

個別要素法による浅層トンネルの 3次元掘削挙動解析

清水 俊友^{1*}・楠見 晴重²

¹関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-0073 吹田市山手町一丁目21-19)

²関西大学工学部 都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町三丁目3-35)

*E-mail: zouji@hotmail.co.jp

近年,都市部における過密化,環境問題を解消する有効な手段として地下空間の利用が重要視されており,都市部での浅層トンネルの施工が増加している.しかし,これら沖積層,及び洪積層からなる砂質土地山において都市NATMを採用した場合の地山挙動は複雑であり,明確に把握できないのが現状である.数値解析によってトンネル掘削時の地山挙動を予測するには,不連続体の性質を忠実に再現することが求められる.

そこで我々は不連続体解析に有用性の高い個別要素法を用いて,砂質土浅層部におけるトンネルをモデル化し,掘削時の挙動についてシミュレーションを行った.本論文では,土被りの異なる地山モデルを用いた掘削解析により,本手法の適用性,ならびに地山モデルの安定性について検討した結果を報告する.

Key Words : Distinct element method, analysis, shallow tunnel

1. はじめに

都市の地盤は山岳の地盤と異なり,未固結な地山が多く,不連続的な性質を有している¹⁾.また,密集した都市部の地下を掘削する場合,地表面への影響,及び周辺構造物へ与える影響を最小限に抑える必要がある.このため最も重要と考えられるのがトンネルの変形に伴う緩み領域の拡大を最小限に抑えることであり,地山に応じた最適な設計を行うべく,様々な数値解析手法が提案されている.

その一つである有限要素法は,現場での計測値を定量的に扱うことができ,最も一般的に用いられている手法である.しかし連続体解析であるため,砂質土が有する不連続体としての性質を表現することは困難であり,トンネル周辺の滑りを伴う変形挙動を忠実に再現することは困難であると言える.一方,本研究で解析手法として用いた個別要素法は,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,不連続体としての定性的な挙動を再現する上で,砂質土を対象としたトンネル掘削解析に非常に有用性が高いと考えられる.

本研究では,個別要素法をトンネル掘削解析に適用する際の問題点を明らかにすると同時に,単純なモデルを用いた掘削解析によって定性的な挙動の整合性について検討を行った.

2. 個別要素法

(1) 個別要素法とは

個別要素法はPACandall²⁾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としてモデル化する.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,及びせん断方向にばね要素を設置し,粒子同士の重なり合いによって反発力が発生する.この反発力を個々の粒子間に成り立つ運動方程式に代入し,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.運動方程式には減衰係数 C を組み込み,粒子の速度を乗ずることによって粒子の運動に減衰力を与えることとする.本解析では運動方程式内に減衰を与える項を導入することで,粒子間力学モデルにおけるダッシュポットの役割を与えている.

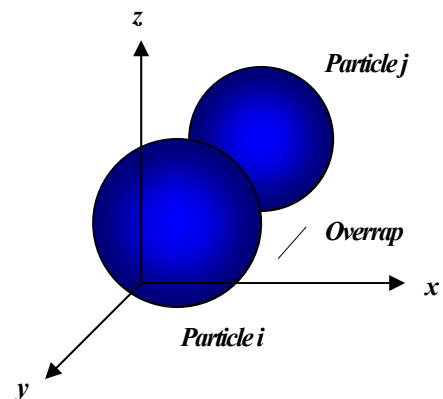


図-1 微視的な粒子の接触状況

(2) パラメータ設定の問題点

個別要素法において粒子の集合として形成されるモデル地山の性質は、主に個々の粒子間に設置される垂直ばね、及びせん断ばねの定数 K_n, K_s によって決定される。モデル地山の性質を左右するこれらばね定数の比率 K_n/K_s （以後ばね比と称する）、及びその他パラメータの組み合わせは、実際の地山を評価する物性値とは異なり、あくまで解析における粒子間の性状を設定する数値である。

