

トンネルの FEM 解析における除荷剛性の影響

首都大学東京（現在東京工業大学） 学生会員 ○五十棲 将太
 首都大学東京大学院 正会員 土門 剛
 首都大学東京 正会員 西村 和夫

1. 研究背景・目的

都市部におけるトンネルの施工では、近年、経済性や断面形状の自由度、補助工法に関する技術開発の進展などの理由から、山岳トンネルの標準工法である NATM が多く導入されるようになった。一方、NATM では掘削による地盤変形が避けられないことから、周辺構造物に多大な影響を与える可能性があるため、掘削に伴う周囲への影響を一般的には数値解析によって評価する。特に、二次元 FEM 解析は簡便で取扱いやすいため、トンネルの解析において最も多く利用されている。

しかし、トンネルの掘削の解析を行う際は、全く同じ解析条件であっても、解析領域の設定を変えると解析結果が異なるということが知られており、現在は恣意的に解析領域を制御している。特にトンネル下部の地盤のリバウンド現象による地表面の持ち上がりが顕著に現れる。これは除荷剛性を考慮することで解決することがわかっているが、トンネル掘削解析で通常用いられる構成則では、除荷剛性を考慮できないことから、掘削解析にあたって除荷剛性を考慮することは少ない。

本研究では、現在使用されている主流な構成則である Mohr-Coulomb の破壊基準を適用した完全弾塑性モデル（以下 MC 則）に、除荷剛性を考慮した構成則として Mohr-Coulomb β 則（以下 β 則）を試作し、素掘りの円形トンネルに適用した解析を実施した。

2. 研究手法

2.1 解析手法

円形トンネルモデルを対象に、Mohr-Coulomb 則と β 則を用いて、2次元 FEM を利用した掘削解析を実施した。領域は、側方 $H_s=7D$ 、下方 $H_d=5D$ とし（図-1）、応力・変位を掘削面上下左右の4点で比較した。

また、 β 則はまだ完全ではなく、弾性状態からの除荷後の再載荷時に、元の弾性係数を使用せずに、塑性するまで除荷剛性で再載荷の挙動を続ける問題点があるため、 β 則での掘削は1段階の応力解放 100%にて解析を実施し、MC 則の1段階と10段階の掘削ケースと解析した。

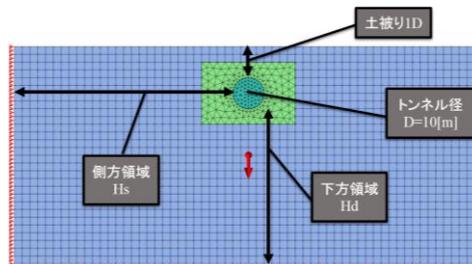


図-1 円形トンネルモデル

2.2 除荷剛性の確認

まず2次元 FEM 解析における β 則の除荷剛性の機能を確認するため、一軸圧縮試験解析と、円形トンネルモデル掘削解析における領域別地表面変位の、構成則の違いによる比較を行う。与えた物性値は表-1 の通りである。一軸圧縮試験解析は、塑性流れによる不安定化を防ぐために変位制御で行い、ひずみが 2500μ 時および 8000μ 時に、それぞれ 800μ 、 1000μ の除荷を実施した。一軸圧縮の解析モデルは、土の供試体の寸法と同じである縦 $100[\text{mm}]$ 、横 $50[\text{mm}]$ のモデルを使用し、本解析の円形トンネルモデルは図-1 に示す通りである。また、領域別の地表面変位の比較の際に設定した領域は表-2 の通り。

表-1 物性値一覧

物性値	弾性係数 E [kN/m ²]	除荷-再載荷時弾性係数 Eur [kN/m ²]	単位体積重量 γ [kN/m ³]	ポアソン比 ν	内部摩擦角 ϕ [deg]	粘着力 c [kN/m ²]
Mohr-Coulomb	35,000	無	16	0.35	30	40
Mohr-Coulomb β	35,000	10,500	16	0.35	30	40

キーワード トンネル 2次元 FEM 解析領域 除荷剛性

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 042-677-1111

表-2 円形トンネル掘削解析の設定領域

下方領域 Hd	1D	3D	5D	7D
側方領域 Hs	3D	5D	7D	10D

※トンネル径 D=10[m] 土かぶり 1D

3. 結果

3.1 β 則の除荷剛性の機能

(1) 一軸圧縮試験解析の結果

一軸圧縮試験解析による結果を図-2 に示す。Mohr-Coulomb 則は除荷時の弾性係数を別に設定することができないため、小さい応力レベルでは、応力の低下に伴うひずみが除荷を考慮した β 則に比べて大きいことがわかる。これが、地表面の変位やトンネル下部のリバウンドの形で表れると推測できる。また、β 則の未完である再載荷時の応力経路も確認することができた。

