

## トンネル掘削における早期閉合および断面形状に関する一考察

大成建設(株)土木本部土木設計部 正会員 ○長田 翔平・市田 雄行・小原 伸高

### 1. はじめに

不良地山における山岳トンネルの近年の実績では、切羽から比較的近い位置にてトンネル断面を閉合する場合（以下、早期閉合）が多く、また早期閉合と併せて断面形状を円形に近づけた事例も見られる。これらの対策は、従来から経験的にトンネルの安定性を確保する上で効果的な方法として考えられてきた。そこで、本稿では、当工法によるトンネルの安定性を数値解析により定性・定量的に把握するとともに、その有用・適用性に関して考察を述べる。

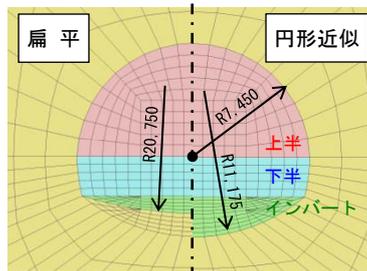


図-1 トンネル断面形状

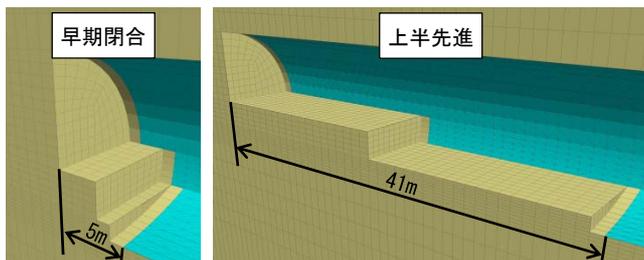


図-2 閉合距離

### 2. 3次元解析

#### 1) 解析条件

早期閉合あるいは断面形状を円形に近づけたことによるトンネルの安定性を評価するために、断面は扁平および円形に近い 2 種類の形状を考え、また加背割りは上半、下半、インバートとし、閉合距離を 5m と 41m とした二つの場合を考える（図-1、図-2 参照）。解析条件は表-1 に示すとおりとし、解析コード FLAC3D による 3 次元掘削解析を実施する。解析ケースは、前述の閉合距離と断面形状の組合せより 4 タイプを考え、各タイプにて土被りを変化させることで地山強度比 0.1, 0.25, 0.5, 1.0 となる 4 ケースの荷重条件を設定した。

表-1 解析条件

| 解析モデル        | 地山                                 |                   | ソリッド要素(弾塑性)       |                        |
|--------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
|              | 吹付けコンクリート                          | 鋼製支保工             | シェル要素(弾性)         | ビーム要素(弾性)              |
| 初期応力         | 側圧係数1.0として、各地山要素の土被り相当の土圧を作用       |                   |                   |                        |
| 掘削手順         | 閉合距離を保ちながら、各切羽にて同時に1m掘削→支保工設置を繰り返す |                   |                   |                        |
| 地山物性値        | 単位体積重量 $\gamma$                    | MN/m <sup>3</sup> | 0.026             |                        |
|              | 変形係数 D                             | MN/m <sup>2</sup> | 500               |                        |
|              | ポアソン比 $\nu$                        | -                 | 0.3               |                        |
|              | 粘着力 c                              | MN/m <sup>2</sup> | 1.0               |                        |
|              | 内部摩擦角 $\phi$                       | °                 | 30                |                        |
| 支保工物性値       | 吹付けコンクリート                          | 弾性係数 $E_c$        | MN/m <sup>2</sup> | 3,400                  |
|              |                                    | 厚さ t              | m                 | 0.3                    |
| 鋼製支保工(H-250) | 鋼製支保工                              | 弾性係数 $E_s$        | MN/m <sup>2</sup> | 20,000                 |
|              |                                    | 断面積 A             | m <sup>2</sup>    | $9.143 \times 10^{-3}$ |
|              |                                    | 断面2次モーメント I       | m <sup>4</sup>    | $1.070 \times 10^{-4}$ |

