

# 低強度地山におけるトンネルの最小掘削設計法の提案

梨本 裕\*・高森貞彦\*\*・今田 徹\*\*\*

NATMでは、比較的良好な地山に対して標準支保パターンが作成され、広く利用されているが、低強度地山に対してはその作成がまだ課題として残されており、試行錯誤の設計施工を余儀無くされている。本論文では、このような低強度地山におけるNATMの設計法の確立を目的として、地山特性曲線から得られる最小掘削範囲を設計目標とする設計法を提案し、実際の施工への適用性を検討した。そして、この設計法の汎用性を向上させるためにはFEMの利用が必要不可欠なので、この点も検討した。

**Keywords :** ground characteristic curve, minimum excavation limit minimum support pressure, low strength ground, NATM

## 1. はじめに

NATMは、わが国に導入されて以来、わが国の地質条件に合うよう技術的研究開発が進められ、山岳トンネルだけではなくその他の地下空間開発においても標準工法として採用されるようになった。しかし、比較的良好な地山に対しては標準支保パターン<sup>1)</sup>が作成されたものの、地山強度比が小さい低強度地山に対してはその作成がまだ課題として残されており、試行錯誤の設計施工を余儀無くされている。このような地山はシールド工法との境界領域<sup>2)</sup>でもあり、設計法の確立が望まれている。

NATMでは、地山の変位を適度に許せば支保の規模を最小・最適にでき、地山特性曲線上の最小支保圧<sup>3)</sup>がその目標点であると言われてきた。しかし、その存在は経験的には認められているものの、理論的な裏付けが十分になされているとは言えないのが現状である。しかも、トンネルの経済性は支保の規模だけで決まるのではなく、掘削量も大きな要因になる。

コンクリートによる覆工だけで支保するトンネルを想定した場合、施工の経済性は掘削と覆工に支配され、掘削量が少なければ少ないほど、覆工が薄ければ薄いほど経済性が向上する。トンネルの合理的な支保を考えると、掘削量に直結する掘削範囲にも注目する必要がある。

著者らは、解析的な検討<sup>4)</sup>により、掘削量を最少にする最小掘削範囲の存在は最小支保圧のそれより確実で、少なくとも地山特性曲線上に最小支保圧が存在すれば最小掘削範囲も存在し、最小掘削範囲に対応する変位は最小支保圧のそれ以下になることを明らかにした。そして、トンネルの安全性と経済性を両立させるためには、最小

支保圧よりも最小掘削範囲の方が設計目標として有用である可能性が高いことを明らかにした。これらの知見は孔内除荷模型実験<sup>5)</sup>で得られた地山特性曲線に基づく検討によっても確認できた。

本論文では、最小掘削範囲を設計目標とするトンネルの設計法（以後、最小掘削設計法とよぶ）を示し、この設計法における地山条件の影響を検討する。ただし、最小掘削設計法を実際のトンネル施工へ適用しようとするとき、必要な地山条件のすべてを事前に把握することが困難なために、計測結果に基づいた試行錯誤が要求されることになる。そこで、この試行錯誤を最小限に押さえるためにはどのような計測を実施し、その計測結果をどのように設計・施工にフィードバックしていけば良いかを検討する。そして、多様な地山条件や施工条件に対応するために、FEMを用いた最小掘削設計法を提案し、この有用性、汎用性を検討する。

## 2. 最小掘削設計法

### (1) 最小掘削範囲

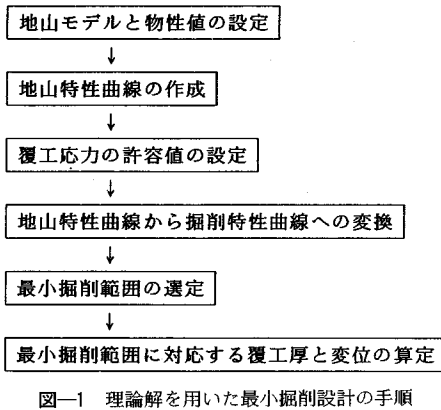
設計内空を確保するためにある程度の余裕を見て掘削範囲を設定するが、これが必要以上に大きければトンネル建設の経済性と安全性が低下してしまう。掘削範囲を必要最小にすることが望まれる。トンネル掘削は地山を傷付けては手当てするという行為である。必要最小限の傷に押さえることが、巡り巡って行為者の利益に結び付くと考えられる。

支保圧とトンネルの設計内空と覆工の許容応力から必要な覆工厚が決まる。掘削範囲は設計内空と覆工厚と地山変位の和で表されるので、支保圧と地山変位の関係を表す地山特性曲線上の各点に対応する覆工厚と掘削範囲を求めることができる。掘削範囲と地山変位の関係を表す掘削特性曲線を作成すれば、この曲線における掘削範囲の最小値が最小掘削範囲であり、このとき覆工応力は