(2) 領域別地表面変位の結果

β 則の掘削は 1 段階でしか行えないため、MC 則の 10 段階 (図-3) と 1 段階 (図-4) の違いを比較しても、地表面変位に関しては段階をわけることによる影響は小さいことを踏まえて 1 段階掘削で比較すると、図-4 と図-5 から β 則では領域設定によらず地表面の変位がほぼ一定となっていることがわかる。未完ではあるが β 則の除荷機能を確認することができた。

3.2 円形トンネル周辺への除荷剛性の影響

(1) 4 点の応力

掘削部周辺の応力状態を確認すると、まず、段階を踏まえたことによる差はわずかであることがわかる(表-3, 表-4 参照)。したがって、除荷剛性を組み込むことにより解析を実施しても、応力状態は変わらないと言える。これは、掘削面周辺が塑性状態となっているため、当然のことである。

(2) 4 点の変位

変位の結果を表-5, 表-6 に示す。変位においては、除荷剛性の影響が顕著に、特に下部のリバウンドの緩和に表れている。同じ応力状態の場所 4 点において、掘削面の変形が、上下左右で緩和されていることがわかる。しかし、左右の鉛直下向きの変位も増加していることから、全体として沈み込みが生じているとも考えられるが、β 則は 1 段階の掘削しか表現ができない。MC 則の 1 段階と 10 段階を比較すると、1 段階でわずかに下向きの変位が増加しているため、β 則で 10 段階の掘削を表現した場合に、これよりは少し沈み込みが抑えられ、無視できる範囲になる可能性も残されている。いずれにせよ除荷剛性を組み込んだ汎用の MC 則 (β 則) について、さらに、実トンネルを対象とした解析で実変位と比較する必要がある。

4. 結論

除荷剛性を考慮することで、地表面への影響を解析領域の設定によらず一定とすることが確認できた。しかし、掘削面周辺に与えた影響が、除荷剛性によるものなのかその原因を解明できていない。これからは、除荷剛性を備えた構成則である Duncan-Chang においても比較を行うが、拘束圧による影響も考えられるため、β 則の改良が必要である。

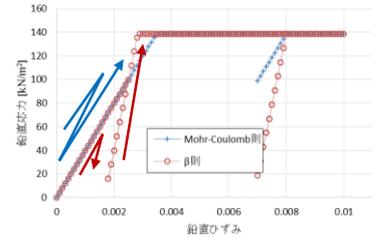


図-2 一軸圧縮試験解析結果

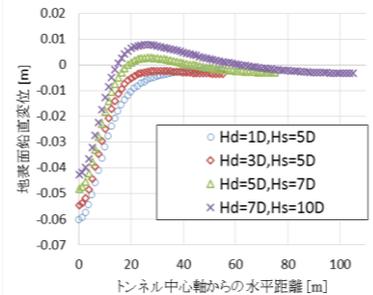


図-3 MC 則 10 段階 地表面変位

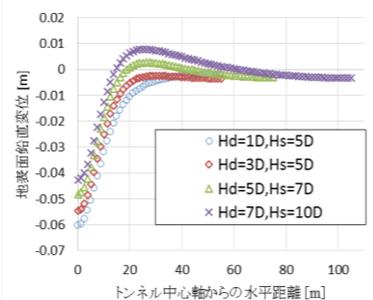


図-4 MC 則 1 段階 地表面変位

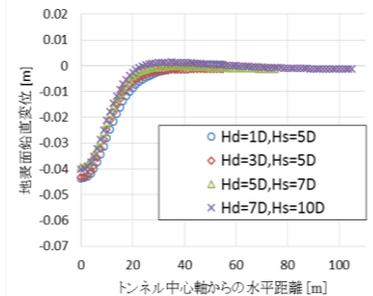


図-5 β 則 地表面変位

表-3 掘削面 4 点の鉛直応力

σ_{yy} [kN/m ²]	左	上	下	右
引張が正				
初期応力	-239.91	-149.43	-330.66	-239.58
MC 10 段階	-194.66	-12.11	-38.53	-199.84
MC 1 段階	-195.20	-10.56	-37.64	-200.81
MCβ	-200.74	-10.59	-35.91	-205.70

表-4 掘削面 4 点の水平応力

σ_{xx} [kN/m ²]	左	上	下	右
引張が正				
初期応力	-129.18	-80.46	-178.05	-129.00
MC 10 段階	-19.69	-102.49	-161.06	-21.75
MC 1 段階	-19.78	-101.06	-160.62	-21.91
MCβ	-21.48	-102.38	-183.00	-23.35

表-5 掘削面 4 点の鉛直変位

Y 変位 [m]	左	上	下	右
上向き正				
MC 10 段階	-0.004	-0.070	0.087	-0.003
MC 1 段階	-0.007	-0.070	0.087	-0.005
MCβ	-0.014	-0.047	0.032	-0.013

表-6 掘削面 4 点の水平変位

X 変位 [m]	左	上	下	右
右向き正				
MC 10 段階	0.170	0.000	0.000	-0.170
MC 1 段階	0.171	0.000	0.000	-0.171
MCβ	0.113	0.000	0.000	-0.114