

III-242 円形トンネルの掘削と支保のDEM解析

欄三井建設 正員○石田元美

鳥取大学工学部 正員 木山英郎 正員 藤村 尚

正員 西村 強 正員 池添保雄

1. まえがき

離散剛要素法（DEM）を用いて、地下浅所のトンネル掘削に伴う地表沈下やアーチ作用を検討した結果は既に報告した。本報では、地下深所のトンネル掘削を考え、適当な比率の鉛直応力と水平応力の作用のもとで、掘削部の重量と支保剛性の減少過程をDEM解析した結果について報告する。

2. 解析の概要

解析モデルの一例を図-1に示す。地盤要素はこれまでの解析と同様、特異現象の少ない円形要素（直径1cm）を用いる。要素定数等は表-1に示す。鉛直応力は、土被り圧に相当する応力を最上段の要素の自重として与え、変形の自由度を高める。水平応力は、鉛直応力に対する比率（側圧係数と呼ぶ）で設定し、その合力を側方剛板（AB, CD）に水平方向自重として作用させる。側方剛板は水平方向可動であって、掘削の進行中もたえず一定の水平合力を接触要素に伝達する。底剛板（BC）のみが不動である。中央の大きな円形要素（直径3cm）がトンネル掘削部であって、初期状態の要素剛性は他の地盤要素のそれと等しく K_0 にとり、重量はその部分の地盤要素の欠落分（4あるいは7要素分）を与えている。

解析手順は、Step 00：一定配列の地盤要素（配列：17/18, 13/14, 11/12の3種類）を、側方剛板を固定した状態で、鉛直応力（土被り／直径比 ≈ 20 ）の作用下で静止させる。Step 0：引続き設定した水平応力（側圧係数：0.5, 0.8, 1, 2, 4の5種類）を作用させて静止状態を得る。これが掘削前の初期応力状態となる。Step 1～Step 5：この鉛直・水平応力下で、掘削部要素の自重を20%刻み5段階で ≈ 0 （掘削完了）まで減少させ、それと同時に掘削部要素の剛性も $0.5K_0, 0.1K_0, 0.01K_0, 0.001K_0, 0.0001K_0$ と指数関数的に減少させて、それぞれの静止状態を求める。このとき、掘削部要素と隣接する地盤要素との間の法線方向接触力（支保圧相当）と接触変位量の関係を模式的に示せば、図-2のようになり、Step 1, 2, 3, …に応じて、 $0 \rightarrow b \rightarrow c_0 \rightarrow c \rightarrow d_0 \rightarrow d \rightarrow \dots$ の経路で解析することになる。その結果、Step 0, 1, 2, 3, …の

静止状態を結ぶ線 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow \dots$ はFenner-Pacher曲線を与えることになる。

3. 解析結果

（1）初期応力状態（Step 0）において、円形要素モデルの特性として、要素配列（あるいは粒子間接触角）によって、水平／鉛直応力比（側圧係数）の再現範囲が厳しく制限される。いいかえると、円形要素モデルの配列は地盤の初期応

表-1

Particle	
radius R	0.5 cm
density ρ	2.65 gf/cm ³
Young's modulus E	750 kgf/cm ² (7.35×10^4 kPa)
Poisson's ratio ν	0.3
time step Δt	1.0×10^{-4} s
particle to particle	
$K_n/\rho g$ (cm)	3.84×10^4
$\eta_n/\rho g$ (cm/s)	1.11×10
$K_s/\rho g$ (cm)	0.96×10^4
$\eta_s/\rho g$ (cm/s)	0.55×10
μ	0.577

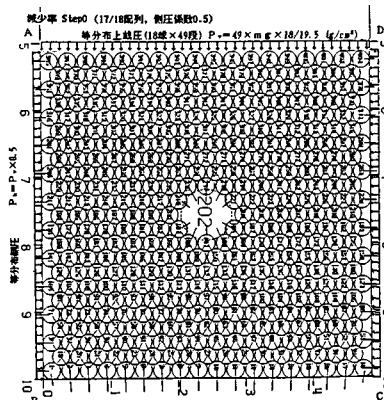


図-1 掘削-支保のDEMモデル

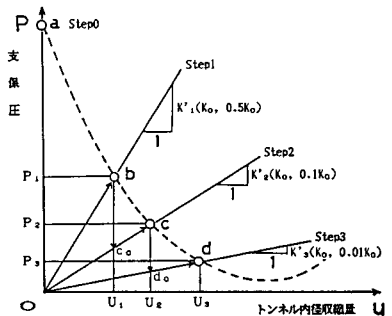


図-2 支保圧とトンネル内径収縮量

力状態の差を表現する因子であることを示す（図-3）。

（2）掘削進行時の解析例として、Step 4（ $0.2\rho_0, 0.001k_0$ ）の場合を図-4に示す。側圧係数によって多少様子が異なるが、いずれも当初の1/1000といった極めて小さい支保剛性の存在によってトンネルが保持されていることがわかる。

