cdot \delta \mathbf{u}^T \mathbf{g} - \delta \boldsymbol{\epsilon}^T \sigma_0 \cdot (1-1/n)) dv \\ \mathbf{F}_v &= \int_V [\Delta \cdot \mathbf{N}^T \mathbf{g} - \mathbf{B}^T \sigma_0 \cdot (1-1/n)] dv \end{aligned} \quad (1)$$

と決定することができる。

トンネル掘削の進行および吹き付けコンクリート等による支保剛性の変化を表すのに、すでに報告しているDEM解析と同様に、トンネル部分要素の剛性の低減率(n)と自重の低減率(Δ)でモデル化している。解析手順はSTEP 0~7の8段階を標準にしており、STEP0は与えられた鉛直応力と水平応力の作用下で各要素を静止に至らしめ、これを掘削前の初期応力状態とする。続くSTEP 1~7は掘削過程を表し、一定の鉛直・水平応力下で、ト

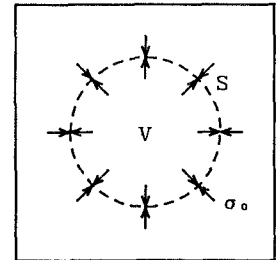
ンネル要素のヤング係数を前STEPの1/2ずつ7段階に減少させ、それに対応してトンネル要素の応力を1/2ずつ解放してゆく。このとき、生ずる掘削解放力は式(1)により求めることができる。計算はそれぞれの段階で完全な静止状態を求めて、そのときの状態を継いで、次段階を進める方法を採用した。掘削進行を表すSTEP 0~STEP 7までに採用した Δ と n の値を表4-2に示す。

3. 解析モデルと結果

ここでは、一例として図-2のような解析モデルについて示す。トンネルの半径は2mであり、自重を考慮せず、1/4断面を解析領域とした。解析領域は縦・横12mとして、節点数(質点数)66、要素数55よりなる。なお、解析に用いた要素は積分数2×2の平面ひずみ四辺形要素である。解析に用いた要素定数を表-1に示す。

弾性解析と降伏条件としてモール・クーロンの降伏規準を用いた解析を実施した。降伏した要素は、 $\nu=0.49$ として体積弾性率 $[E/((1-2\nu)(1+\nu))]$ が降伏前と同一となるようにそれ以降のひずみ増分に対するヤング係数 E' を求めた。本例では $E'=E/20000$ 程度となっており、降伏した要素の新たな荷重増分に対する負担能力はほとんどない。

水平応力 $p_x=-25.0 \times \rho$ tf/m²、鉛直応力 $p_y=-25.0 \times \rho$ tf/m²の条件下における掘削最終段階での変形図を



(a) 初期状態

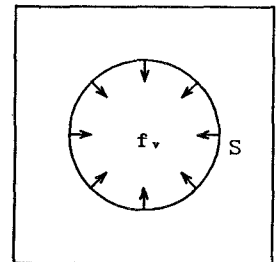
(b) 掘削解放力 f_v

図-1 掘削解放力

表-1 解析定数

ヤング率	$E=1000\text{tf/m}^3$
密度	$\rho=2.65\text{t/m}^3$
ポアソン比	$\nu=0.3$
粘着力	$c=1\text{tf/m}^3$
内部摩擦角	$\phi=30^\circ$
時間増分	$\Delta t=1.0 \times 10^{-3}$

表-2 掘削STEPと Δ , n の設定

	$\Delta(\rho)$	$n(E)$
STEP 0	0.0	0
STEP 1	0.1	1/2
STEP 2	0.2	1/4
STEP 3	0.3	1/8
STEP 4	0.4	1/16
STEP 5	0.5	1/32
STEP 6	0.6	1/64
STEP 7	0.7	1/128

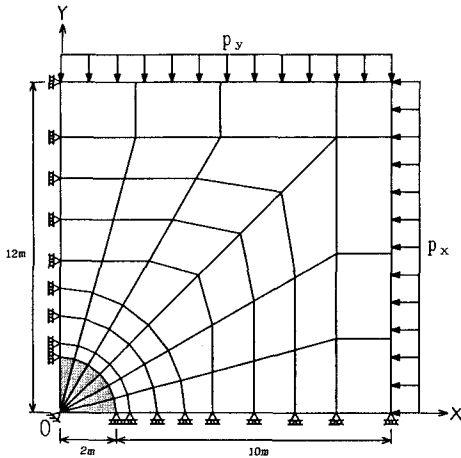


図-2 解析モデル

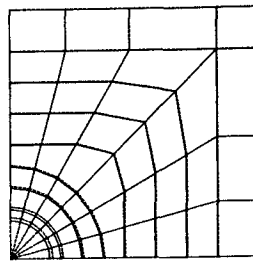
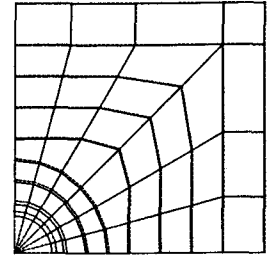
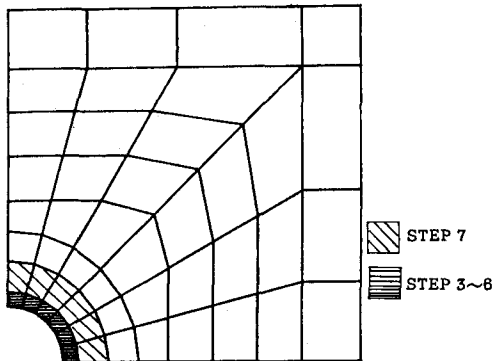
図-3 変形図
(降伏条件無)図-4 変形図
(降伏条件有)

図-5 破壊要素

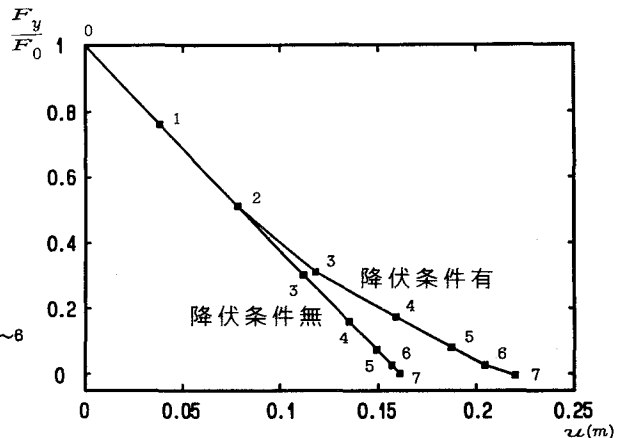
図-6 $F_y/F_0 - u$ 関係

図-3, 4に示す。図-3では降伏条件を考慮しておらず、図-4では上述のような降伏条件を考慮している。なお、破線は初期応力状態の要素を示しており、変位のスケールは実寸である。降伏条件を考慮したときの掘削に伴う破壊領域の状況を図-5に示す。また、天盤部分の節点に着目し、天盤部分の要素からこの節点への等価節点力を算出し、このうち、鉛直方向の等価節点力を支保力とみなし、内空変位との関係を示したものが図-6である。なお、縦軸は鉛直方向の等価節点力 F_y を初期応力状態の時の等価節点力 F_0 で相対化し、横軸には掘削開始からの内空変位 u をとっている。現段階では、支保圧の極小値とその後の増大いわゆるFenner-Pacher型の曲線は再現されていないが、降伏条件の取り扱い方も含め、考察を進めていく予定である。