\* 正会員 前田建設工業(株) 土木設計部 課長代理  
(〒102 千代田区富士見 2-10-26)

\*\* 前田建設工業(株) 土木設計部 課長

\*\*\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科



図一 理論解を用いた最小掘削設計の手順

許容値と一致し、設計内空も確保されている。

ただし、ここでは、掘削特性曲線上の極小かつ最小の掘削範囲を最小掘削範囲と呼ぶことにする。この最小掘削範囲が存在するのは変形係数が非常に小さいか、地山強度比が2以下の地山に限られると考えられる。極小値を兼ねない最小掘削範囲は上記以外の地山にも存在するが、このような地山では地山変位の大きさがトンネル建設の経済性を左右する重大な問題になることは少ないと考えられるので最小掘削範囲としては扱わない。

(2) 設計手順

最小掘削範囲およびこれに対応する覆工厚と地山変位を求めることが最小掘削設計の基本である。

以下のように計算モデルが単純化、理想化でき、理論解が適用できる場合、設計手順は図一に示すようになる。

- ① 地山は等方等質で、平面ひずみ状態にあり、初期地圧は等方一様に分布する。
- ② トンネル断面は円形である。
- ③ ピークせん断強度と残留せん断強度は式(1)と式(2)で与えられる。

$$\tau = C_p + \sigma \cdot \tan(\phi_p) \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau = C_r + \sigma \cdot \tan(\phi_r) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\tau$ :せん断強度、 $\sigma$ :垂直応力、 $C_p$ :ピーク強度時の粘着力、 $\phi_p$ :ピーク強度時の内部摩擦角、 $C_r$ :残留強度時の粘着力、 $\phi_r$ :残留強度時の内部摩擦角

- ④ せん断応力がピークせん断強度以下のとき地山は弾性体として挙動する。ピークせん断強度に達すると地山の支保能力は残留強度まで急激に低下し、その後は一定を保つ。
- ⑤ 塑性領域で発生する体積膨張は塑性領域の平均体積ひずみで表すことができる。
- ⑥ ロックボルトの補強効果は不連続面の発生を防止する、あるいは、不連続面が発生しても連続体として挙動するようにすることにあると考えられるが、まだ、この

効果の評価方法が確立されておらず、FEMなどの数値解析においてもその効果を表現することに成功していないので、支保はコンクリートによる覆工のみを考慮する。

- ⑦ 塑性領域の自重は支保圧に付加しない。
- ⑧ 覆工は軸力のみを伝達するトラス材である。

このような計算モデルに弾性理論<sup>9)</sup>とKastnerの応力解<sup>7)</sup>を適用すると、弾塑性境界の半径  $R_a$  と変位  $U_a$  は式(3)と式(4)で表される。

$$R_a = R \{ (\sigma_{ra} + \lambda Q_r) / (P + \lambda Q_r) \}^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$U_a = R_a (\sigma_0 - \sigma_{ra}) (1 + \nu) / E \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $R$ :トンネル半径、 $\sigma_{ra}$ :弾塑性境界の半径方向応力、 $E$ :地山の弾性係数、 $\nu$ :地山のポアソン比、 $\sigma_0$ :初期地圧、 $P$ :トンネル壁面に作用する支保圧

$$\sigma_{ra} = (2\sigma_0 - Q_p) / (1 + \xi)$$

$$Q_p = 2C_p \cos(\phi_p) / (1 - \sin(\phi_p))$$

$$Q_r = 2C_r \cos(\phi_r) / (1 - \sin(\phi_r))$$

$$\lambda = (1 - \sin(\phi_r)) / 2 \sin(\phi_r)$$

$$\xi = (1 + \sin(\phi_p)) / (1 - \sin(\phi_p))$$

弾性領域が弾塑性境界で  $U_a$  だけ内空に向かって変位した結果、塑性領域が体積膨張しながら内空に向かって押し出されると考えると<sup>8)</sup>、トンネル壁面の地山変位  $U$  は式(5-A)で表される。ただし、塑性領域が発生しない場合には式(5-B)で表される。

$$U = R - \{ (R_a - U_a)^2 - (1 + e) (R_a^2 - R^2) \}^{1/2} \quad (P \leq \sigma_{ra} \text{ のとき}) \dots\dots\dots (5-A)$$

$$U = R (\sigma_0 - P) (1 + \nu) / E \quad (P \geq \sigma_{ra} \text{ のとき}) \dots\dots\dots (5-B)$$

