

個別要素法による浅層トンネル掘削時の 変形挙動解析

大野 善考^{1*}・楠見 晴重²

¹関西大学大学院 工学研究科ソーシャルデザイン専攻 (〒565-0841 吹田市上山手町2-7)

²関西大学 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町三丁目3-35)

* E-mail: ua6m522@edu.kansai-u.ac.jp

日本の都市部に広く分布している沖積層、洪積層からなる砂質土地山を対象とした都市部山岳工法において、掘削時の地山内挙動は複雑であり、明確に把握されていないのが現状である。そこで、砂質土地山掘削時に現れる大変形挙動や滑り挙動を再現する上で有用性の高い個別要素法を用い、浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を行った。まず、単設トンネル掘削シミュレーションを行い土被りの違いによる地山挙動の変化について変位分布、応力分布などから検討を行った。また双設トンネルをモデル化し、双設トンネル掘削によるトンネル間の離隔距離が地山挙動に及ぼす影響について把握した。そして、これらの結果から個別要素法のトンネル掘削解析への適用性について考察を行った。

Key Words : *distinct element method, analysis, shallow tunnel*

1. はじめに

近年、我が国の都市部において都市機能の集中、人口の密集化が進み過密化が進み、都市トンネルの施工は増加する傾向にあり、その際特に、地上構造物や既設構造物に与える影響を最小限に抑制することが要求される。また、日本の都市やその近郊には沖積層や洪積層からなる砂質土地盤が広く分布しており、それらの地山の挙動は複雑でありまだ明確に把握されていないのが現状である。

浅層トンネル掘削時の地山の挙動を予測する手法として、一般的に連続体解析である、有限要素法を用いて検討する場合が多い。未固結な土砂地山において浅層トンネルを掘削する場合、地山のすべり挙動をいかに評価するかが重要な検討項目である。地山を粒子の集合体としてモデル化する個別要素法は、不連続体解析であるために、地山のせん断形成挙動を再現することが可能であり、すべり挙動を評価することが可能である。個別要素法は地山の物性を定量的に評価する上で多くの問題点を有しているものの、未固結土砂地山における浅層トンネル掘削解析への適用性が高いと考えられる。

そこで、本研究では個別要素法を用い、浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を行った。まず、単設トンネル掘削シミュレーションを全断面掘削で行い、土被り

の違いによる地山挙動の変化について変位分布、応力分布などから検討を行った。また双設トンネルをモデル化し、双設トンネル掘削によるトンネル間の離隔距離が地山挙動に及ぼす影響について把握した。

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、媒質を円形要素からなる粒子の集合体でモデル化する。図-1は粒子間の接触状況を模式図で示したものである。各粒子間には垂直、及びせん断方向の要素ばねを設置し、それぞれの方向における重

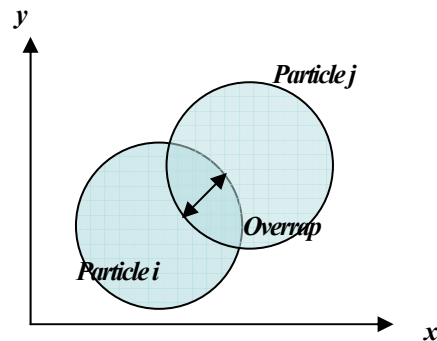


図-1 微視的な粒子の接触状況

なり合いによって反発力が発生する。各粒子には式(1)に示す運動方程式が成り立つため、ここに作用力を代入し、時間領域で前進的に解くことで、粒子の挙動、ひいてはモデル全体の力学的挙動を追跡することができる。

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

ここで m : 粒子の質量

C : 減衰定数 F : 粒子間作用力

3. 解析概要

(1) 解析モデル作成

本研究では重力場における自然落下によってランダム径粒子を降り積もらせ、初期地山モデルを作成する手法を採用している。任意に設定した解析領域内に粒径の異なる粒子を発生させることで初期配列データを作成し、これを重力場での解析にかけ、密に充填することにより本解析で用いる地山モデルを作成する。パッキング後の状態では重力によって各粒子間の間隙が減少し、モデル全体が密に充填されている。この時、モデル下部の粒子は上方の粒子の質量によって密に充填されるため、パッキング終了時における粒子間作用応力は下部の粒子ほど大きくなっている。

(2) 解析方法

図-2に土被りH=1.0Dの地山モデルを示す。本解析で用いた粒子総数は28544個である。モデル中心に青色で示された部分が掘削領域であり、任意のステップにおいて、この領域の粒子を消去することで掘削を表現し、応力解放に伴う地山挙動をシミュレーションする。地山モデルは同一のものをを用い、掘削領域を鉛直方向で変化させることで各土被りの解析を行うこととする。