また、これらパラメータが同一の場合であっても、モデルを形成する粒子の粒径、粒径分布、粒子間の間隙状況等によってモデルの示す挙動は全く異なるものとなる。このため、異なった解析モデル間に統一したパラメータの基準を設けることは困難であり、あくまで同一条件のモデルについてパラメータスタディを行う必要がある。

以上の問題点を踏まえた上で、本研究では、パラメータによるモデル地山の性質変化を定性的に把握することを目的とした試験的な解析を行った。本来、モデル地山の物性値を定量的に把握するには、供試体モデルを用いた三軸圧縮解析^{3,4}を行いパラメータを決定するのが理想と考えられる。しかしながら、先に述べたように、異なるモデル間でのパラメータの共有が困難であること、また、出力データの定量的な扱いが困難なことから、実現に至っていないのが現状であり、今後、これらの定量的な評価手法を確立することが最大の課題となると考えられる。

3. モデルの物性に関する検討

パラメータによる粒子の集合体としての性質を把握するため、図-2に示すような立方体モデルを用いた試験解析を行った。重力場においてモデル前面の壁要素を消去し、ばね比ごとの崩壊形状を比較する。なお、モデルの粒径分布はトンネル解析と同様とし、モデル作成時のパッキングも同条件で行ったものを用いることとする。

表-1に解析ごとに設定したパラメータを示す。今回は、減衰係数ならびにその他の係数等については一定とし、ばね比による物性の変化についてのみ注目した。図-3はばね比ごとの崩壊形状を示したものである。この結果から、ばね比が大きいほど、つまり垂直ばね定数に対するせん断ばね定数の値が小さいほど、モデルのせん断抵抗力が小さくなる傾向が認められる。また、前進差分における時間増分は解析結果を変化させる要素ではあるが、ばね比によるせん断抵抗性の傾向変化に影響を与えるものではないことを確認した。

ここで留意すべき点は、この解析によって把握できるのは、あくまでモデル地山のもつせん断抵抗力とばね比の関係性であり、砂質土としての性質を再現する普遍的なパラメータを得ることはできないということである。

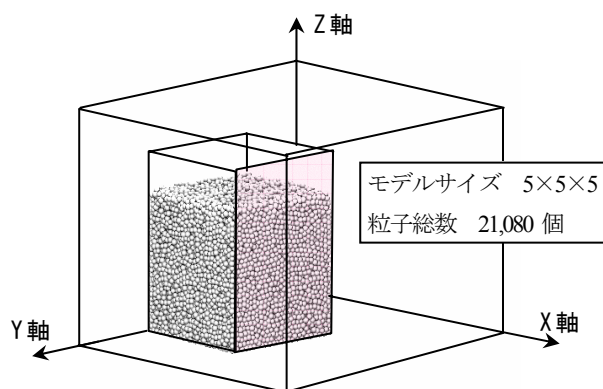


図-2 立方体試験解析モデルの概要

表-1 立方体試験解析の主なパラメータ

	垂直ばね定数	せん断ばね定数	減衰定数
(a)	5.0×10^8	1.8×10^7	25
(b)	5.0×10^8	1.8×10^6	25
(c)	5.0×10^8	1.8×10^4	25