ここに、 $e$ :体積膨張に伴う平均体積ひずみ(正が膨張)  
 $P(0 \leq P \leq \sigma_0)$  をパラメーターにして式(3)~(5)により地山変位を求めると地山特性曲線が得られる。

この地山特性曲線上の任意の点に対して、覆工応力が許容値と一致する状態で設計内空を確保するためには、式(6)と式(7)で表される覆工厚  $T$  と掘削範囲(掘削半径)  $R_0$  が必要である。

$$T = R_i P / (\sigma_{ca} - P) \dots\dots\dots (6)$$

$$R_0 = R_i \sigma_{ca} / (1 - U/R) / (\sigma_{ca} - P) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $R_i$ :設計内空半径、 $\sigma_{ca}$ :覆工応力の許容値  
 $P(0 \leq P \leq \sigma_0)$  をパラメーターにして地山特性曲線の  $U/R$  を式(7)に代入すると、掘削範囲と地山変位の関係を表す掘削特性曲線が作成できるので、最小掘削範囲およびこれに対応する地山変位はこの掘削特性曲線から求める。最小掘削範囲に対応する覆工厚は掘削特性曲線と同時に作成できる覆工厚と地山変位の関係を表す覆工厚特性曲線から求める。

ただし、ここでは、2次覆工が短期においては化粧の役目しか果たさない場合を対象としており、本来の設計内空に正規の2次覆工厚(余巻き無視)を足し合わせた

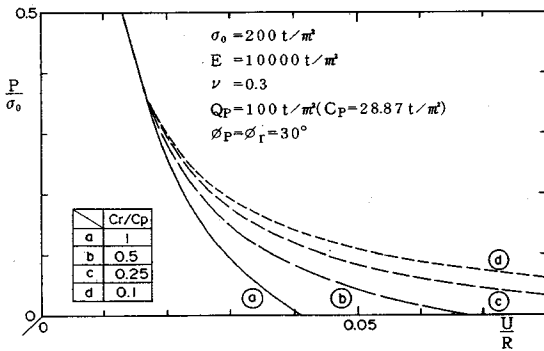


図-2 残留強度が地山特性曲線に及ぼす影響

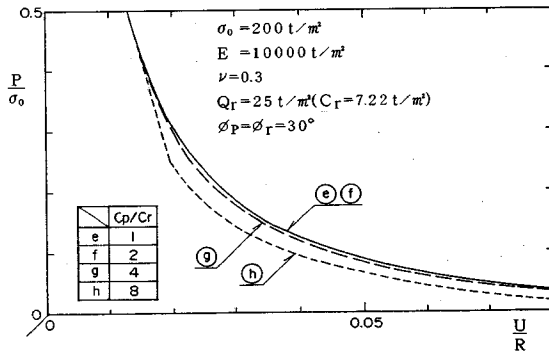


図-3 ピーク強度が地山特性曲線に及ぼす影響

ものを設計内空として扱っている。

(3) 最小掘削設計法における地山条件の影響

(2) で示した計算モデルが成立するとき、地山特性曲線と強度低下の関係は図-2 と図-3 に示すようになる。ただし、 $\phi_p = \phi_r$  と仮定している。図-2 は残留強度（この場合  $C_r$ ）以外が既知のときに未知の残留強度が地山特性曲線に及ぼす影響を表している。直線から曲線への折れ曲り点（弾性限界）以降に残留強度の影響が強く表れることが分かる。図-3 は、図-2 とは逆に、ピーク強度（この場合  $C_p$ ）以外が既知のときに未知のピーク強度が地山特性曲線に及ぼす影響を表している。ピーク強度の差異は地山特性曲線にほとんど反映されることが分かる。

掘削特性曲線あるいは最小掘削範囲と強度低下の関係も、図-4 と図-5 に示すように、地山特性曲線と強度低下の関係と同様である。図中の  $R_{0min}$  は最小掘削範囲、 $U$  は最小掘削範囲に対応する変位で、 $\sigma_{ca} = 1000 \text{ t/m}^2$  (9.81 MPa) として掘削特性曲線を作成した。また、図-4 は図-2 と同様に残留強度は未知でピーク強度は既知としているため  $C_r/C_p$  をパラメーターとした。残留強度以外の地山条件は図-2 と同じである。図-5 は図-3 と同様に残留強度は既知でピーク強度は未知としているため  $C_p/C_r$  をパラメーターとした。ピーク強度

