

# 有限要素法によるトンネル覆工の最適断面形状に関する研究

京都大学 学生会員 ○ Narentorn YINGYONGRATTANAKUL  
 京都大学 フェロー 足立紀尚  
 京都大学 正 会 員 建山和由

## 1. はじめに

最近の道路トンネルでは、三車線以上に対応できる幅をもった超大断面トンネルが設計・施工されている。これらのトンネルでは建築限界を満たしつつ掘削土量の減少をはかるために、一般に馬蹄形断面が採用される。特にシールド工法で施工する場合、その覆工形状については多くの検討課題を残している。この点に関し著者は、馬蹄形断面トンネルの模型実験により、覆工形状と覆工断面力の関係について考察を行った<sup>1)</sup>。本研究では、有限要素法に基づいて最適解析手法を用いて、馬蹄形トンネルの覆工断面の最適形状について検討を行う。

## 2. 解析方法

図-1 に解析メッシュと境界条件を示す。本稿における解析は図-1 の様なメッシュに分割して、地盤材料の自重を載荷させる。コンクリート製の覆工と地山の物性値を表-1 に示す。図-2 に示すように、トンネル覆工部分は  $c1$ ,  $c2$ ,  $c3$ ,  $c4$  の4種類の境界線により表現される。カーブ  $c1$  が楕円弧、 $c2$  と  $c4$  が線形、 $c3$  が線接点  $po1$ ,  $po2$  ...,  $po13$  を通るスプライン関数で定義される。一般にトンネル内空断面は建築限界によって決定されるため、本解析ではトンネル覆工断面の内側( $c1$ )を固定し、外側( $c2$ ,  $c3$ ,  $c4$ )の形状のみを変動させ覆工の最適形状を算定する。すなわち、解析では  $pi1$ ,  $pi2$  と  $pi3$  を不動点、また、 $po1$ ,  $po2$  ...,  $po13$  を可動点とし、それらは動径方向に移動して設定し得るとした。各可動点の移動に伴って  $c2$ ,  $c3$  および  $c4$  の境界曲線も移動し、これにより種々のトンネル覆工形状が設定される。前述のように設計変数は接点  $po1$ ,  $po2$  ...,  $po13$  の座標であり、各可動点は  $-0.2m \sim +0.2m$  の間で変動可能である。なお、変動距離が負とは、トンネル覆工の内側方向に可動点が移動することを意味する。

本解析は、可動点の移動により覆工に発生する最大主応力を最小にするように目的関数を設定し最適な覆工形状を求める。解析では引張り応力を正の値と設定しており、各要素に発生する正の最大主応力と最大引張り応力は等しい。コンクリート構造物は引張り応力に弱く、その引張り応力を最小化することが、この目的関数の意味するところである。また、制約条件は覆工に発生する最大圧縮応力と最大せん断力であり、セグメントに用いるコンクリートの許容曲げ圧縮応力度 ( $18.0 \text{ MPa}$ ) と許容せん断応力度 ( $7.4 \text{ MPa}$ )<sup>2)</sup> を超えないように設定された。さらに、変動させる覆工形状の断面積が初期状態の断面積よりも小さくなるという条件も考慮した。

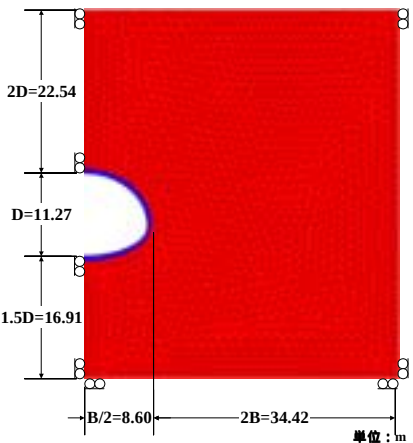


図-1 解析メッシュおよび境界条件

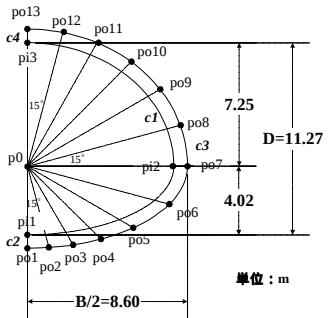


図-2 トンネル覆工の解析モデル

表-1 材料の物性値

|    | 単位体積重量<br>$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$ | 弾性係数<br>$E \text{ (MPa)}$ | ポアソン比<br>$\nu$ |
|----|--------------------------------------------|---------------------------|----------------|
| 地盤 | 19                                         | 280                       | 0.40           |
| 覆工 | 26                                         | 39000                     | 0.17           |

キーワード: シールドトンネル, 馬蹄形トンネル, 覆工, 有限要素法, 最適解析  
 連絡先: 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科  
 土木工学専 門 TEL:075-753-4788