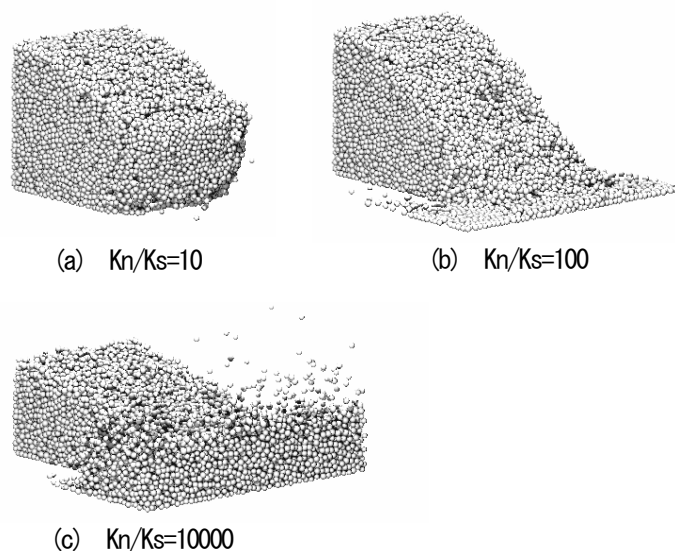


図-3 各ばね比における崩壊形状の比較

応力開放範囲の異なる他のモデルが用いられた場合、構成する粒子の開放範囲に対する大きさが異なるため、それぞれのモデルにおいて実際の現象を再現するパラメータは個別に検討する必要がある。

本研究の本題であるトンネル掘削解析において設定したパラメータは、解析が正常に作動し、かつ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。

4. 半球体掘削シミュレーション

(1) 半球体掘削の目的

土被りによって異なる地山挙動を比較するため、トンネルを模擬した半球体形状の掘削シミュレーションを行った。本解析は、粒子の集合体としてモデル化された地山モデルが、実際の土砂地山と同様の挙動を示すことを確認する目的を有している。そのため、特定の形状を有したトンネルではなく、単純な形状の掘削を行うことで、応力開放に伴う地山モデルの純粋な挙動を捉える必要がある。また、現段階ではモデルの物性に関する定量的な評価を行っていない。そのためパラメータをすべての解析で統一し、物性に関する条件を同一とした上で、土被りによる挙動の変化を定性的に評価することに主眼を置いている。

(2) 解析の流れ

a) 地山モデルの作成

重力場における粒子の自然落下によって立方体形状の地山モデルを作成する。本手法によって作成されたモデルは、モデル下部ほど粒子が密に充填されるため、初期の圧縮応力もモデル下部ほど高い状態となる。トンネル周辺の初期応力状態は、掘削時の地山挙動に影響を与える要因となるため、重力パッキングによって形成された応力状態は、土被りによる挙動の変化を忠実に再現する上で重要であると考えられる。

b) 掘削領域の設定

図-4に土被り $H=3.0D$ の地山モデルの断面を示す。モデル中心に青色で示された部分が掘削領域であり、この領域の粒子を消去することで応力開放に伴う地山挙動をシミュレーションする。前述のように、トンネル周辺の初期応力状態を考慮するため、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。

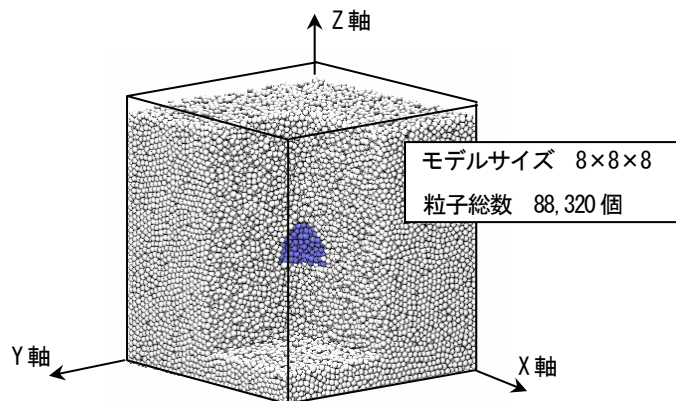


図-4 半球体掘削モデルの概要 ($H=3.0D$)

(3) 解析結果

a) 地山内変位分布

図-5は半球体掘削に伴う粒子の変位量を示すコンター図であり、粒子の色が赤に近づくほど大きな変位が生じていることを示している。また、これらの解析結果についての定量的な評価が困難なことから、変位量等の数値はすべてトンネル径 D に対する大きさで表している。