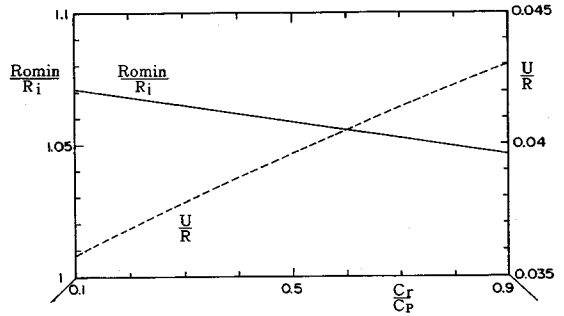


図-4 残留強度が最小掘削範囲に及ぼす影響

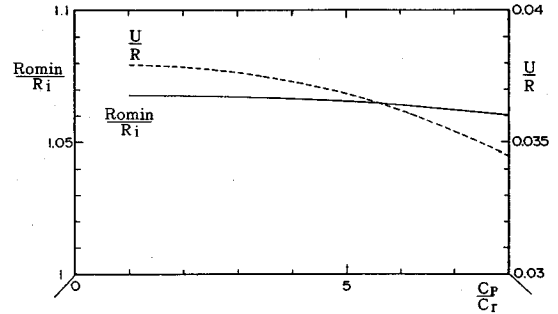


図-5 ピーク強度が最小掘削範囲に及ぼす影響

以外の地山条件は図-3 と同じである。図-4 に示すように  $C_p$  を固定して  $C_r$  を大きくしていくと、最小掘削範囲は小さくなっていくが、最小掘削範囲に対応する変位は大きくなっていく。逆に、図-5 に示すように  $C_r$  を固定して  $C_p$  を大きくしていくと、最小掘削範囲は小さくなっていき、最小掘削範囲に対応する変位も小さくなっていく。そして、最小掘削範囲とこれに対応する変位はピーク強度よりも残留強度によって大きく変化する。

以上より、低強度地山の場合、地山特性を支配している強度はピーク強度ではなく、残留強度であり、最小掘削設計法を適用するためには強度低下の把握を重視して試験を選定する必要があると考えられる。

3. 最小掘削設計法の施工への適用

最小掘削設計法を施工に適用する際には最小掘削範囲とこれに対応する覆工厚と変位の実現をめざすことになる。しかし、地山変位を機械的に制御することは不可能である。しかも、この設計に必要な地山条件のすべてを事前に把握することは困難である。計測結果に基づいて把握できていない地山条件を推定しながら試行錯誤の設計を余儀無くされる。ここでは、この試行錯誤を最小限に押さえるためにはどのような計測を実施すれば良いのか、そして、その計測結果をどのように設計・施工にフィードバックすれば良いのか、低強度地山におけるト

表-1 地山の物性値

E (t/m <sup>2</sup> )	$\nu$	C <sub>p</sub> (t/m <sup>2</sup> )	$\phi_p$ (°)	Q <sub>p</sub> (t/m <sup>2</sup> )
15540	0.2	14.9	22.7	44.7

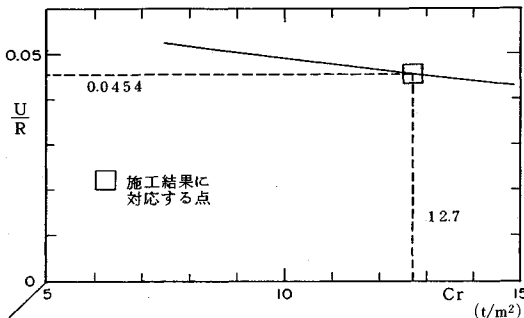


図-6 C<sub>r</sub>の推定

ンネル施工を想定して検討する。

(1) トンネルの地山条件

2.(2)に示した計算モデルが成立すると考える。初期地圧  $\sigma_0$  は 330 t/m<sup>2</sup> (3.24 MPa), 設計内空半径  $R_i$  は 3.1 m とする。地山の物性値は一軸と三軸圧縮試験結果より表-1に示す値が得られているものとする。

(2) 施工結果と計測結果

支保は、ロックボルトや鋼製支保工を無視して、許容応力が 1000 t/m<sup>2</sup> (9.81 MPa) の吹付コンクリートだけを考慮し、現在までその厚さは 20 cm, 掘削半径は 20 cm の地山変位を見込んで 3.5 m になるように施工されているものとする。

また、直径上で 223 mm の相対内空変位の収束値  $S$  が計測されたものとする。これが上半掘削時に切羽に近接して設置された計器による値であることを考慮して、地山変位  $U$  を下記のように推定する。

$$U = S/2/(1-\alpha) = 159 \text{ mm}$$

ここに、 $\alpha$ : 切羽近接部の初期地圧解放率 (0.3)

内空変位の他に 60.1 t/m<sup>2</sup> (0.590 MPa) の支保背面地圧が計測されたものとする。これは支保圧  $P$  である。薄肉円筒理論より、吹付コンクリートの圧縮応力は 992 t/m<sup>2</sup> (9.73 MPa) と推定する。