解析の流れを図-3に示す。まず、解析メッシュを作成して弾性FEM解析を行う。次に、感度解析により、FEM解析上の剛性マトリクスをすべての設計変数の関数にする。そして、逐次線形計画法とシンプレックス法を用いて、最適解析を行って、最適な設計変数(可動点の座標)を計算する。最後に解析結果の収束性を得るため、1%以内の差異になるまで計算を繰り返す。

### 3. 解析結果と考察

初期状態および最適状態の覆工を図-4に示す。最適な形状では、覆工のインバート部とスプリングライン部の厚さが初期状態の場合よりも増加している。しかし、上半部は初期状態より覆工の厚さは大きく減少している。また図-5より、目的関数、すなわち引張り応力が減少していることから、解析後の方が、覆工状態が良くなっていることがいえる。なお、図-6に表すように最適状態は圧縮応力とせん断応力に対して初期状態より安全であることがわかる。図-7より、最適形状の断面積は初期状態から3.4%程度削減されている。以上の結果からトンネル覆工の断面積を増加させずに、最大引張り応力を小さくすることは可能であることから、最適な断面形状を用いることによって、安全性を高めることが可能である。著者の模型実験では天端部の覆工厚さを小さくし、インバート部とスプリングライン部を厚くする覆工のパターンにおいて、覆工に発生する引張りひずみに対して最も安全な形状である結果を得ている。この結果は本解析結果と同様の結果を示している。

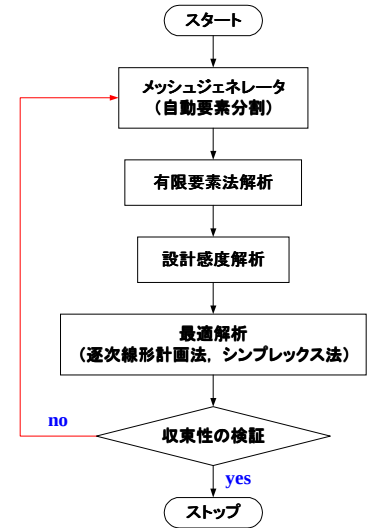


図-3 最適解析プログラムの流れ

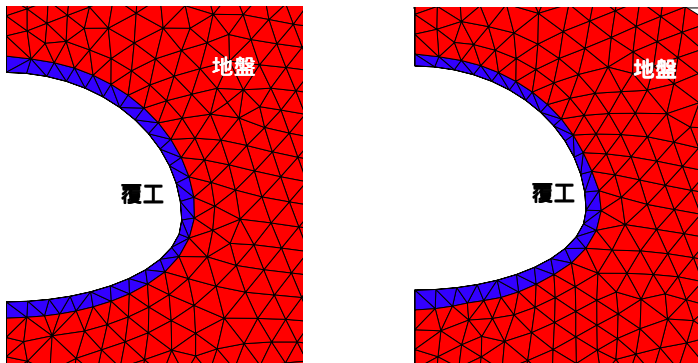


図-4(a) 初期状態

図-4(b) 最適状態

### 4. まとめ

1. 本研究の解析手法により、トンネル覆工断面の最適形状を探索することが可能である。
2. トンネル覆工の断面積を増加させず、最適な断面形状を用いることによって、トンネル覆工の安全性を高めることが可能である。
3. 覆工の厚さを部分的に変化させることで、安定かつセグメントの使用量を削減した経済的なトンネル断面を造ることが可能であるといえる。

### 参考文献

- 1) Yingyongrattanakul, N., 足立紀尚, 建山和由, 倉橋実: 馬蹄形断面シールド工法における覆工形状に関する研究, 第36回地盤工学研究発表会, 2001.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, p63-65, 1996.

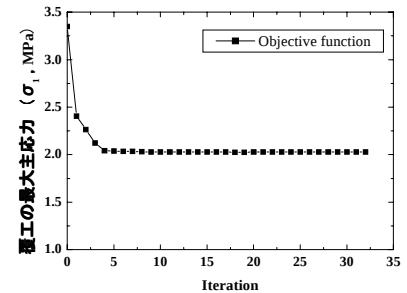


図-5 目的関数

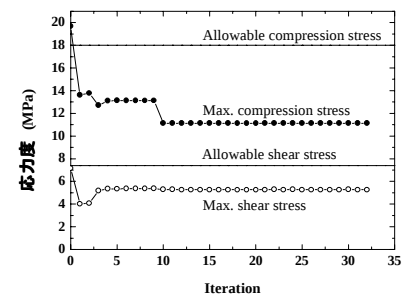


図-6 制約条件 : 応力度

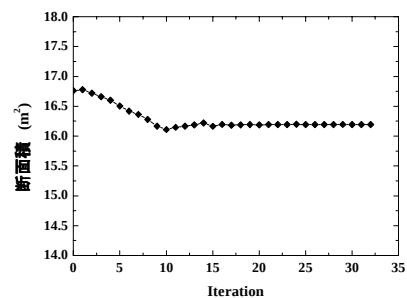


図-7 制約条件 : 断面積