

トンネル覆工の最適断面形状に関する基礎的研究

京都大学 学生会員 ○Yingyongrattanakul NARENTORN
 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、3車線以上に対応できる幅をもった大断面トンネルが設計・施工されている。このような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、一般に扁平な断面形状が採用される。特にシールド工法でこの扁平トンネルを施工する場合、その覆工形状については多くの検討課題を残しており、この点に関し倉橋らは、異形断面トンネルの模型実験により、覆工形状と覆工構造に作用する応力の関係について考察を行った¹⁾。本研究では、有限要素法による数値解析を用いて、扁平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に示すように、対称性を考慮して、トンネル覆工全体の1/4周部分を解析領域とする。また、トンネル覆工に対する表面力として鉛直および水平方向に等分布荷重を作用させる。ただし、水平荷重(P_x)は鉛直荷重(P_y)の半分と設定した。なお、物体力は考慮しない。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。このとき、各境界線は表-1に示すように接点($p1, p2, \dots, p12$)を通る関数で定義される。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を固定し、外側の形状のみを変動させる計算を行う。すなわち、計算では、 $p2$ と $p5$ を不動点とし、また、 $p3, p4, p6 \sim p12$ 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。

覆工形状の最適化については種々の検討方法があるが²⁾、本解析では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下で、式(1)で表される最大 von Mises の接点応力を最小にするような覆工形状をもって最適形状とし、計算には構造形状の最適化コード ODESSY³⁾を使用した。

$$\text{von Mises の応力 (2次元)} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2}} \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、 σ_1 および σ_2 はそれぞれ各接点における最大主応力および最小主応力である。

解析手順を以下に示す。

- 1) 初期状態（覆工断面形状や応力分布など）を与える。
- 2) 初期状態において von Mises の応力が大きい位置では覆工厚さを増加させ、逆にこれが小さい位置では覆工厚さを減少させるように各可動点を移動させる。
- 3) FEM メッシュを再分割して応力分布を計算する。
- 4) 最大 von Mises の接点応力が一定値に収束するまで計算を繰り返す。

本解析におけるパラメータは倉橋らの異形断面トンネル模型実験¹⁾における覆工の特性および荷重条件から決定した。図-2は模型実験で使われた扁平トンネル模型の断面形状を示す。実験では覆工材として発泡スチロールが用いられ、その物性値は $E = 3900 \text{ kN/m}^2$, $\nu = 0$ であった。また、荷重条件は $P_y = 12 \text{ kN/m}$, $P_x = 6 \text{ kN/m}$ である。各可動点は、 $-10 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}$ の間で von Mises の応力の大きさに応じて変動させた。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。

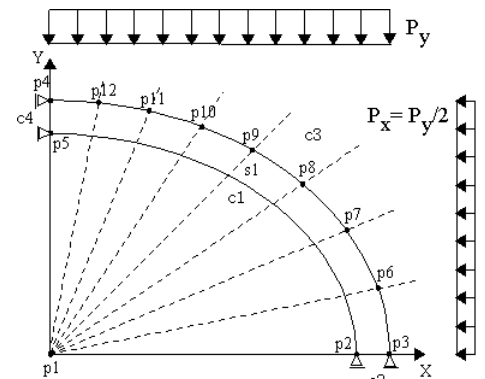


図-1 トンネル覆工の解析モデル

表-1 境界線と接点の関係

境界線	接点	関数
c1	p1, p2, p5	楕円弧
c2	p2, p3	線形
c3	p3, p6, p7, p8, p9, p10, p11, p12, p4	スプライン曲線
c4	p4, p5	線形

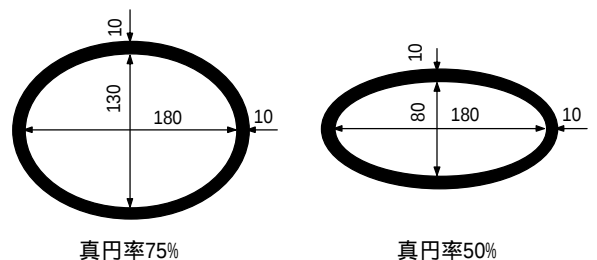


図-2 トンネル模型形状

3. 解析結果と考察

計算結果を図-3 および図-4 に示す．各図の(a)は初期状態であり，(b)は最適状態である．図中の真円率はトンネル幅に対するトンネル高さの比を意味する．これらの図から，以下のことがいえる．真円率 50%，75%のいずれの場合においても，最適状態においては，覆工側壁部の厚さが初期状態の場合よりも増加しているのに対して， x 軸から 25° 以上の範囲では初期状態の場合よりも覆工厚さは小さい．特に $30^\circ \sim 55^\circ$ の範囲における覆工厚さは大幅に減少しており，初期覆工厚さの 40%～50%程度となっている．また，最適状態における覆工断面積はいずれも初期状態における覆工断面積とほぼ同じである．

