

節理性岩盤のDEM解析

京都大学工学部 正 員 晶 昭治郎
 京都大学工学部 正 員 谷本 親伯
 京都大学工学部 学生員 ○森木 亮
 京都大学工学部 学生員 稲田 徹

1. 緒言

岩盤の力学的挙動は主に節理・弱層・断層等の力学的不連続面に支配される。特に地表から200~300m以浅の岩盤についてはこの傾向が顕著である。そのような岩盤中に建設される地下構造物の設計には、不連続面を取り扱った安定解析法が望ましい。

本報では、節理の卓越した岩盤中のトンネル掘削を、Cundall(1974)[1]が提案した個別剛体要素法(DEM)に基づいて数値解析する方法およびその方法を用いて基礎的なモデルを解析した結果を示す。

この方法の問題点は、現段階では比較的単純なモデルを用いても計算量が多くなることである。また、要素数が増えると変位増分の収束が遅れる傾向がある。今後、接触判定法と差分解析法を改良し計算量を低減することが必要である。

2. 数値解析の方法

(1) 系の安定の判断: 安定解析を目的とするので、最終的に系が安定したことを確認しなければならない。もし破壊が生じても、系は過渡状態を経て新たな安定状態に至ると考える。本研究ではDEMの差分解析における変位増分がある基準値以下になれば系が安定したとみなす。

(2) DEMモデルの形状: トンネル断面を馬蹄形のトンネル要素で表現し、周囲の節理性岩盤を格子状に積んだ正方形要素と若干個の異形要素で表現する。トンネル要素は隣接の要素にオーバーラップしてある。これはトンネル要素と隣接の要素の接触状態を一定にし、系にトンネル要素と異形要素からの攪乱を与えないようにするためである。

(3) 境界条件: 下方境界は剛で固定されている。側方境界は剛で、拘束条件については後述する。トンネル要素も一種の境界であり、その辺や円弧部分は他の要素の頂点の接触を受けるが、その頂点や円弧部分は他の要素の辺には接触しない。上方には境界はなく、上載荷重 P_{0e} は最上列の要素の密度を荷重に相当する分増すことにより与える。

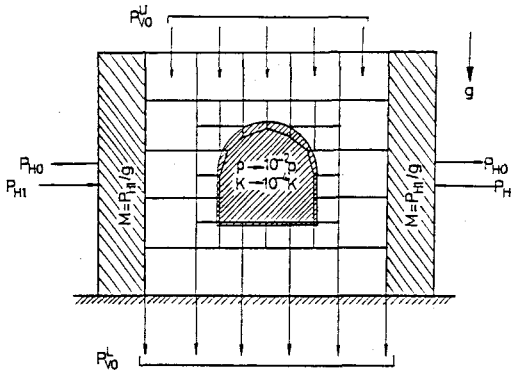


図1 トンネルのDEMモデル

表1 トンネル要素の密度と剛性の低減

Δ : 密度低減率
 n : 剛性低減率
 $K_{s,t}$: 通常要素とトンネル要素の接触の剛性定数
 $K_{s,s}$: 通常要素同士の接触の剛性定数
 $K_{s,t}/K_{s,s} = 2(1-n)/(2-n)$
 $\eta_{s,t}$: 通常要素とトンネル要素の接触の減衰定数
 $\eta_{s,s}$: 通常要素同士の接触の減衰定数
 $\eta_{s,t}/\eta_{s,s} = \sqrt{((2(1-\Delta)/(2-\Delta)) \cdot (2(1-n)/(2-n)))}$

ステップ	Δ	n	$K_{s,t}/K_{s,s}$	$\eta_{s,t}/\eta_{s,s}$
00	0	0	1	1
0	0	0	1	1
1	0.2	0.5	6.667×10^{-1}	7.698×10^{-1}
2	0.4	0.9	1.818×10^{-1}	3.693×10^{-1}
3	0.6	0.99	1.980×10^{-2}	1.064×10^{-1}
4	0.8	0.999	1.998×10^{-3}	2.581×10^{-2}
5	0.99	0.9999	2.000×10^{-4}	1.990×10^{-3}

