

押出し性地山におけるトンネル周辺地山の力学的挙動について

福島工業高等専門学校 学生会員 ○高杉 凌平

福島工業高等専門学校 正会員 林 久資

1. 目的

NATM 工法によるトンネルの施工においては、周辺地山の安定が不可欠であるが、押出し性地山ではトンネル掘削時に大きな変位が発生し、難工事となることが多い。例えば、切羽押出し変位の増大に伴って切羽が崩壊したり、内空断面が内空側に押し出されることによって縫返しが必要となる場合がある。それぞれの問題への対策として、切羽安定対策には長尺鏡ボルト、鏡吹付け、加背割り等を施し、内空断面の確保には、断面を早期閉合することが好ましい。従って押出し性地山においては切羽安定性と内空断面の確保のための対策が併用されることが多い。しかしながら、早期閉合を実施したときの切羽安定性の変化や、切羽安定対策を施したときの内空断面の力学的影響に着目した研究はみられない。

そこで、本研究では有限差分法三次元数値解析の FLAC3D を用い、早期閉合を適用したときの内空断面変位の抑制効果や、早期閉合を実施したときの切羽安定性の影響について検討する。

2. 解析概要

本研究では、押出し性地山における閉合時期の違いがトンネル周辺地山に及ぶ影響を数値解析により検討する。解析コードは FLAC3D (Ver.4.0) を用いた。解析地山モデルは横断方向 50m、奥行き 150m、高さ 100m とし、土かぶりが 100m となるように上載荷重をモデル上面に設定した。本解析では、地山強度比が 1.0 となる地山を想定しており、土かぶりが 100m を超えると押出し性の現象が現れると予測し、100m とした。地山の入力定数としては、土かぶり厚さや地山強度比、地山の単位体積重量より地山の一軸圧縮強さを算定（表-1）し、この一軸圧縮強さより、変形係数、粘着力、内部摩擦角を算出した。ちなみに、本解析における地山は、弾完全塑性体的な挙動を呈し、降伏基準はモール・クーロンの破壊基準を用いた。初期応力解析の鉛直方向初期応力は、地山の単位体積重量に土かぶり厚さをかけたものとし、水平方向初期応力は、鉛直方向初期応力の 1.0 倍とした。これは、土かぶりが 70m を越えると、水平方向初期応力が 1.0 倍程度になると示された文献¹⁾があったため、これを参考にした。初期応力解析後は、トンネルの掘削を行うが、断面は 2 車線高速道路断面、閉合時期の違いは、ベンチ長を変化させることで模擬した（3m および 7m）。支保工は、吹付けコンクリート、鋼製支保工を 1m 間隔で設定した。これらを考慮した数値解析を実施し、各閉合時期での内空断面変位の違いや、切羽の押出し変位などを調べる。

図-1 は、坑口から 20m 地点における閉合距離 3m 及び 7m の時の天端・側壁方向の変位を切羽進行に伴いプロットしたグラフである。閉合距離が 3m のときの、切羽が坑口より 80m に到達したときの天端沈下と側壁変

3. 解析結果・考察

図-1 は、坑口から 20m 地点における閉合距離 3m 及び 7m の時の天端・側壁方向の変位を切羽進行に伴いプロットしたグラフである。閉合距離が 3m のときの、切羽が坑口より 80m に到達したときの天端沈下と側壁変

連絡先 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 福島工業高等専門学校 TEL 0246-46-0821

表-1 解析条件

地山強度比 Cf	単位体積重量 γ (kN/m ³)	一軸圧縮強さ qu(MPa)
1.0	20	2.0

変形係数 E(MPa)	ポアソン比 ν	内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 c(MPa)
400	0.41	20	0.15

奥行き (m)	高さ (m)	横断方向 (m)	土かぶり (m)
150	100	50	100

2車線高速道路断面 馬蹄形

上面	側面	底部
自由端	ローラ支点	上下方向固定

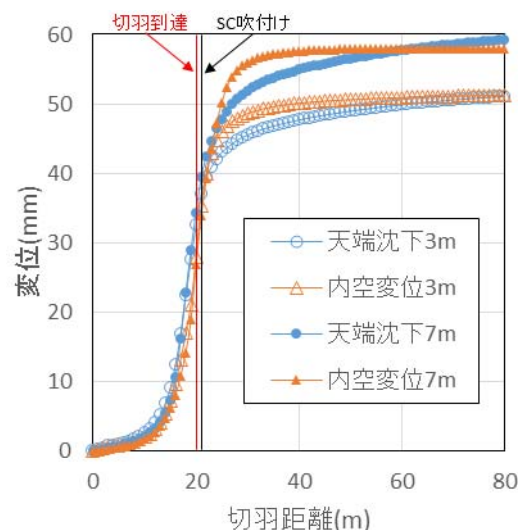


図-1 変位履歴曲線

位はどちらも 51mm となった。一方で、閉合距離 7m の同位置での天端沈下量は 59mm, 側壁の変位は 58mm となった。天端沈下, 内空変位ともに, 閉合時期を 7m から 3m に早期化することによって, 天端沈下量が 13.6%, 内空変位が 12.0%抑制できた。