最大 von Mises の接点応力と計算ステップの関係を図-5 に示す．この図から以下のことがいえる．すなわち，いずれの場合においても計算ステップが 15 回目までに接点応力が収束している．なお，収束値は，真円率 75%の場合には 956 kN/m^2 ，真円率 50%の場合には $1,176 \text{ kN/m}^2$ であり，最大 von Mises の接点応力は両者とも初期状態の場合から約 44%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 von Mises の接点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できると思われる．前述の倉橋らの模型実験では天端部の覆工厚さを小さくし，側壁付近を厚くする覆工のパターンにおいて，覆工に発生する引っ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．

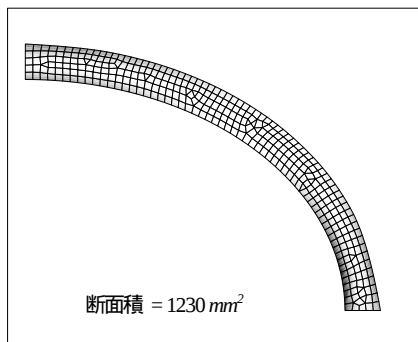


図-3(a) 真円率 75%トンネルの初期状態

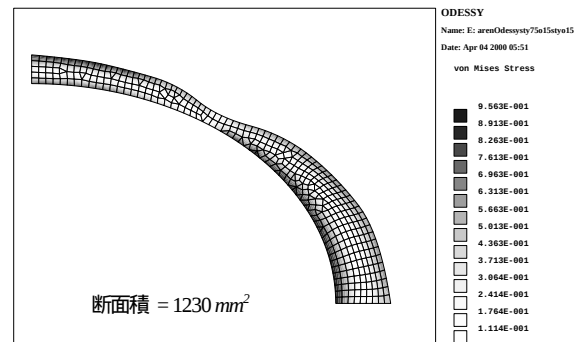


図-3(b) 真円率 75%トンネルの最適状態

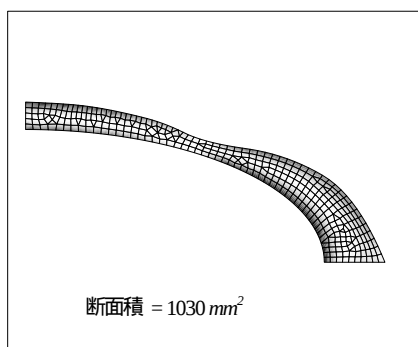


図-4(a) 真円率 50%トンネルの初期状態

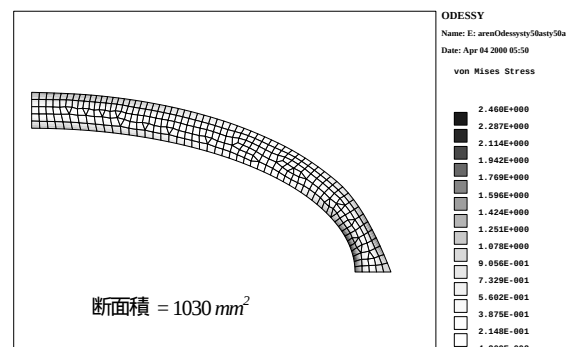


図-4(b) 真円率 50%トンネルの最適状態

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できる．
- 2) 応力集中する位置の覆工厚さを大きくし，応力集中が小さい位置での覆工厚さを小さくすることにより，力学的に最適な覆工断面形状が得られる．
- 3) トンネル覆工の断面積を減少させず，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できる．

参考文献

- 1) 倉橋実，建山和由：偏平シールド工法のセグメント覆工における実験的研究，平成 12 年度土木学会関西支部年次学術講演概要，2000．
- 2) 櫻井義之：境界要素法による最小コンプライアンス形状の探索について，京都大学工学研究科修士論文，2000．
- 3) ODESSY: The Optimum DESign SYtem, Inst. of Mechanical Eng., Aalborg Univ., Denmark.

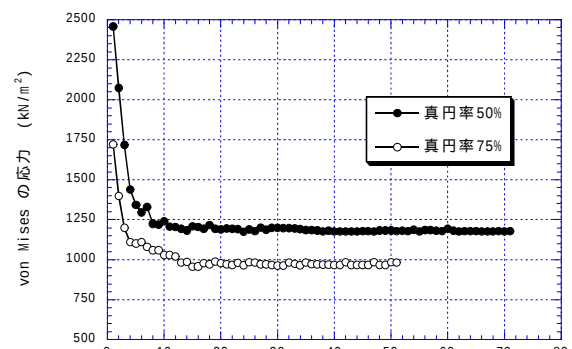


図-5 最大 von Mises の接点応力と計算ステップの関係