

押出し性地山条件下におけるトンネル断面形状と側圧係数の関係

清水建設株式会社 正会員 ○今里 光紀，長谷 陵平，淡路 動太

1. 背景および目的

押出し性地山条件下では、トンネル内空方向へ生じる大きな変位に対して、トンネル構造体の安定性を確保するために、トンネル断面形状をより円形に近づけ、剛な支保工で全周を囲みリング構造とすることがある。Imasato & Awaji¹⁾は、押出し性地山条件下におけるトンネル断面形状と支保部材発生応力の関係性を検証するために、二次元有限要素法により数値解析を行った。その結果、トンネル断面形状が扁平な場合、隅角部にて最大圧縮応力が集中し、トンネル支保部材の耐力を十分に使いきれないまま設計基準強度を超過する傾向が示され、実際に施工する際は隅角部周辺の変状発生状況を重点的に監視する必要があることを指摘している。ただし、これらの検討では、側圧係数(K_0)が 1.0 となる限定的な条件下での均質地山を想定した数値解析であったため、本稿では、側圧係数を変化させた解析ケースの追加検討を行い、土被りに応じたトンネル断面形状と側圧係数の関係について考察を行う。

2. 数値解析

1) 解析方法

本検討では、二次元有限要素法 (GTS NX : Midas 社製) により数値解析を行った。図-1 に解析モデルを示す。解析では、大断面道路トンネルで一般的な掘削径 13.4 m、土被りをそれぞれ 100 m、150 m、200 m、250 m、地山は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性体の 1 層構造とした。

図-1 に解析に用いたトンネル断面形状(R)を示す。ここに、 R =インバート半径/アーチ半径と定義する。トンネル断面形状は R を 3.0~1.0 と変化させた。また、表-1 に解析に用いた地山物性値、表-2 に各支保部材の物性値を示す。本解析での地山物性値は、トンネル数値解析マニュアル²⁾における DII に相当する値を採用し、吹付けコンクリートは面要素でモデル化し、設計基準強度は 36 N/mm² とする。さらに、鋼製支保工はビーム要素でモデル化し、SS400 の H200 相当を用いるものとする。

2) 解析ステップ

解析ステップは、Step-1 は初期応力状態とし、Step-2 は全断面掘削、Step-3 は上下半支保建込み、Step-4 はインバート支保建込みの全 4 ステップとする。また、各ステップにおける応力解放率は、Step-2 で 40 %、Step-3 で 5 %、Step-4 で 55 % とする。

3. 数値解析結果および考察

1) トンネル断面形状と側圧係数の関係

図-2 に側圧係数 K_0 =0.5, 1.0, 1.5 における土被り 200 m 時の吹付けコンクリートに発生する最大圧縮応力のコンター図を示す。

R =3.0, 2.0, 1.5 の場合、 K_0 の大きさによらず、最大圧縮応力の発生箇所がインバートの接続部周辺に存在している。これは、トンネル断面形状が扁平であるほど、インバートの接続部周辺での曲げ圧縮応力が大きくなるためである。また、このとき、アーチ部に発生する曲げモーメントは小さくなり、最大圧縮応力は相対的に小さくなるため、トンネル支保部材が持っている耐力を残したまま、インバート接続部周辺で設計基準強度を超過している。

キーワード 押出し性地山，山岳トンネル，トンネル断面形状，側圧係数

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2 丁目 16-1 清水建設(株) 地下空間統括部 TEL03-3561-3887

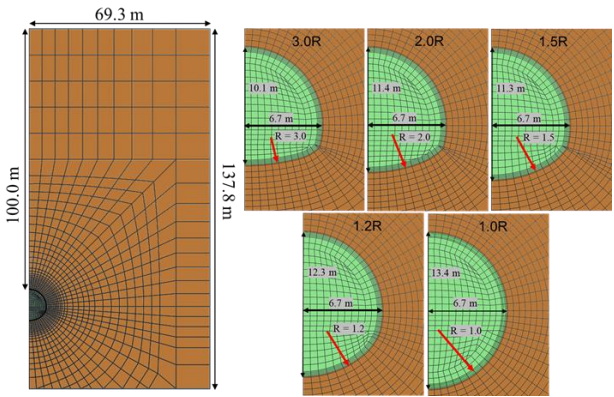


図-1 解析モデル

表-1 地山物性値

要素タイプ	Solid Mohr-Coulomb
単位体積重量(kN/m ³)	21
弾性係数(MPa)	150
ポアソン比(-)	0.3
粘着力(kN/m ²)	200
内部摩擦角(°)	30
引張強度(kN/m ²)	40

表-2 各支保部材の物性値

	吹付け コンクリート	鋼製支保工
要素タイプ	Solid	Beam
単位体積重量(kN/m ³)	23	78.5
弾性係数(MPa)	6000	200000
ポアソン比(-)	0.2	0.3
粘着力(kN/m ²)	8400	-
内部摩擦角(°)	40	-
引張強度(kN/m ²)	2500	-
仕様	t=400mm	SS400, H200

一方、 $R=1.2, 1.0$ の場合、 $K_0=0.5, 1.0$ では最大圧縮応力の発生箇所はインバート接続部であるが、その最大値は相対的に小さくなっており、吹付けコンクリート内で全周に渡って均質に曲げ圧縮応力が発生している。これは、 R が大きい場合に比べ、トンネル支保部材の持つ耐力を十分に使い切れていることを示している。さらに、 $K_0=1.5$ では最大圧縮応力の発生箇所が天端付近に移行している。これは、 K_0 が大きくなるにつれ、横方向の応力が卓越する変形モードとなるためであると考えられる。

