

関西大学大学院 学生員 ○清水俊友

関西大学工学部 フェロー 楠見晴重

1. 研究の背景と目的

近年、産業や人口の集中化が進む都市部において地下空間は貴重な空間資源として注目されており、都市部における浅層トンネルの施工は増加の傾向にある。しかし、これら砂質土地山を対象とした都市 NATM 工法採用時の地山挙動は複雑であり、特に周辺地山の土圧変化に関しては把握されていないのが現状である。そこで本研究では、不連続体解析に有用性の高い個別要素法を用いて浅層トンネルの掘削解析を行い、その地山挙動に関して変形、応力の観点から考察を行った。

2. 個別要素法

個別要素法は P.A. Cundall¹⁾ によって提案されたシミュレーション手法であり、解析対象を円形要素からなる粒子の集合体でモデル化する。図-1 は2つの粒子の接触状況の模式図を示したものである。個々の粒子間には垂直、及びせん断方向のばねを設置し、粒子同士の重なり合いによって反発力が発生する。この反発力を式(1)に示す運動方程式に作用力として代入し、時間領域で差分化し、前進的に解くことにより、粒子の加速度、速度、変位を求めることができる。

$$m\ddot{u} + C\dot{u} + F = 0 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 m : 粒子の質量 F : 粒子に作用する力

C : 減衰定数 u : 粒子の変位ベクトル

3. 解析手法

3.1 モデルの作成

解析対象としてトンネル切羽、及びその周辺地山を想定し、重力場における粒子の自然落下によってパッキングを行い初期モデルを作成した。トンネルを形成する粒子の変位は拘束し、パッキングの段階では変形を生じない。初期モデルを切り取ることで任意の土被りのモデルを作成する。トンネル径は 10m と仮定する。粒子の粒径はランダムであり、0.29m~0.38m の範囲で均等に分布する。

図-2 に初期モデルの概要を示す。

3.2 解析の流れ

本解析では、切羽を保持している壁要素の除去と、その後の切羽前方粒子の消去によって掘削を表現し、それに伴うトンネル、及び周辺地山の挙動を三次元的に可視化することを目的とする。図-3 は今回解析を行った土被り $H=0.5D$ の解析モデルの初期状態について断面図を示したものである。切羽前方の青色の部分は掘削ステップに消去される粒子であり、色ごとに3段階の掘削が可能である。今回は2段階までの掘削を行い、ステップの経過に伴う変形、応力挙動について検討を行う。

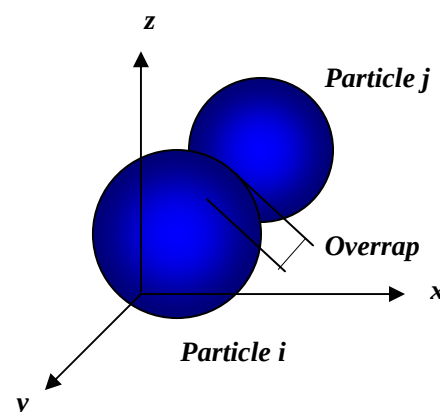


図-1 微視的な粒子の接触概要

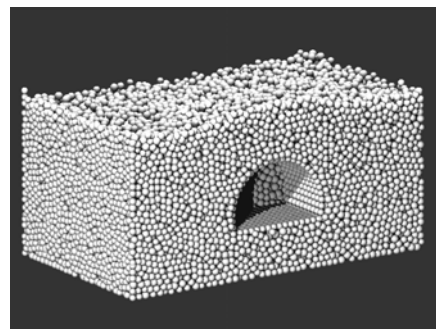


図-2 初期モデル概要

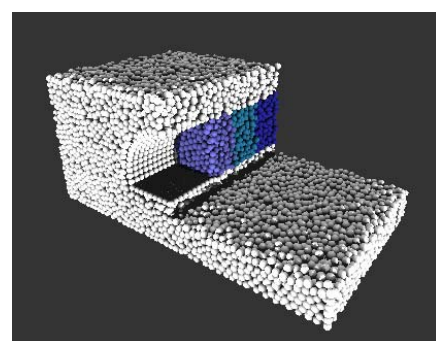


図-3 掘削解析モデル ($H=0.5D$)