いずれの場合も、掘削に伴い天端部分から変位が発生し、塑性領域と考えられる赤色の領域が拡大している。 $H=1.0D$ では赤色の領域が地表面近くまで達しており、共下がり現象を示し、いわゆるグランドアーチが形成されにくい状態であると考えられる。これに対し土被りが大きい場合では、トンネル周辺で大きな変位が生じているものの、地山内の広範囲に変位が分布し、地山が一体となって変形していることがわかる。これらの解析結果はトンネル天端の地山挙動を再現する落とし戸実験の結果⁴⁾とよく一致するものであり^{5),6)}、粒子によって形成された地山モデルが実現象を再現していることが確認された。

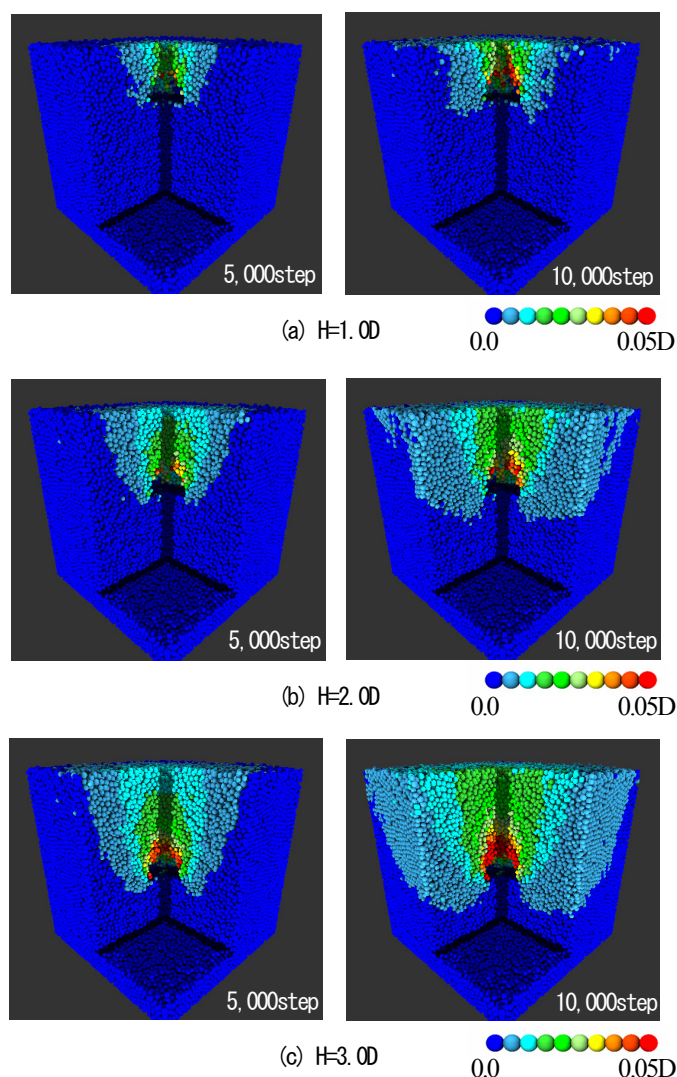


図-5 各土被りにおける地山内変位分布

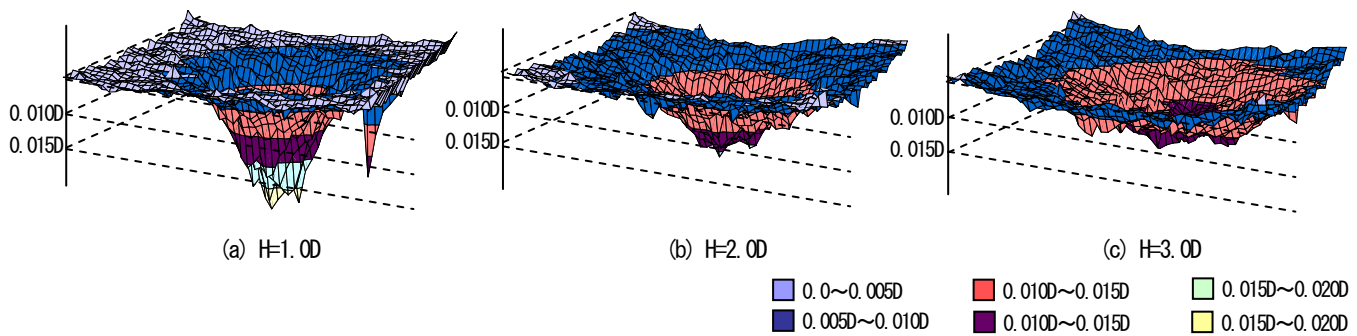


図-6 各土被りにおける地表面沈下量

b) 地表面沈下量

図-6は、地山モデル表面の粒子の鉛直方向変位をプロットして作成した3次元地表面データである。なおグラフの縦軸の値はトンネル径Dで正規化されたものである。H=1.0Dの場合、掘削部直上において局所的な沈下が生じ、最大でトンネル径に対し1.5%から2.0%程度の陥没を生じた形となっている。これに対し土被りが大きい場合、掘削部直上における局所的な沈下が縮小する一方で、小規模な沈下が広範囲に分布する傾向が現れている。

5. 結論

単純な条件のモデルを用いた掘削解析を行い、従来のトンネルを模擬した実験結果と同等の結果を得ることができた。すなわち土被りの増加に伴い局所的な沈下が減少し、その一方、広範囲に小規模な沈下が生じることで地山が一体となって変形する傾向が認められた。このことから、現段階では定性的な評価に限られるが、個別要素法を用いた数値解析によって応力開放に伴う地山の变形挙動をシミュレーションすることが可能であると考えられる。

今後、パラメータによって左右されるモデルの物性値を定量的に評価するためには、様々なパラメータを用いた解析データを収集し、従来の実験データとの比較から、

モデルの示す性質を把握していく必要がある。また、今回の解析モデルは、極力単純な条件を採用することで、土被りの違いによる地山挙動の変化に注目した結果と言える。今後、さらに実際のトンネルに近い形状の掘削を行う場合、初期モデル作成時の応力状態やトンネル壁面要素の導入など、複雑な要素を考慮に入れた上で解析を行い、実現象との整合性を確認していく必要がある。

参考文献

- 1) 足立紀尚, 田村武, 八嶋厚, 上野洋 : 被りの浅い砂質地山トンネル掘削に伴う地表面沈下, 土木学会論文集, No.370/III-5, pp85-94, 1986.