2) 土被りの変化に対するトンネル断面形状と構造安定性の関係

図-3 に土被りの変化に対する断面形状 R ごとの吹付けコンクリートに発生する最大圧縮応力を示す。

$K_0=0.5, 1.0, 1.5$ のすべてのケースにおいて、土被りの上昇に伴い、最大圧縮応力は上昇している。 $K_0=0.5$ の場合、全ての R における最大圧縮応力の上昇率（グラフの傾き）に大きな差は認められない。これは、 R が大きい場合であっても、支保部材を厚くするなどの対応により耐力をあげることで、 R を小さくする場合と同等の効果が得られることを示唆している。

$K_0=1.0, 1.5$ の場合、 R が大きくなると、土被りの上昇に伴い最大圧縮応力の上昇率（グラフの傾き）が大きくなる。これは、 R が大きい場合、土圧および K_0 の増大に対して、支保部材を厚くすることは効果的でなく、 R を小さくすることが、トンネル構造の安定性向上に有効であることを示唆している。

ただし、 $K_0=1.5$ では土被りが 250 m 時、 $R=1.2$ と $R=1.0$ を比較すると、 $R=1.0$ の方が最大圧縮応力が大きい結果となっている。これは、土圧および K_0 が極端に大きい場合、掘削高さが高い $R=1.0$ では側圧が大きくなるためと考えられる。したがって、 K_0 が大きい条件下では必ずしも、 R が小さいことがトンネル構造的に最適とはならない可能性を示唆している。

以上より、押出し性地山条件下において、合理的なトンネル断面形状の設計を行う際は、変形モードや側圧係数を考慮して最適な R を選択することが重要であることが明らかとなった。

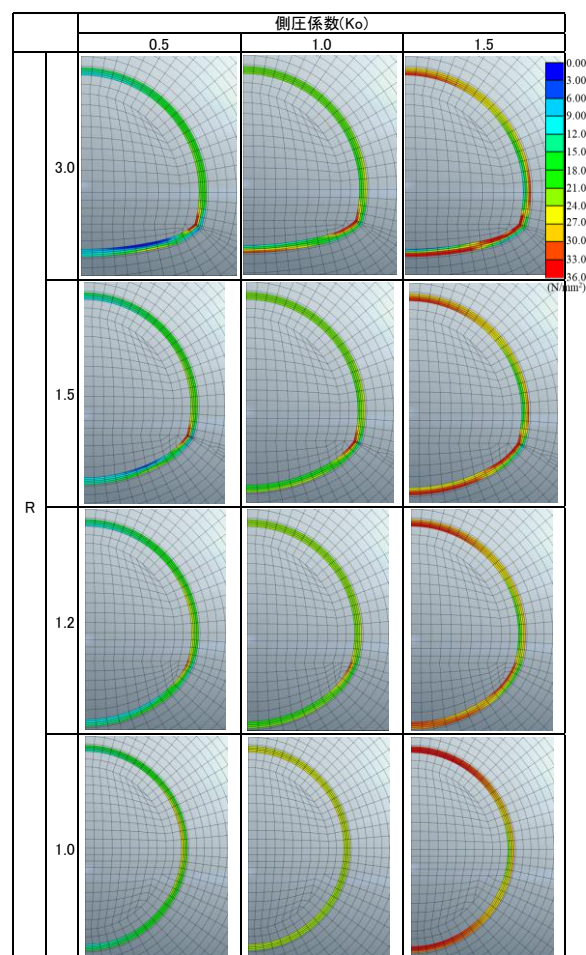


図-2 最大圧縮応力コンター図

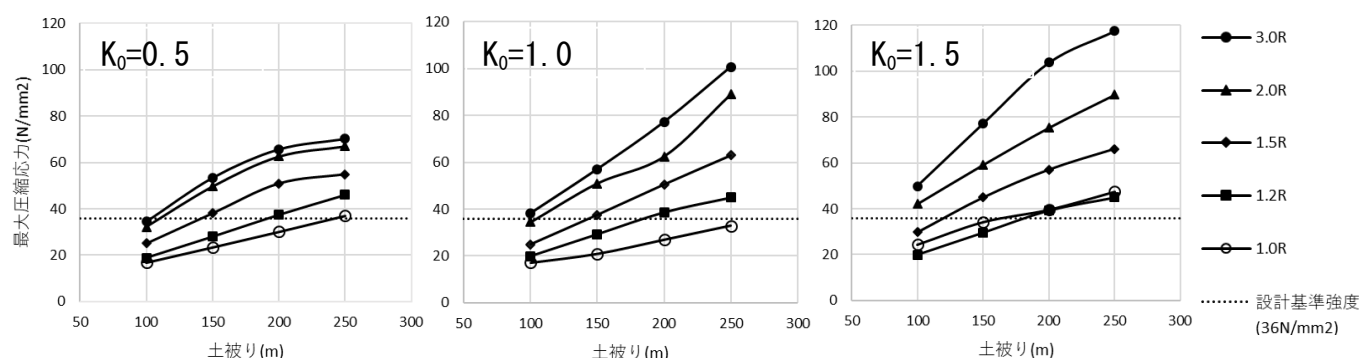


図-3 各土被りにおけるトンネル断面形状ごとの最大圧縮応力

参考文献

- 1) Mitsunori Imasato, Dohta Awaji : The Relationship between Tunnel Cross-sectional Geometry and Support under Squeezing Ground Condition in Conventional Tunneling,YSRM2019&REIF2019,1-4 December,2019.
- 2) 日本道路公団試験研究所編：試験研究所資料第 358 号・トンネル数値解析マニュアル，日本道路公団，平成 10 年 10 月