（3）図-5は地盤変位の一例として、上記Step 4の状態から掘削完了のStep 5にいたる間の各粒子の変位ベクトルを示す。トンネルの両肩部へ向うすべり面の生成が特徴的である。

（4）3種類の側圧係数に対するトンネルクラウンの変位-支保圧曲線を図-6に示す。素掘りトンネルの弾性変位に比べて、10倍（Step 3）～100倍（Step 4）の大変位で平衡を保つことが解かる。なお、Fenner-Pacher曲線という極小値の存在は明瞭でない。

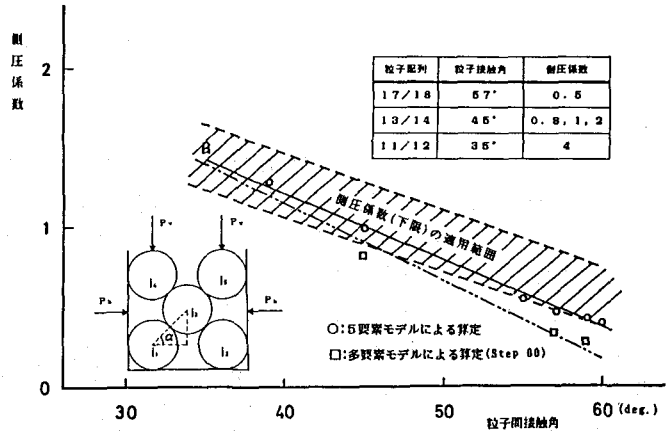


図-3 粒子間接触角と側圧係数の関係

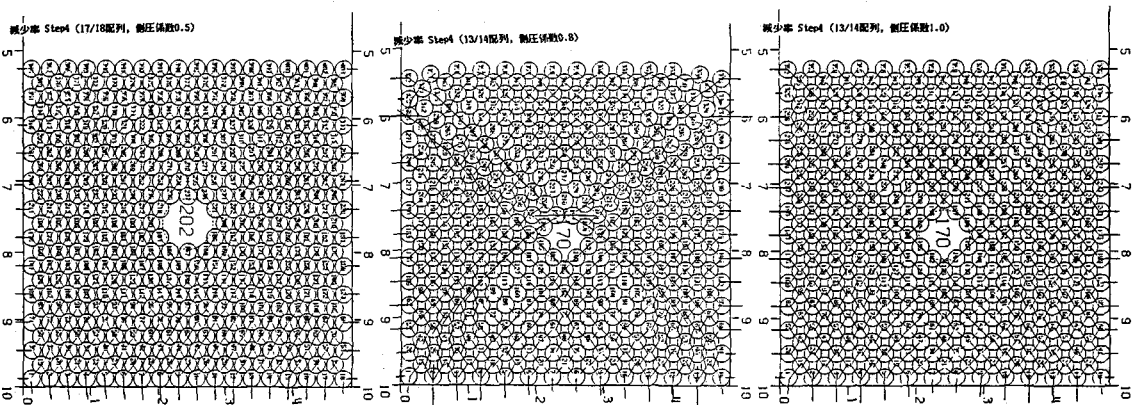


図-4 DEM解析結果(Step 4)

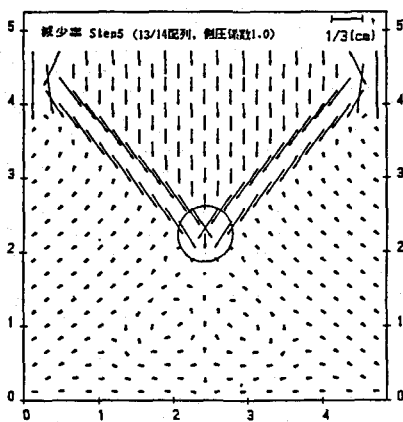


図-5 変位ベクトル図(Step 5)

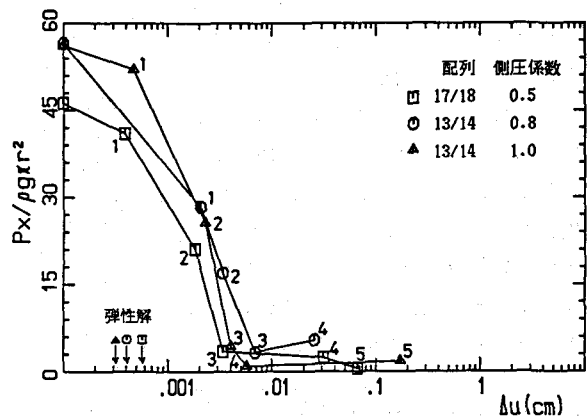


図-6 トンネルクラウンの変位と支保圧