※地山の破壊基準は、モール・クーロンの降伏基準とする

#### 2) 解析結果

##### ① トンネル変形量

天端沈下量と SL から 1.0m 上の位置の水平変位量を図-3 に示す。両者ともに地山強度比が小さいほど、早期閉合時では上半先進時と比べて、変位量が小さくなる傾向が見られる。特に水平変位は、早期閉合による変位抑制の効果が大きい。一方で、トンネル断面形状の違いによる変形量の差異は極めて微小である。

##### ② 地山の塑性領域

掘削後の地山の応力状態として、地山強度比 0.1 のケースにおける最大主応力コンター図を、図-4 に示す。弾塑性境界における応力レベルは 50MN/m<sup>2</sup> 相当であり、この境界部より内側を塑性化された範囲として評価す

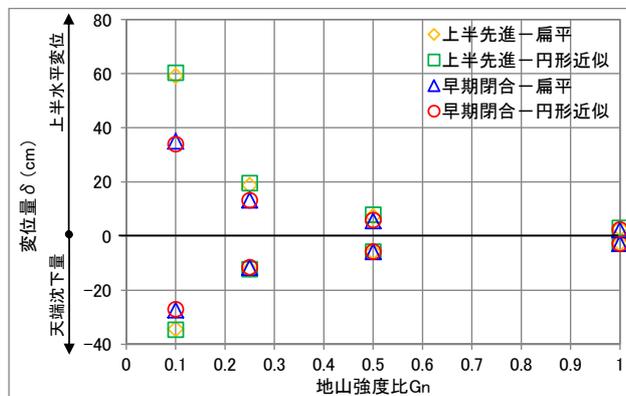


図-3 トンネル変形量

キーワード 3次元解析 早期閉合 断面形状

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル) 大成建設株式会社 TEL 03-5381-5296

ると、上半先進時と比較して早期閉合時の場合では、塑性領域は広域に進展していない。ただし、早期閉合時は下半とインバート接続部周辺に応力集中が見られる。また、変形量と同様に断面の形状による塑性領域の違いは見られない。

③吹付けコンクリートの軸力

地山強度比 0.25 のケースにおける吹付けコンクリート軸力分布を、図-5 に示す。最大軸力に着目すると、上半先進時に対して早期閉合時では、僅かであるが 1MN 程度減少している。ただし、支保工全周に軸力が均等に生じていることから、変形を効果的に抑制できるものと考察され、この効果は前述の変形量の比較結果と一致する。なお、断面形状の違いによる、最大軸力の変化は極めて微小である。

④鋼製支保工の曲げモーメント

早期閉合時では、下半とインバート接続部周辺の地山に応力集中が見られたことから、鋼製支保工に大きな曲げモーメントが生じることが懸念される。ここで、早期閉合時の鋼製支保工の曲げモーメント図を、図-6 に示す。なお、接続部の結合条件として剛結合およびピン結合の 2 ケースを想定した。接続部を剛結合とした場合では、接続部に発生する曲げモーメント(地山側凸)は扁平断面から円形に近づけることで、25%程度低減されている。さらに、この曲げモーメントにより接続部のボルト等に変状が生じた場合は、結合状態は剛結合からピン結合に移行するものと考えられる。この場合、解析結果ではインバート端部に曲げモーメント(内空側凸)が卓越する傾向が見られ、断面を円形形状に近づけることで、曲げモーメントは 45%程度低減されている。

3. まとめ

数値解析により、地山強度比が小さい条件に限定すれば、早期閉合による掘削は、上半先進時と比較してトンネル変形を抑え、かつ地山の塑性化を防ぐ効果が高いことが確認された。また、早期閉合時では下半とインバートの接続部において、鋼製支保工に大きな曲げモーメントが発生するが、その低減処置として断面形状を円形に近づけることは非常に効果的である。

