

第 部門

個別要素法による浅層トンネルの掘削シミュレーション解析

関西大学工学部 学生員 ○清水 俊友
 鹿島建設(株) 正会員 藤井 健次
 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年々増加している。しかし、洪積層及び沖積層からなる砂質土地山を対象とした浅層トンネルの設計手法は未確立であると言える。そこで本研究では、解析手法として不連続体解析に有用性が高いとされる個別要素法を用い、都市 NATM 工法による浅層トンネルの掘削シミュレーションを行なった。これにより土被りの違いによる地山挙動の変化を視覚的に捉えると同時に、トンネル補助工法であるプレライニング工法をモデル化し、この工法の変位抑制効果、及び地山の挙動について検討を行なった。

2. 個別要素法¹⁾

個別要素法は P.A.Cundall 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としてモデル化する。各粒子間には図-1 に示すような要素ばねを設け、粒子同士の重なりに応じてフックの法則に基づく反発力が発生する。この反発力から各粒子には式(1)に示す運動方程式が成り立ち、これを時間領域で差分化し前進的に解くことにより、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。

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

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

ランダム粒径粒子を用いてパッキングを行い、トンネル内空部に赤色に着色した粒子を配置して初期モデルとする。図-2 に初期モデルの概要を示す。このモデルを用い、プログラム中で赤色の粒子のみを任意のステップで消去するように設定することでトンネル掘削を表現した。

またプレライニング工法のモデル化にあたり、図-3 のようにトンネル外周形状に粒子を配置し、引張力として定義されるボンディング力を作用させた。これにより外周部の粒子同士は連続体としての特性を有し、コンクリートのアーチシェルとしてみなすことができる。また、周辺地山と支保の間にもボンディングが作用するため、地山と支保の一体化した状態を作ることができる。

4. 解析結果

4.1 土被りの違いによる地山挙動の変化

図-4 に土被り 0.5 D、及び 2.0 D における変位集即時の変位分布

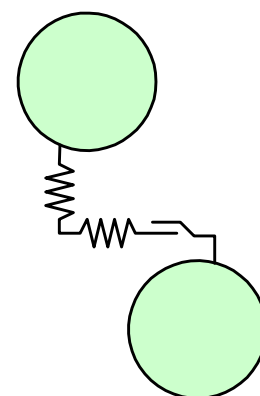


図-1 粒子間の要素ばねモデル

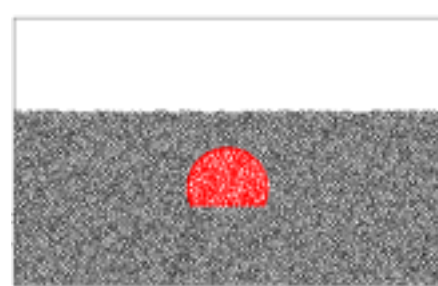


図-2 初期モデルの概要

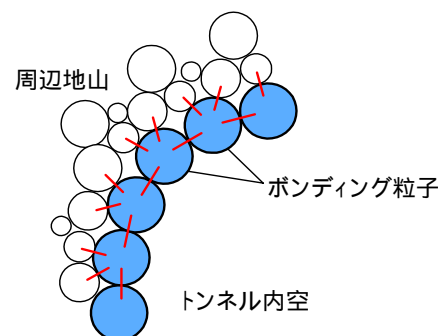


図-3 ボンディング粒子の配置

を示す。ここで D はトンネル直径とする。土被り $0.5D$ の場合、トンネル直上部に局部的な変位が生じ、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地山との間に色の大きく異なる境界面が認められることから、この面に沿って滑り面が存在するものと考えられる。一方、土被り $2.0D$ の場合、変位はトンネル上方の広い範囲に分布し、地山全体が一体となって変形するような挙動を示している。