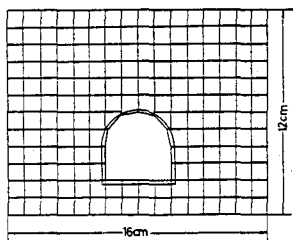


図2 モデル形状

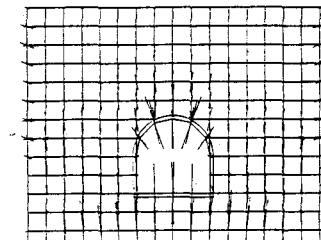


図3 ステップ0の接触力

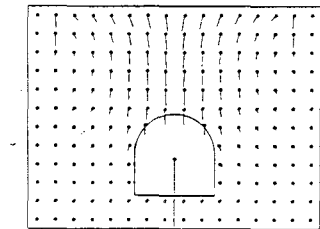


図5 重心変位図

変位は500倍に拡大

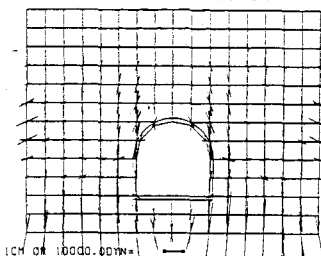


図4 ステップ5の接触力

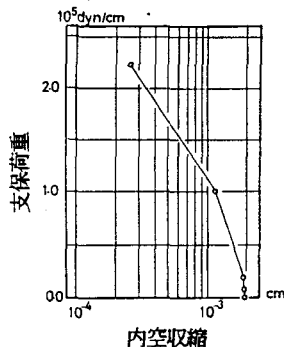


図6 内空収縮-支保荷重図

(4) 解析手順

Sステップ00: 側方境界を固定して安定状態を計算する。このとき側方境界が受ける接触力の総和を P_{H0} 、下方境界が受ける接触力の総和を P_{V0}^L とし、次の K_0 を静止側圧係数と呼ぶ。

$$K_0 = P_{H0} / ((P_{V0}^U + P_{V0}^L) / 2)$$

Sステップ0: 側方境界を仮想的要素とみなす。この要素の運動は水平方向の並進運動のみに拘束する。さらに拘束力 P_{H1} と次の式で示される仮想質量 M を与える。

$$M = P_{H1} / g, \quad g \text{ は重力加速度}$$

次の K_1 を側圧係数と呼ぶ。

$$K_1 = P_{H1} / ((P_{V0}^U + P_{V0}^L) / 2)$$

K_1 は解析上は K_0 と独立に設定できるが、実際の岩盤では次のような範囲にあるものとする。

$$K_A < K_0 < K_1 < K_P, \quad K_A, K_P \text{ はある正の数}$$

このステップが初期状態を表す。

Sステップ1~5: トンネル要素の密度と剛性を段階的に低減することによって掘削を表現する。

低減の過程は表1に示す。

3. 解析例

解析例を1例示す。荷重条件は次の通りである。

$$P_{V0}^U = 0, \quad K_0 = 0.152, \quad K_1 = 0.200$$

解析モデルの形状図を図2に、モデルのパラメータを表2に、要素変位及び接触力ベクトル図を図3、4に、重心変位図を図5に、内空収縮-支保荷重図を図6に示す。ここで内空収縮とは天端と底盤の要素の重心の相対変位であり、支保荷重はトンネル要素が受ける接触力のうち、法線方向の弾性力の総和である。

参考文献

- [1] Cundall, P. A. (1974): "RATIONAL DESIGN OF TUNNEL SUPPORTS", Catalog No. AD/A-001 602, NTIS
- [2] 木山英郎・藤村尚・西村強(1987): "DEM解析によるFenner-Pacher曲線の再現とその解釈", 第7回岩の力学シンポジウム講演論文集, pp. 397-402

表2 モデルのパラメータ

K_{ns} : 通常要素同士の接触の法線方向剛性定数 ($\text{dyn} \cdot \text{cm}^{-1} / \text{cm}$)
 η_{ns} : 通常要素同士の接触の法線方向減衰定数 ($\text{dyn} \cdot \text{cm}^{-1} / \text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$)
 s : せん断方向剛性定数の減減率 (K_s / K_n)
 せん断方向減衰定数の減減率は $\sqrt{s}$
 μ : 摩擦係数
 ρ : 要素の密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
 g : 重力加速度 ($\text{cm} \cdot \text{sec}^{-2}$)
 Δt : 時間増分 (sec)

s	0.25
μ	0.577
ρ	2.65
g	980.0

K_{ns}	η_{ns}	Δt
4.0×10^7	2.184×10^4	1.0×10^{-6}