

## トンネルの FEM 解析における解析領域および構成則の影響

首都大学東京 学生会員 ○宮下 直幸  
 京王電鉄 朝位 充  
 首都大学東京 正会員 土門 剛  
 首都大学東京 正会員 西村 和夫

### 1. 研究背景と目的

近年、都市部では既設建造物の直下あるいは近傍を都市部山岳工法で掘削する事例が増加している。その場合、周辺建造物への影響を評価する必要があり、一般的に二次元 FEM によって地表面沈下や周辺地盤の変位の状況などを事前に調査する。しかし、FEM 解析では解析領域設定に起因するトンネル周辺のリバウンドなどが指摘されている。

解析領域の設定に関しては、二次元数値解析では解析領域の大きさによって変位が異なるということが知られている。これは、本来半無限に広がる地盤を有限に設定することで、トンネル掘削の応力解放が制限されるため、実際よりもトンネル周辺に応力が残留し、それが実現象との大きな隔たりを与えることとなる。一方で下方領域を大きくしていくと上向きの掘削解放応力により地表面の鉛直変位が比例して大きくなる、解析上のリバウンド現象が起こる。

本研究では、要素の応力状態が載荷である場合と比べ除荷状態では変形係数が大きくなるという土の性質に注目し、その性質を取り入れた構成則により解析上のリバウンドを抑制することができるか、そして領域の設定が沈下量に対してどのような影響を与えているのかを検討した。

### 2. 解析手法

構成則には線形弾性、Mohr-Coulomb 則を適用した弾完全塑性（以下、Mohr-Coulomb モデル）、そして除荷過程を考慮した Duncan-Chang モデルを用いる。図 1 に解析で用いたメッシュ図を示す。下方領域 (Hd) を 3D (トンネル径 1D) で固定し、側方領域 (Hs) を変化させた場合の地表面沈下量、地盤内鉛直応力を比較する。

地盤物性値は  $E_i=20000\text{kN/m}^2$ ,  $\nu=0.3$ ,  $\gamma=16\text{kN/m}^3$ ,  $c=40\text{kN/m}^2$ ,  $\phi=30^\circ$ , Duncan-Chang モデルにおける除荷時の変形係数  $E_{ur}=3 \times E_i$ , 非線形パラメータ  $n=0.2$  としている。

図 2 に Duncan-Chang モデルの非線形応力-ひずみ曲線を示す。この曲線はせん断応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  に対する軸ひずみ空間の間に双曲線形態を示し、双曲線は一般に次式で表される。

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \varepsilon / (a + b\varepsilon)$$

ここで  $a$  と  $b$  は  $a=1/E_i$ ,  $b=1/R_f$  であり、本研究では破壊比  $R_f$  を 1.0 と仮定した。この場合、 $c$  と  $\phi$  から求まる土の強度と、双曲線モデルの漸近線は一致している。

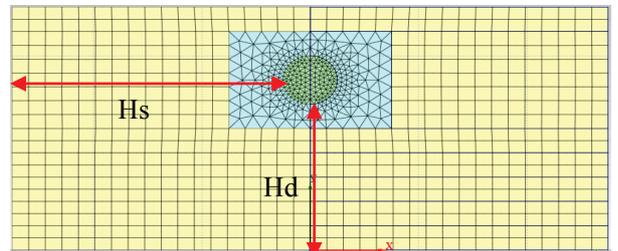


図 1 メッシュ図 (Hd3D Hs5D)

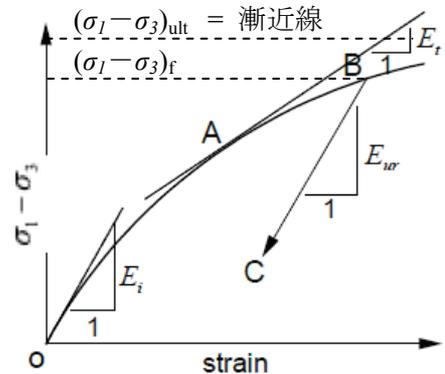


図 2 非線形応力-ひずみ挙動

キーワード 有限要素法, 解析領域, 構成則, 地表面沈下, 地盤内鉛直応力

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL0426-77-2785 FAX0426-77-2772

### 3. 解析結果

#### 3.1 地表面沈下量

図3に Duncan-Chang モデルにおける地表面沈下量を示す. 図3においてはトンネル直上の沈下量に大きな差は見られない. 地表面沈下量で領域の影響を議論することは難しいと考えられる. そこで次に地盤内鉛直応力の視点から領域の影響を検討する.

#### 3.2 地盤内鉛直応力

図4に地盤内鉛直応力(メッシュ図底部より5m位置)を示す. 領域の影響がなければ地盤内鉛直応力は  $\gamma h$  に収束する. しかし,  $Hs3D$  とした場合, 明らかに  $\gamma h$  に収束していないことがわかる. つまり, 地表面沈下量では大きな差は見られないが, 地盤内鉛直応力では  $Hs3D$  では領域の影響が生じたと考えられる.