(3) 設計用地山特性曲線の作成

地山変位が見込みより 4.1 cm 小さかったので、掘削半径を小さくできそうである。また、吹付コンクリートの圧縮応力が許容値とほぼ一致しているので、吹付厚は現状のまま良さそうである。しかし、掘削半径を小さくすれば地山変位が小さくなり、支保圧も変化する。吹付厚を変えなくても応力は変化し、許容値を越える可能性がある。実際の地山挙動を十分に考慮した検討が必要である。

ここで、計測結果を設計用地山特性曲線の作成に利用

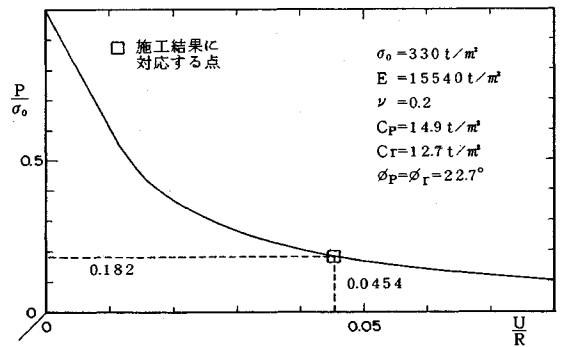


図-7 設計用地山特性曲線

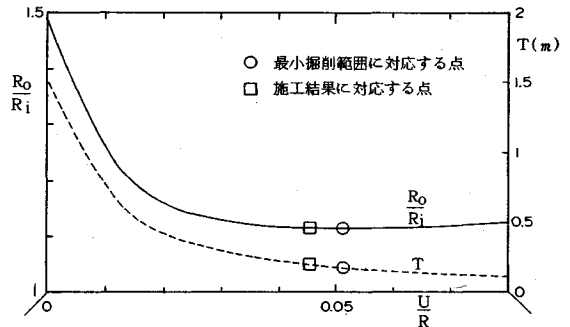


図-8 掘削特性曲線と覆工厚特性曲線

する。2.で明らかなように残留強度の把握が特に重要である。 $\phi_p = \phi_r$  とすると、式 (3)~(5) により地山特性曲線を作成するためには  $C_r$  だけが未知ということになる。計測結果の  $P$  と  $U$  に対応する点は  $R = 3.5 \text{ m}$  の地山特性曲線上に乗らなければならないので、 $C_r$  をパラメーターにして  $P/\sigma_0 = 0.182$  のときの地山変位を求めると図-6が得られる。この図において地山変位が計測結果 ( $U/R = 0.0454$ ) と一致するのは  $C_r = 12.7 \text{ t/m}^2$  のときである。これにより図-7に示す設計用地山特性曲線が得られる。図-6と図-7の□は施工結果あるいは計測結果に対応する点である。

(4) 最小掘削設計と次の施工へのフィードバック

図-7の設計用地山特性曲線から、図-8に示す掘削特性曲線(実線:  $R_0/R_i - U/R$ )と覆工厚特性曲線(鎖線:  $T - U/R$ )が得られる。これらの曲線上の○が最小掘削範囲に対応する点で、□が施工結果あるいは計測結果に対応する点である。最小掘削設計結果を施工結果あるいは計測結果と比較すると表-2に示すようになる。両者の差異は決して大きくはないが、現在よりも掘削範囲を 4.8 cm 小さくし、吹付コンクリート厚を 2.5 cm 減らして、地山変位を 1.8 cm 余計に許しても、現状と同等以上の安定が得られると考えられる。そうすることによって2次覆工の余巻も 4.1 cm 減らすことが可能で、大きな経済性の向上が期待できる。

表-2 最小掘削設計結果と施工結果の比較

	最小掘削設計	施 工
掘削半径	345.2 cm	350.0 cm
地山変位	17.7 cm	15.9 cm
吹付厚	17.5 cm	20.0 cm
2次覆工余裕	0.0 cm	4.1 cm

この結果を次の施工に反映させ、新しい計測結果に基づいて設計の妥当性を確認する。まだ最小掘削範囲とこれに対応する覆工厚と変位が実現できていなければ、再び最小掘削設計を実行する。これを繰り返すことによって最良の施工に近付いていくと考えられる。

#### (5) 今後の課題

最小掘削設計法をトンネルの施工に生かすためには地山変位と支保圧を計測し、上記のように、実際の地山挙動を反映した地山特性曲線を作成することが重要である。このような計測を精度良く実施すれば、掘削範囲と覆工厚を変更し、最小限の試行錯誤で最小掘削範囲に対応する変位に制御できると考えられる。