本研究のトンネル掘削解析において設定したパラメータは、砂質土地山としての定性的挙動が正しく現れることを条件として設定している。現段階では、これらの物性値を定量的に評価する手法が確立されていないため、同条件での定性的な挙動を比較検討することを中心に研究を進めている。

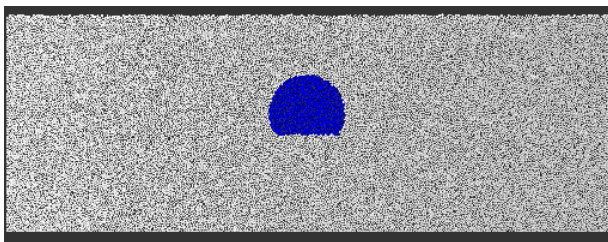


図-2 土被りH=1.0Dの地山モデル

4. 単設トンネル掘削シミュレーション

図-3に土被りH=0.5D、H=1.0D及びH=2.0Dにおける変位分布を示す。

土被りH=0.5Dの場合、トンネル直上に大きな変位が生じ、その影響が地表面に達している様子が認められる。また、トンネル上方の地山と周辺領域の間に色の大きく異なる境界面が認められることから、この面に沿った滑り面が存在するものと考えられる。

土被りH=1.0D、2.0Dの場合、トンネル内空に接する天端付近に比較的大きな変位が生じているが、その変位の影響は地表面にまで達していない。また、滑り面の存在も確認できるが、土被りH=0.5Dの場合と比べるとトンネル両側の地盤全体に広がり、直上の土塊が滑るというよりもトンネル上部の地盤全体が一体的に沈むような挙動であることが認められる。

図-4は土被りH=0.5D、H=1.0D及びH=2.0Dにおける

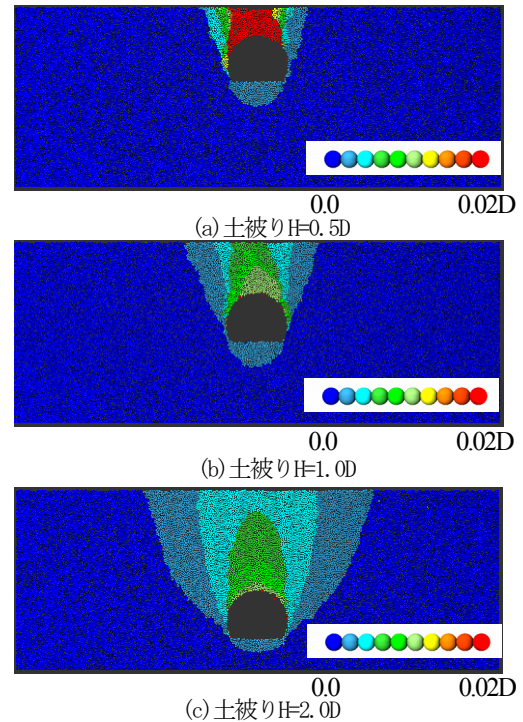


図-3 変位分布

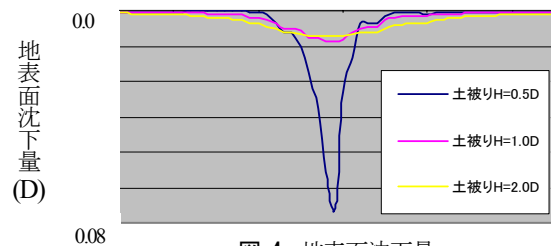


図-4 地表面沈下量

地表面沈下量を示したものである。土被り 0.5D の場合、トンネル直上において大きな沈下が生じているのに対し、土被りの増加によって沈下が広範囲に広がり、局部的な沈下は見られなくなる。これらの傾向はトンネル掘削を模擬する降下床実験²⁾の結果と一致すると考えられる。

次に、0.5D、1.0D および 2.0D 条件下におけるトンネル周辺地山の圧縮応力分布を図-5に示す。

土被り 0.5D の場合、掘削によるアーチの効果が発生しつつあると考えられ、土被りが小さいためトンネル脚部における応力域がトンネル周囲を取り囲むことができず、トンネル上部の土塊の重量を支えきれないことから、大きな沈下が生じていると考えられる。

土被り 1.0D、2.0D の場合、トンネル上部に形成されるアーチは地盤の広い範囲に広がり、特にトンネルの側壁周辺、すなわちアーチの足元に大きな力が作用していることがわかる。土被りが増すことによって地盤全体にアーチが形成され、それによってトンネルの安定性が増加すると考えられる。

