

押出し性地山における早期閉合トンネルに関する研究

福島工業高等専門学校 学生会員 ○菅野 蓮華
福島工業高等専門学校 正会員 林 久資

1. はじめに

初期地圧の高い押出し性地山における NATM トンネルの施工では、断面の早期閉合が有効な変位抑制対策とされている。具体的な施工事例を挙げると、北海道穂別トンネル東工事¹⁾では脆弱で自立度が低く、土かぶり 100m 相当の地山において、高耐力の二重支保工により切羽離れ最短 4m 地点で断面の閉合を行っている。このような断面早期閉合の事例はいくつか見られるものの、断面早期閉合時のトンネル周辺に及ぼす影響や、変位抑制メカニズムに関しては、未だ研究事例が少なく研究の余地がある。

本研究は 3 次元数値解析を用い、早期閉合時のトンネル周辺に及ぶ影響を解明することを目的とする。また早期閉合の長所・短所を考察し、まとめる。

2. 予備研究

早期閉合とは切羽近傍にインバートを設置し、早期に支保工を施し断面閉合を行う工法である。既往の文献では、トンネル断面の閉合時期を早めるほど支保工に有効的に内圧がかかるとされている。従って本研究では 3 次元数値解析に先立ち、Salencon の理論解を用いた解析を行った。これは等方応力地山に円形トンネルを掘削したときのトンネル周辺に及ぶ影響を算出できるもので、予備研究においては支保内圧比のパラメータを増大させることで早期閉合を模擬し、それぞれの支保内圧比におけるトンネル周辺地山の変位・塑性領域を求めた。なお支保内圧比とは、初期地圧に対する支保内圧の百分率である。

図-1 は、各地山強度比における支保内圧比と断面変形率の関係を示している。なお断面変形率とは、トンネル径に対する内空変位量の百分率である。同図に着目すると、地山強度比が 1.0, 0.75, 0.5 の場合すべてにおいて支保内圧比が大きくなるほど断面変形率が抑制されている。文献によると地山強度比が 1.0 を下回ると押出し性の現象が顕著に現れると示されていることから、この結果は、押出し性地山においては断面の閉合時期をなるべく早くする早期閉合を実施すると、断面変形率が抑制されることが示唆されるものであると考える。図-2 は地山強度比 1.0 の条件下で、壁面からの距離とトンネル内空側に生じている変位の関係を示したものである。壁面からの距離は、トンネル壁面を 0m とし、トンネル内空外側方向に距離を取得したものである。また、各支保内圧比においてトンネル断面周辺地山に広がる塑性領域の範囲も記している。この図より支保内圧比が高い場合、言い換えると早期閉合を実施するほど塑性領域が狭まり、且つ壁面の近くで変位が収束することが分かる。以上の結果から、早期閉合を実施すると、トンネル周辺に広がる塑性領域は抑制されることにより断面変形率が抑制され、安全に施工が実施できることがわかる。

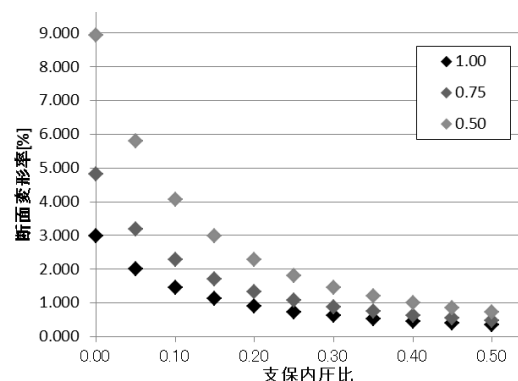


図-1. トンネルの断面変形率

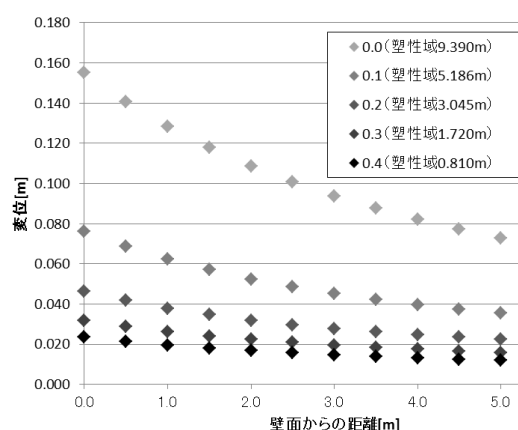


図-2 周辺地山の変位量・塑性領域

キーワード 早期閉合, 押出し性地山, NATM

連絡先 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 TEL 0246-46-0821

3. 解析手法概要

3次元数値解析にあたってFLAC3D（有限差分法）を用い、土かぶり100mの地山モデル（表-1）を作成した。解析結果は坑口より20m地点での切羽進行に伴う断面変形率に着目し、坑口より70m地点までトンネルを掘削した。掘削モデルは1mずつ逐次掘削を行い、閉合時期は5mおよび3mとした。なお閉合時期とは、切羽から最前の閉合断面までの距離をさす。