最小掘削設計に必要な不可欠なものは一般的な地山条件を除くと次の①と②あるいは①と③の2つである。

- ① 先行地山変位を含む絶対地山変位
- ② 残留強度
- ③ 支保圧

低強度地山では室内試験用のコアサンプルが得られない場合が多く、残留強度の把握はかなり困難である。このとき支保圧が計測されていれば、この支保圧と地山変位で地山特性曲線上の1点を押さえることができるので、残留強度の推定が上記のように可能になる。今後、これらのことを考慮し、設計方針および設計へのフィードバック方法をより明確にした上で試験・計測を実施することが必要であると考えられる。

### 4. FEMを用いた最小掘削設計

2.(2)で示した計算モデルが常に成立する訳ではない。特に、断面形状を円に置き換えられない場合や初期地圧を等方一様と見なせない場合あるいは周辺地山を等方等質と見なせない場合などが少なくない。このように地山条件が複雑な場合には理論解の適用が困難なため、FEMによる数値解析が必要になる。

そこで、FEMを用いた最小掘削設計法を示し、その有用性を検討する。

#### (1) 地山特性曲線の問題点

地山条件が複雑な場合には、理論解の適用が困難になるだけでなく、地山特性曲線の利用も困難になると考えられる。その理由は次の通りである。

① 初期地圧が等方一様でない場合や周辺地山が等方等質でない場合などには、トンネル壁面の位置によって地

山特性曲線が異なる。

② 初期地圧が等方一様でない場合、無支保の掘削終了時以外には特別な点を除く掘削面にせん断応力が発生する。このせん断応力を無視し垂直応力だけを支保圧とした地山特性曲線では、支保の合理性は議論できない。

③ 掘削断面形状が円でない場合には、①と②の問題がより複雑になる。

結局、地山条件が複雑な場合には、1つのあるいは数少ない地山特性曲線ではトンネル全体の特性を表現できないと考えられる。しかも、仮にいくつかの地山特性曲線でそれが可能になったとしてもそれらから掘削特性曲線への変換は容易ではないと考えられる。

したがって、FEMを用いた最小掘削設計においては地山特性曲線を利用せずに掘削特性曲線を作成する。そのために、掘削断面形状は設計内空断面形状と相似とする。そして、覆工(吹付コンクリート)は等厚とする。掘削断面形状が楕円などの場合、この2つの仮定は厳密には両立しないが近似的には両立すると考える。このような条件を設定すると、掘削面上のすべての点が設計内空を犯さないようにするとき、設計内空に対して余裕が発生し、位置によってその量が異なってしまう。しかし、これを防ぐためには、掘削断面形状を設計内空断面形状と相似ではないものにしなければならないが、このようにして最適かつ最小の掘削断面を求めようとすると試行錯誤の追跡が必要になり、演算に膨大な時間がかかることになる。ここでは、計算効率を重視し、上記の仮定を設けて、設計内空に対する部分的な余裕の発生を許容する。

#### (2) 設計例

##### a) 設計条件と手順

設計内空断面形状は楕円とする。設計内空断面の短径と長径を $a_i$ ,  $b_i$ 、解析モデルの掘削断面の短径と長径を $a$ ,  $b$ とする。仮定より $b/a = b_i/a_i$ である。このとき、設計手順は図-9に示ようになる。これを具体的に説明すると次のようになる。

- ① 設計内空形状や物性値、初期地圧などの設計条件を設定する。
- ② 解析領域を設定し、要素分割を行って、FEM解析モデルを作成する。
- ③ 応力解放率を設定する。これは、支保部材の要素を解析モデルに付加するときまでに解放される地圧の初期地圧に対する割合を表す。2次元解析において切羽の3次元的な支保効果を考慮するときに使われる。
- ④ 吹付厚比 $T_r$ (吹付厚/掘削範囲)を設定する。
- ⑤ 2次元平面ひずみ状態の弾塑性解析<sup>9)</sup>を実行する。
- ⑥ 最大圧縮応力が許容値と一致しているかどうか判定する。両者が一致するまで④~⑥を繰り返し、応力解放率毎に適切な吹付厚比を求める。