ここで、トンネル掘削において理想的なアーチ形成時の地盤内の応力状態は、脚部に高い応力域が形成されていることであり、トンネル上方地盤においては全体的に均一な応力増加が望ましいとされている³⁾。本解析によって得られた応力分布はこれと一致する結果であると考えられる。

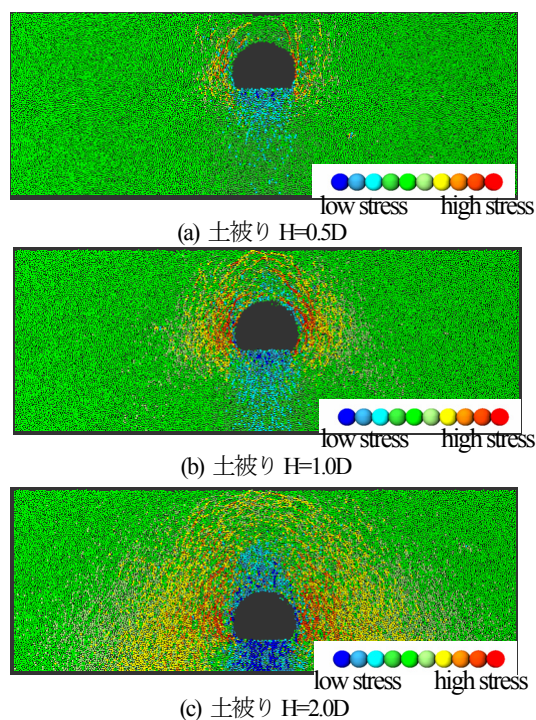


図-5 圧縮応力分布

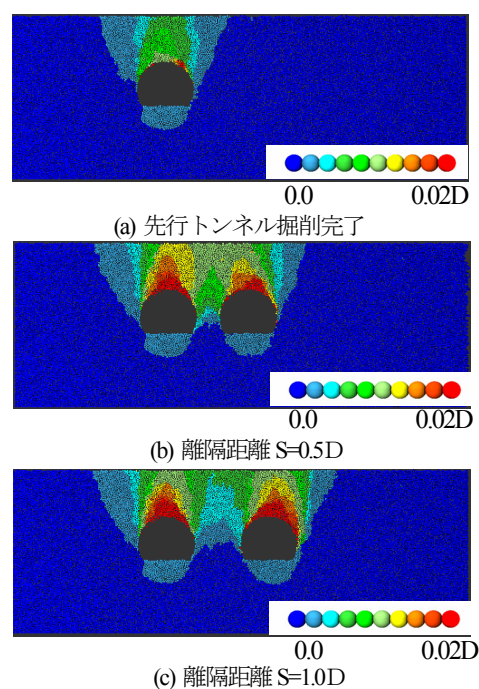


図-6 双設トンネル掘削時の変位分布

5. 双設トンネル掘削シミュレーション

単設トンネルと同様の地山モデルを用いて双設トンネルモデルを作成し掘削解析を行う。単設トンネルと同様に土被り H=0.5D、1.0D、2.0D について、それぞれ離隔距離 S=0.5D、1.0D の解析を行った。なお、掘削は左が先行トンネル、右が後行トンネルであり、離隔距離による先行トンネルの挙動の違いを比較するため先行トンネルの位置は離隔距離によって変化させていない。

図-6は土被り 1.0D における先行トンネル掘削後の変位分布、離隔距離 S=0.5D、1.0D の変位分布を示したものである。先行トンネル掘削後に一度収束した変位が、後行トンネルの掘削によって再び増加する様子が認められる。この際、両トンネル上方に生じる変位は互いに引き寄せられるように増加しており、二つのトンネルの相互影響が現れている。また、離隔距離が狭い場合、その影響はより顕著に現れており、上方の地山全体が一体となって沈下するような挙動を示している。