- 2) Cundall P.A : A computer model for simulation progressive, Large scale movement in blocky rocksystem, Symp. ISRM Nancy France Proc, pp129-136, 1991
- 3) 御手洗良夫, 手塚仁, 羽馬徹, 岡部正, 蔣宇静 : 3次元粒状体個別要素法を用いた長尺鏡補強工の効果の評価, トンネル工学報告書 VOL.15, pp77-79, 2005.
- 4) 村上敏夫, 久武勝保, 櫻井春輔 : CEM による地盤のモデル化とその入力パラメータの決定法, 土木学会論文集, No.529/III-33, pp11-18, 1995.
- 5) 桜井春輔, 足立紀尚 : 都市トンネルにおける NATM, pp41-45, 鹿島出版社, 1988.
- 6) 菊本統, 木村亮, 岸田潔, 足立紀尚 : トンネル掘削時の力学挙動に関する3次元降下床実験とその数値解析, 土木学会論文集, No.750/III-65, pp145-158, 2003.

3D ANALYSIS FOR EXCAVATION BEHAVIOR OF SHALLOW TUNNEL BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Toshitomo SHIMIZU and Harushige KUSUMI

In recently, the construction of shallow tunnels in big urban areas are increasing from the point view to be useful development in the urban space. However, it can not be clarified that the mechanical behavior of the excavating shallow tunnels are much complicated.

In this paper, it is tried to estimate the mechanical behavior of shallow tunnel into sand during excavation by Distinct Element Method. Especially, the simulation of surface settlement each depth are done.