さらに、トンネル断面を円形に近づけるメリットとして、インバート部のトンネル内圧を増加させインバート下部の地山を 3 軸状態に保つことで強度低下を防止することや、地山との接地面積が拡大することでトンネルの沈下を抑制する効果などが期待できるものと考えられる。今後は、これらの効果についても、数値解析により定性・定量的に把握することで、不良地山におけるより合理的な掘削工法について検討を進めていきたい。

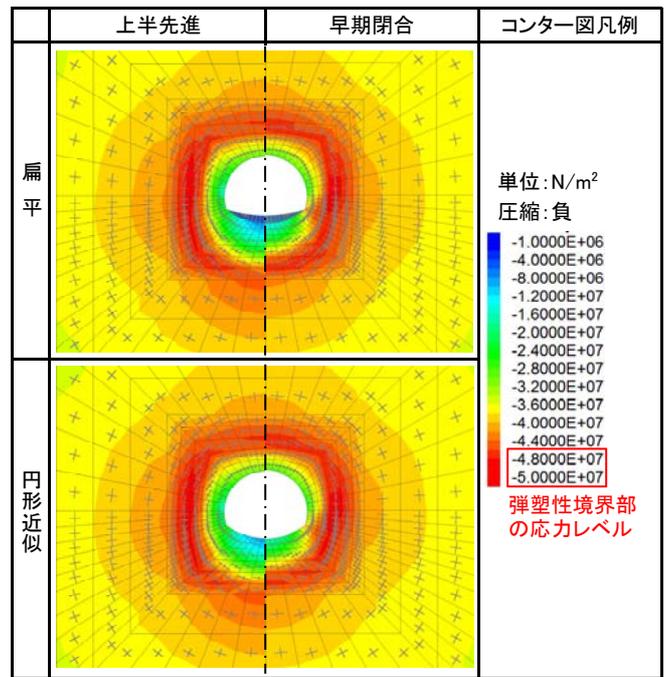


図-4 最大主応力コンター図 (地山強度比 0.1)

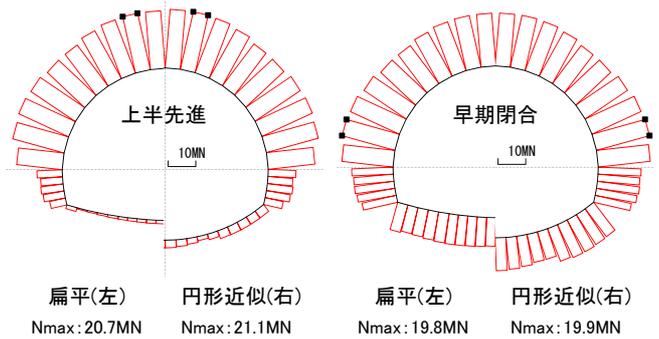


図-5 吹付けコンクリート軸力図 (地山強度比 0.25)

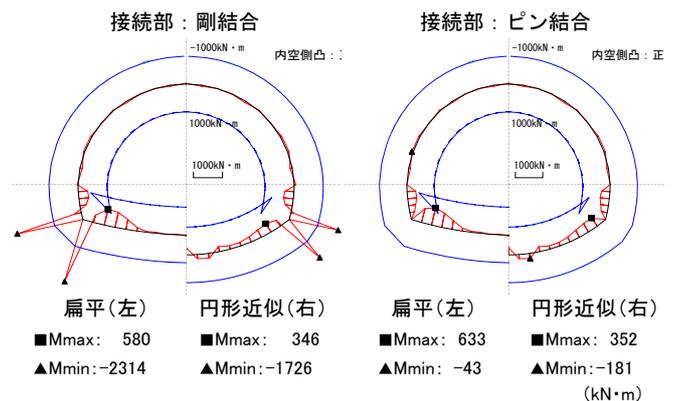


図-6 鋼製支保工曲げモーメント図 (地山強度比 0.25)