表-1. 地山モデルの入力定数

地山強度比	変形係数 (kN/m^2)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m^3)	粘着力 (kN/m^2)	内部摩擦角 ($^\circ$)
Cf	E	ν	γ	c	ϕ
1.0	400000	0.41	20	150	20

4. 解析結果

図-3に閉合時期5mおよび3mの早期閉合を模擬したトンネルおよび同地山条件下で早期閉合を行わないトンネル（ショートベンチカット工法、ベンチ長10m）の解析結果を示す。図-3は坑口より20m地点の側壁部における切羽進行に伴う断面変形率を示したものである。

はじめに、閉合時期5mの早期閉合トンネルと早期閉合を行わないトンネルの変形を比較する。早期閉合を行ったモデルの方が、切羽到達地点（切羽離れ0m地点）の断面変形率、言い換えると先行変位が小さい。その後切羽がさらに進行すると断面変形率は徐々に収束に至るが、収束時の断面変形率を比べても、早期閉合しない場合は1.110%であるのに対し、早期閉合した場合は0.849%となり、約0.3%の断面変形率を抑制していることがわかる。また、断面変形率の収束時期に着目すると、早期閉合しない場合、断面変形率は切羽離れ25m地点で一定値に漸近している。対して早期閉合した場合は、断面変形率は切羽離れ10m地点で一定値に漸近している。従って、早期閉合を実施する断面変形率は早期に一定値に収束し、トンネル壁面の変位抑制効果を発揮していることがわかる。

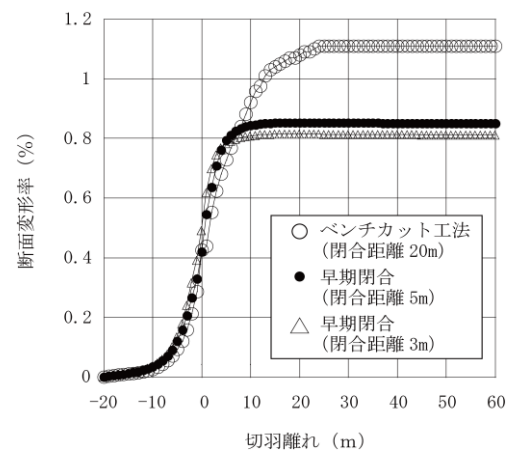


図-3 変位履歴曲線

つぎに、閉合時期5mの早期閉合トンネルとさらに閉合時期を短くした閉合時期3mの早期閉合トンネルの変形を比較する。閉合時期3mのトンネルにおいて変位収束後の断面変形率は0.811%まで減少した。前述の早期閉合を行わないトンネルにおける変位収束後の断面変形率を100とすると、早期閉合による抑制率はそれぞれ76.5%、73.1%である。閉合時期を3mに短くすることで、5mの結果と比べ断面変形は若干抑制されているものの、実際の変位差は2mm未満で、これではモデルの地山に対して効果的であるといえない。より軟弱な地盤でなければ、閉合時期を5mから3mに早めることによる効果は大きく現れないと考えられる。

変位抑制効果の得られたモデルのうち、閉合時期5mのトンネルについて、さらにトンネル周辺の塑性領域に注目した。早期閉合を行うことで、トンネル天端上部の塑性領域は4.4mから3.7mまで、インバートより下部の塑性領域は8.4mから6.1mまで抑制される。トンネル周辺のゆるみ域の抑制は押出し変位の抑制に繋がるため、これも早期閉合による一つの利点である。しかしながら早期閉合したモデルでは早期閉合しない場合と比べ、切羽前方の塑性領域は5.5mから6.0mへ約8.3%広がっている。すなわち、閉合時期をむやみに短くすることは切羽の安定性に悪影響を及ぼす可能性があると考えられたため、地山条件や許容変位量に応じた適切な閉合時期や切羽安定対策を選定することが重要であると考えた。

5. まとめ

本研究の結果から、閉合時期を早め続けても変位抑制効果は頭打ちとなることが予想される。また、切羽前方の塑性領域が広がることで断面崩壊を引き起こす恐れや、支保工にかかる圧力が過大となる可能性もある。従って対象の地山条件に合わせて効果的な閉合時期を、総合的に見定めなくてはならない。

参考文献

- 1) 高橋俊長, 向井隆, 井上孝俊, 垣見康介: 高耐力支保による早期閉合で押出し性地山に挑む, トンネルと地下, Vol.41, No.1, pp.15-25, 2010.