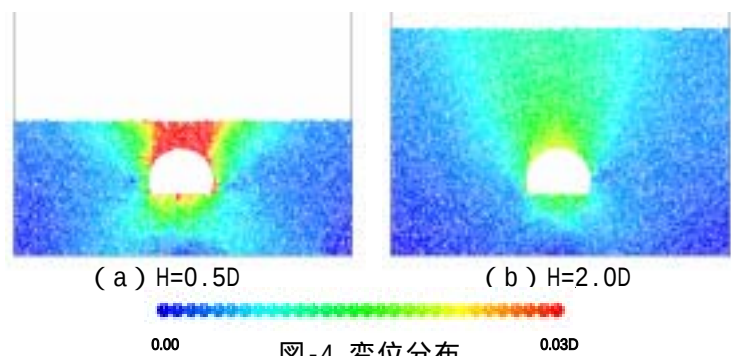


図-4 変位分布

図-5 は土被り $0.5D$ 、及び $2.0D$ における内部応力分布を可視化したものである。土被り $0.5D$ の場合、トンネル周辺の狭い領域に高い応力が集中し、トンネルを取り囲むような挙動を示している。それに対し土被り $2.0D$ ではトンネル脚部における高応力域とトンネル上方に広く分布する応力域の存在が認められる。トンネル掘削における理想的なアーチ形成時の応力状態は、脚部に高い応力域が形成されていることであり、以上の結果は本解析によってそれが再現されたものであると考えられる。

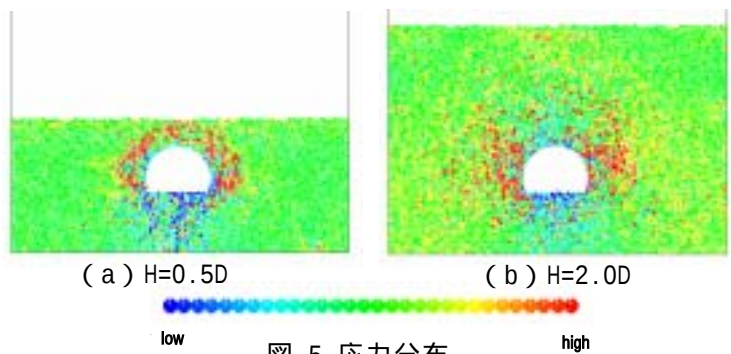
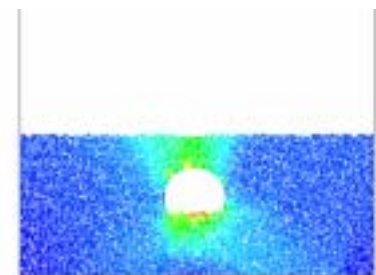
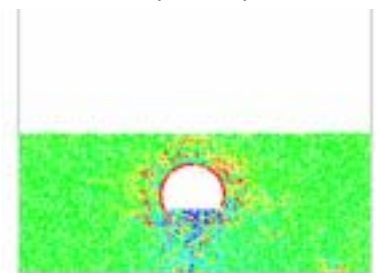


図-5 応力分布

4.2 ライニングの施工による地山挙動の変化

図-6 は、土被り $0.5D$ においてライニングを施工した場合の変位分布を示したものである。ライニングを施工することで、トンネル直上に生じていた局部的な変位が大きく抑制されている様子が認められる。

図-7 は、土被り $0.5D$ においてライニングを施工した場合の内部応力分布について示したものである。この図から、ライニングの粒子に高い応力が集中している様子が認められる。これはライニングの粒子自体がアーチとしての効果を発揮し、トンネル天端にかかる荷重を圧縮力としてトンネル脚部に伝達しているためであると考えられる。また、図-5(a)で示した応力分布と比較すると、トンネル周辺地山における応力の集中的な増加が減少していることが認められる。これはライニングを施工することでトンネル掘削に伴う地山の無支保状態をなくし、応力の変動が抑制された結果であると考えられる。

図-6 ライニング施工時の変位分布
($H=0.5D$)図-7 ライニング施工時の応力分布
($H=0.5D$)

5. まとめ

個別要素法を用いた数値解析によって砂質土地山における浅層トンネル掘削時の挙動を視覚的に捉えることができた。また、補助工法が地山に及ぼす影響を可視化し、その効果のメカニズムを確認した。今後は、これらの解析に定量的な評価を付け加えるとともに、実現象と照らし合わせ、解析の整合性を確認することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) P.A.Cundall and Strack, O.D.L : A distinct numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol.29, pp.47~65, 1979