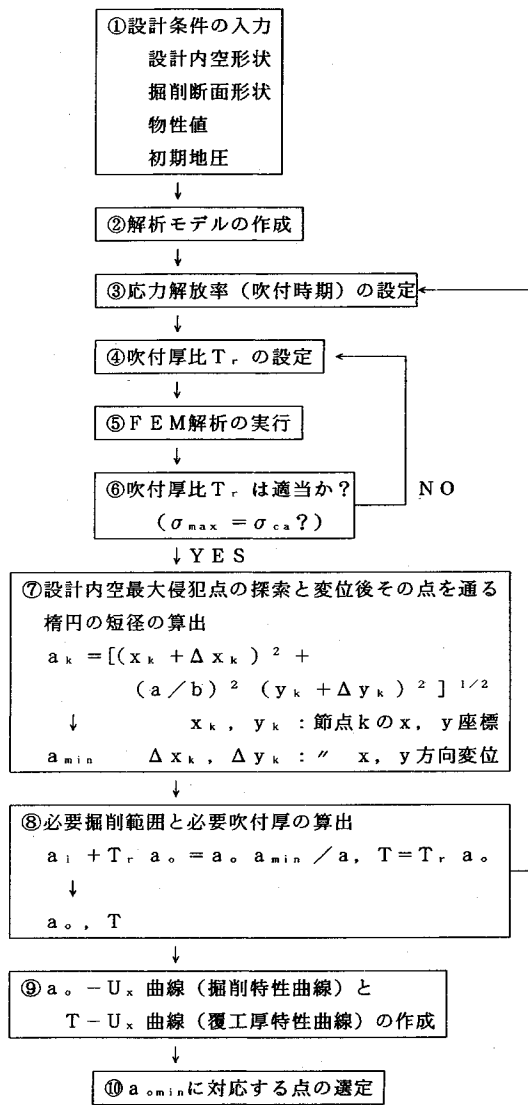


図-9 FEMを用いた最小掘削設計の手順

- ⑦ 掘削面上の節点を1つ取り出し、変位後のこの点を通り、設計内空断面形状と相似である楕円の短径  $a_k$  を計算する。この作業を掘削面上のすべての節点に対して行い、これらの最小値  $a_{min}$  を求める。  $a_{min}$  になる節点を設計内空最大侵入点とする。
- ⑧ この  $a_{min}$  と吹付厚比  $T_r$  から、設計内空を侵入する点をなくするために必要な掘削範囲と必要吹付厚  $T$  を求める。必要掘削範囲は短径  $a_0$  で代表する。
- ⑨ これらの結果から掘削特性曲線と覆工厚特性曲線を作成する。  $U_x$  は側壁部の水平変位であり、この位置の節点番号を  $n$  とすると、  $U_x = \Delta x_n$  となる。
- ⑩ 最小掘削範囲およびこれに対応する変位と吹付厚を求める。
- ③～⑧の作業を繰り返すことにより地山特性曲線を利用

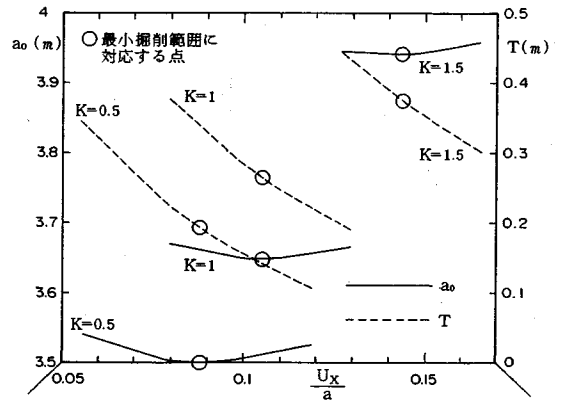


図-10 掘削特性曲線と覆工厚特性曲線

することなく掘削特性曲線と覆工厚特性曲線を作成できる。

b) FEMによる2次元平面ひずみ状態の弾塑性解析  
FEMで2次元平面ひずみ状態の弾塑性解析を実行するが、ここでは、主応力円が破壊包絡線を越える要素が発生した場合、超過応力を平均応力と主応力方向が変わらないように計算し、解析モデルに作用させる。このとき弾性係数とポアソン比は変えない。これを超過応力が0になるまで繰り返す。

解析領域は幅40m、高さ60mとし、トンネル掘削断面の短軸を水平にとり、短軸と長軸を対称軸とした。地山側への要素分割幅は掘削面に接する要素が0.2m、その他の塑性領域内部とその周辺は0.5mになるようにした。地山はすべて四角形要素で表現し、トンネル内部を除いた節点数は240になった。地山条件はトンネルの断面形状と水平方向の初期地圧を除いて3.で想定したトンネル施工と同じとする。

また、覆工は部材厚の変更を容易にするために線要素により表現し、軸力のみを伝達するトラス材とする。弾性係数は、NATMの設計施工指針(案)<sup>10)</sup>に基づいて、  $E_c = 330\,000 \text{ t/m}^2$  (3240 MPa) とする(覆工応力の許容値は3の想定と同様に  $\sigma_{ca} = 1\,000 \text{ t/m}^2$ )。

c) 設計結果

図-10に、  $a = 3 \text{ m}$ 、  $b = 4.5 \text{ m}$ 、  $K = 0.5, 1, 1.5$  のときの掘削特性曲線と覆工厚特性曲線を示す。