弾性, Mohr-Coulomb モデルにおいても同様に,  $Hs3D$  では領域の影響が存在することを確認している. つまり,  $Hd3D$  に対して  $Hs5D$  以上とることにより領域の影響がなくなる. 弾性, Mohr-Coulomb モデルによる解析結果では, 地表面沈下量, 地盤内鉛直応力共に Duncan-Chang モデルに比べ, 明確な差異が生じている. また, 異なる条件の地盤においても同様の結果が得られている.

#### 3.3 領域による影響

二次元 FEM 解析の問題点として, 領域の影響がないと判断された領域においても領域を広げていくことで地表面沈下量が浮き上がるという問題点があることは研究背景でも述べた.

そこで, 構成則によってその影響にどのような違いがあるのかを検討する. 図5には下方領域を  $Hd3D$  で固定し, 側方領域  $Hs$  を広げた場合のトンネル直上の地表面沈下量を, 図6には  $Hs20D$  で固定し, 下方領域  $Hd$  を広げた場合のトンネル直上の地表面沈下量を示す.

図5および6において, 弾性, Mohr-Coulomb モデルでは領域を広げることによってトンネル直上の地表面沈下量が低下(隆起する方向に増加)していくことがわかる. しかし, Duncan-Chang モデルを用いることによってその影響を抑制できることがわかる.

### 4. 結論

本研究より以下のことが判明した.

- ①構成則に関係なく, ある下方領域に対し変形が影響を受けない側方広さは同じである.
- ②地盤条件によって領域の取り方が異なることはない.
- ③除荷過程, 非線形性を考慮できる Duncan-Chang モデルを用いることにより, 領域を広げることで地表面沈下量が浮き上がるという問題点を抑制できる.

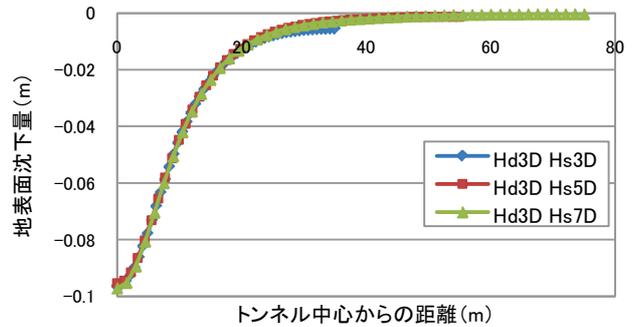


図3 地表面沈下量

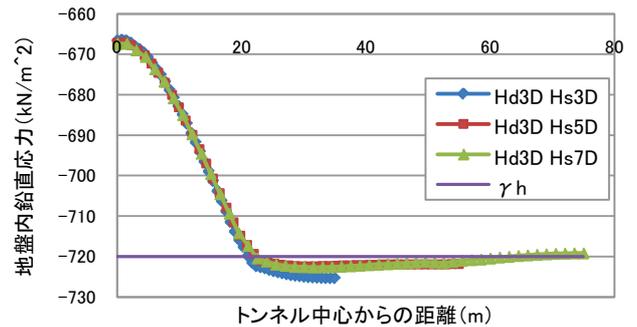


図4 地盤内鉛直応力

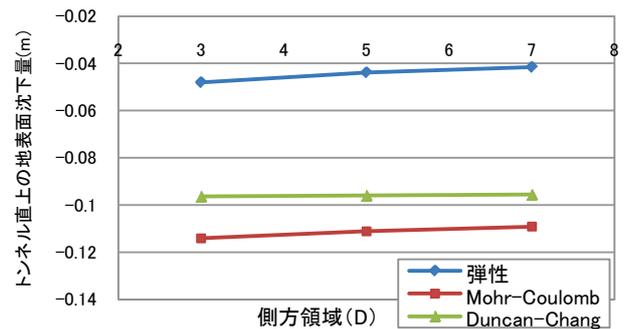


図5 構成則による側方領域の影響

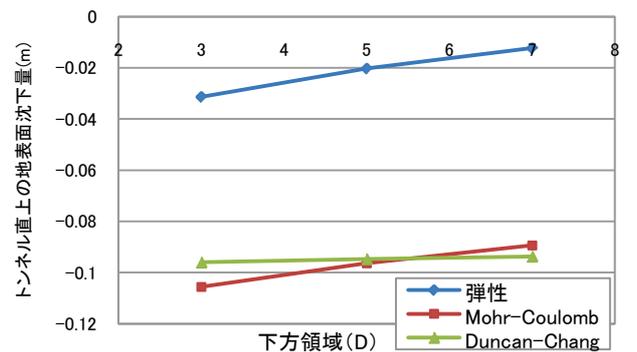


図6 構成則による下方領域の影響