図-2 は, 坑口から 20m 地点のトンネル側壁部における切羽進行に伴う最小主応力について取りまとめた図である。支保工設置後の最小主応力はトンネル内空方向となるため, 支保工設置後は支保内圧を示したものである。図に着目すると, 閉合距離が 3m および 7m とともに切羽到達までは, ほぼ同じ応力値を示した。しかしながら, 切羽通過後は閉合距離 3m の方が 7m に比べ, 最小主応力が 0.2MPa 増大することがわかる。これより閉合距離 3m の方が, 支保内圧が増大している結果となった。つまり, 断面の閉合時期を早期化すると, 支保工に有効的に地山からの荷重が伝達されていることが示唆されていることがわかる。

さらに図-3 に, トンネル周辺に生じる塑性領域(トンネル縦断方向)を示した。図-3(a)の閉合距離 3m における塑性領域は, 天端周辺が 3.7m, インバートより下部の領域に 6.1m, 切羽前方に 6.5m 生じている。対して, 図-3(b)の閉合距離 7m における塑性領域は, 天端周辺が 4.4m, インバートより下部の領域が 7.2m, 切羽前方に 6m 生じている。これより, 早期閉合することで, 支保工に有効的に地山からの荷重を伝達でき, 天端・インバートより下部領域周辺の塑性領域を抑えることができるが, 切羽前方方向の塑性領域はわずかであるが増大してしまう結果となった。

図-4 は, 坑口から 20m までトンネルを掘削したときの, 切羽前方領域の変位を示した図である。ここでの切羽押し出し変位とは, トンネル縦断方向の変位を示したもので, 切羽前方距離が 0m 地点を鏡面と表現した。閉合距離 3m と 7m のグラフを比較すると切羽前方の切羽押し出し変位に大きな違いは見られなかった。これより, 断面を早期閉合した場合, 切羽前方の緩み領域は増大するが(図-3), 切羽の安定性にはそれほど大きな変化は見られないことが予測できる。しかしながら 70mm 以上の変位が切羽近傍で生じている。切羽押し出し変位が 70mm を超えると切羽が崩壊を示した文献がある²⁾ため, このような地山条件では切羽安定対策の為の補助工法を併用する必要があると考える。

4. まとめ

本研究では早期閉合を適用すると, 有効的に地山からの荷重を支保工に伝達でき, 天端沈下・内空変位が抑制される。一方で, 切羽前方に広がる塑性領域は増大するが, 切羽の安定性を低下させるものではない。押し出し性地山においては, 切羽および内空断面の安定性確保が重要であるため, 地山状況・許容変位量に応じた支保工・補助工法の選定が重要であると考え。

参考文献 1)土屋敬: トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究, 土木学会論文集, No.364/III-4, pp31-40, 1985.

2) 田中一雄他: 切羽変位計測による切羽崩壊予測の一試み, トンネルと地下, No.27, vol.6, pp.499-504, 1996.

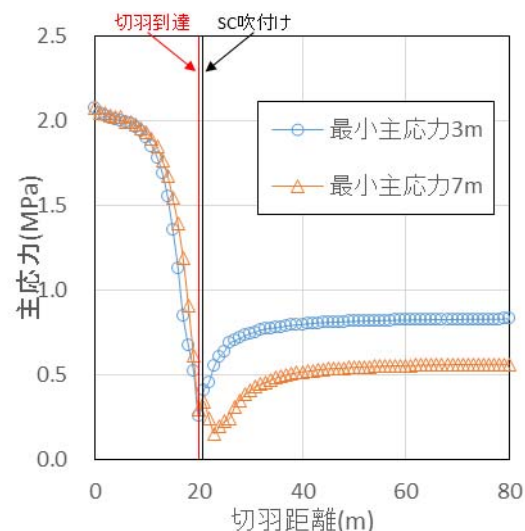


図-2 応力履歴曲線

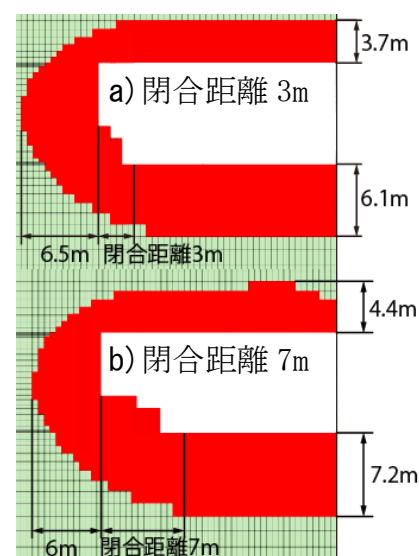


図-3 塑性領域図

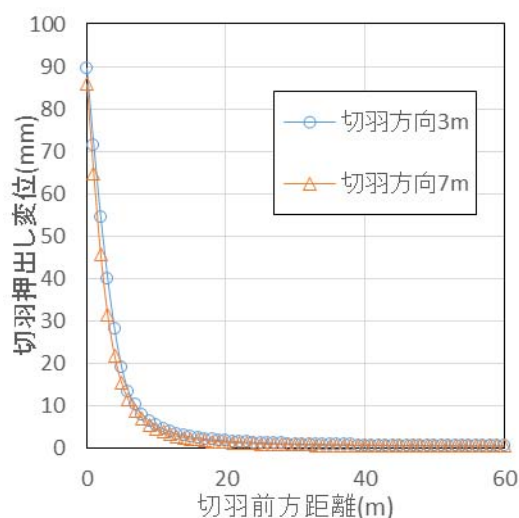


図-4 切羽押し出し変位