4. 解析結果

4.1 地山内変形挙動

図-4 は掘削進行に伴う地山内変位分布を可視化したものである。カラーバーに示すように、大きな変位が生じている箇所ほど粒子の色が赤く示される。一段目の掘削によって天端付近に緩みが発生し、さらに掘削を進めることによってその直上の地山が崩落した。地山内には色の異なる境界が認められ、この面に沿って滑りが生じているものと考えられる。滑り面は掘削地点を中心に逆円錐状に広がり、その色から3層の領域に分けることができる。すなわち赤色で示される領域と、その外側で滑っている緑と水色の領域である。ここで大きな滑りを生じているのは赤と緑の境界部分であるが、この滑り面はトンネルの崩落とともに粒子が引きずり込まれることによって形成されるため、陥没領域の一部と考えられる。これに対し、緑と水色の領域はトンネルの掘削と同時に形成され、その後、時間の経過とともに拡大する様子が認められることから、トンネル部分の開放に伴って側壁部から発達する滑り面と考えられる。

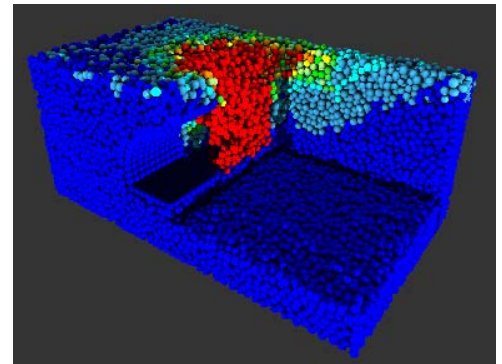
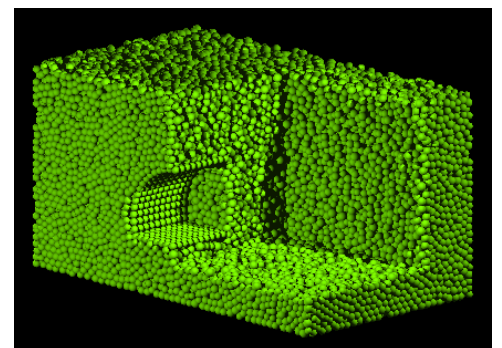
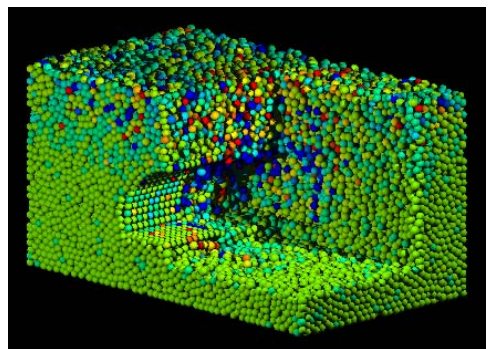


図-4 地山内変位分布 (H=0.5D)



(a) 初期状態



(b) 50,000step 経過

×1/4 初期状態 ×4.0

図-5 圧縮応力分布

4.2 圧縮応力分布

図-5 は掘削に伴う周辺地山の応力分布を可視化したものである。カラーバーに示すように、初期の応力状態を基準とし、圧縮応力の増加、減少によって粒子の色が変化する。図-5(a)は掘削開始前の初期状態、図-5(b)は二段目の掘削の後、大規模な崩落が発生する前の応力状態を示している。掘削に伴いトンネル周辺では初期の圧縮応力が開放され、そのため応力の低下領域が分布している。これに対し、天端上方の地山内部には圧縮応力の増加領域の発生が認められる。これは掘削による変形によってトンネル上方の地山が一時的に密な状態になることで起こった現象と考えられる。この圧縮領域において地山の崩落は一時的に抑えられるが、トンネル内部への粒子の流入に伴い緩み領域が拡大し崩落に至る。ここで砂質土を対象とした浅層トンネルの掘削では、トンネルの変形を適度に留め、地山の緩み領域の拡大を抑えることが重要な要素である。本解析における結果から、地山の緩みによる大変形を抑制し、掘削によって形成される初期の応力状態を保つことでトンネルの安定性が向上することが予測される。

5. まとめ

個別要素法を用いた数値解析により、砂質土地山におけるトンネル掘削時の変形、及び応力挙動を3次元的に可視化することができた。本解析で用いた地山モデルは粒子の集合体によって構成された単純なものであり、現段階では複雑な条件等を考慮することはできないが、本手法によって掘削に伴う滑り面の発達や応力状態の変化等を定性的に評価することは可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Cundall, P.A : A computer model for simulation progressive, Large scale movement in blocky rocksysytem, Symp.ISRM Nancy France Proc, Vol,pp129_136, 1991