図-7は地表面沈下量を示したものである。離隔距離 S=1.0D では二つのトンネルの直上に局部的な沈下が認められ、個々のトンネルの変位による影響が現れて

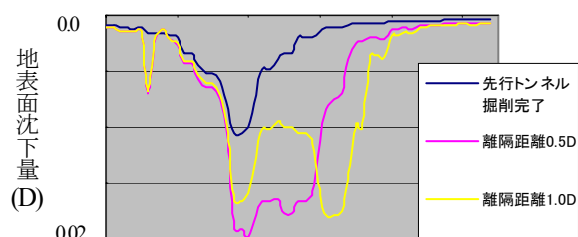


図-7 双設トンネル掘削時の地表面沈下量

いる．これに対して離隔距離 $S=0.5D$ では，二つのトンネルが一体となってより大きな沈下を生じている．

図-8 は，双設トンネル解析における土被り $H=0.5D$ ， $1.0D$ ， $2.0D$ ，離隔距離 $S=0.5D$ の圧縮応力分布，土被り $H=1.0D$ ，離隔距離 $S=1.0D$ の圧縮応力分布を示したものである．先行トンネル掘削の段階では，単設トンネルの解析と同様にトンネル脚部に高い応力域が発生し，アーチの形成が認められた．土被り $H=1.0D$ ，離隔距離 $S=1.0D$ では，グラウンドアーチによる圧縮力の増加領域に既設トンネルを含まないために，各々のトンネルでグラウンドアーチが閉合される．それに対して，土被り $H=2.0D$ ，離隔距離 $S=0.5D$ では，既設トンネルの影響を受け，上方地山でグラウンドアーチが閉合されないことがわかる．離隔距離が十分な場合は各々のトンネルで，単設トンネルと同様の応力挙動を示しグラウンドアーチの効果が期待できる．離隔距離が小さく，土被りが大きい場合には両トンネルを含む広域で圧縮力の卓越したアーチ形状の粒子が分布する．これは，広域に緩んだ地山に対して 2 次的なグラウンドアーチが形成されているものと思われる．

6. まとめ

個別要素法を用いた数値解析によって単設，及び双設トンネルの掘削シミュレーションを行い，様々な条件における地山挙動について考察を行った．本解析から，砂質土地山を掘削した際に地山が示すとされる理論上の挙動と良く一致する結果が得られた．個別要素法によるこれら一連の解析は，定性的ではあるが実際には見ることのできない地盤内の変形，及び応力挙動を視覚的に捉えることのできる手法として有効であることが確認された．今後の課題は，パラメータの決定手法として，二軸圧縮シミュレーションを行い，粒子の見かけの物性値を推定することが挙げられる．

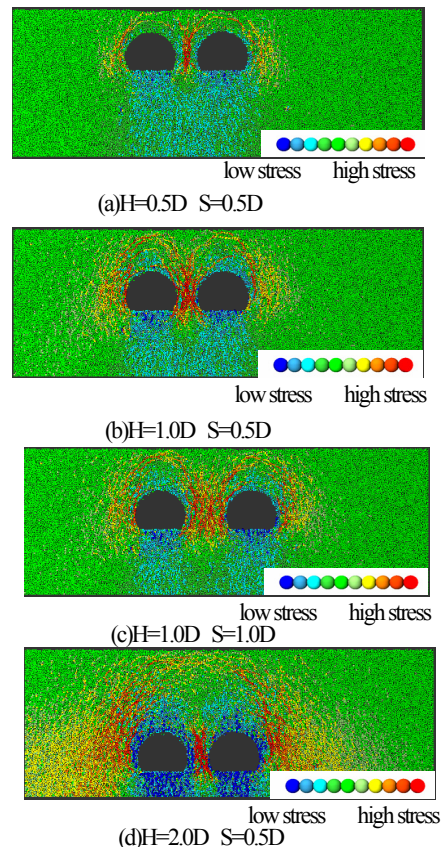


図-8 双設トンネル掘削時の応力分布

参考文献

- 1) Cundall P.A : A computer model for simulation progressive, Large scale movement in blocky rocksystem, Symp. ISRM Nancy France Proc, pp129-136, 1991
- 2) 菊本統：トンネル周辺地山の土圧発生機構に関する研究, p.37-38, 京都大学博士論文, 2004.
- 3) 土質工学会編：現場技術者のための土と基礎シリーズ 12 NATM工法の調査，設計から施工まで，pp30_35, 1986

SIMULATION ANALYSIS FOR DEFORMATION BEHAVIOR OF SHALLOW TUNNEL EXCAVATION BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Yoshitaka OHNO and Harusige KUSUMI

In case of urban NATM method for sandy soil ground of the urban areas in Japan, the behaviors of ground are complicated and uncertain during an excavation. The purpose of this research is a simulation of deformational behavior for a shallow tunnel using distinct element method, which is clearly beneficial in a behavior of large deformation and shearing in excavation of sandy soil ground. The, deformation and stress distribution of behavior of ground are considered by the difference between thicknesses of earth covering in an excavation of a tunnel, and then an influence in a behavior of ground soil about a distance between tunnels during an excavation is considered .