ここに、  $K$ : 側圧係数 ( $= \sigma_H / \sigma_v$ )、  $\sigma_H$ : 水平方向の初期地圧、  $\sigma_v$ : 鉛直方向の初期地圧

どの掘削特性曲線にも最小掘削範囲が存在する。最小掘削範囲およびこれに対応する変位と吹付厚は  $K$  が大きくなるに従って大きくなっており、  $K$  の影響が良く表れている。また、表-3に示すように、  $K=1$  のとき、3.の表-2の最小掘削設計結果と比較すると、天端部の変位比と吹付厚比はほとんど同じだが、これら以外はすべて、楕円の場合の方が大きくなっており、初期地圧の

表—3 最小掘削設計と断面形状

設計内空断面	円: $R_1 = 3.1$	楕円: $a_1 = 3$	$b_1 / a_1 = 1.5$
掘削範囲比	$R_2 / R_1 = 1.11$	$a_2 / a_1 = 1.22$	
変位比	$U / R = 0.051$	$U_x / a = 0.105$	$U_y / b = 0.047$
吹付厚比	$T / R_1 = 0.056$	$T / a_1 = 0.089$	$T / b_1 = 0.059$

$U_x$ : 側壁部の水平変位  $U_y$ : 天端部の鉛直変位

側圧係数に対し力学的に不利な断面形状になっていることが良く分かる。したがって、場合によっては初期地圧の側圧係数を考慮して空洞の形状を変更することも検討する必要があると考えられる。

なお、これらの曲線の作成において、 $a_{min}$  になるのは、すなわち、変位後に最も内空側にあるのは  $K$  が 1 以下の場合でも 1 以上の場合でも短軸上の点であった。したがって、長軸を水平にとっても短軸上の点で  $a_{min}$  になると考えられる。このことから  $a_{min}$  の計算は短軸上の点でのみ行えば良く、他の点での計算は省略できると考えられる。結果的には見掛け上 1 点で掘削特性曲線が作成できるということである。仮に、2 つ以上の点で掘削特性曲線を作成することになっても、結局は 1 つの掘削特性曲線でトンネル全体の特性を表現できるということで、掘削特性曲線の大きな利点であると考えられる。

### (3) FEM を用いた最小掘削設計の課題

以上のように、 $K \neq 1$  でも、また、掘削断面形状が円でもなくとも最小掘削範囲が存在し、この値およびこれに対応する変位と吹付厚も  $K$  や掘削断面形状の影響を反映している。地山条件が複雑でも、FEM を用いて最小掘削設計が容易に実行でき、その有用性も大きいと期待される。

今後は、FEM の長所をさらに生じてより現実的な問題に対応するために、次に挙げる問題を検討していく必要がある。

- ① 地山の異方性、不均一性を考慮する。
- ② ロックボルトの補強効果を評価・表現する方法を確立した上で、これを考慮する。
- ③ 馬蹄型など単円や楕円以外の断面形状も取り扱う。
- ④ 必要に応じて覆工（吹付コンクリート）を曲げモーメントも伝達するビーム材として表現する。
- ⑤ 設計内空断面形状と相似でない掘削断面形状も考慮する。
- ⑥ 覆工厚を部分的に変更する。
- ⑦ 施工過程を考慮する。

## 5. おわりに

最小掘削設計法は地山特性曲線の利用法の 1 つと見なすことができる。しかし、今までのように、支保圧を最小にすることがトンネル支保の合理的な設計への近道であると考えられるのではなく、設計内空と覆工厚と地山変位の和で表される掘削範囲を最小にする方がより合理的で

あると考えるものである。地山の痛む範囲を最小限に押さえることがトンネル建設の安全性と経済性の両立に結び付くというのが基本的な設計思想である。

本研究は、標準支保パターンが有効に適用できない低強度地山におけるトンネルを対象にしてこの設計法の有用性を検討したものである。本研究の範囲内で次のことが言えると思われる。

① 低強度地山の特性を支配している強度はピーク強度ではなく、残留強度であるが、その推定は極めて困難である。しかし、地山変位と支保圧を計測すれば、地山特性曲線上の 1 点を押さえることができるので、残留強度の推定が可能になる。

② 地山条件が複雑な場合でも、1 つの掘削特性曲線でトンネル全体の特性を表現することが可能である。

③ 地山条件が複雑な場合でも、FEM を用いることにより最小掘削設計を実行できる。このような場合には地山特性曲線を利用せずに直接掘削特性曲線を作成する。

今後、様々な条件の下での施工実績を利用して、最小掘削設計法の有用性を検証していく必要がある。そのためにも、低強度地山において特に効果を発揮するロックボルトの評価・表現方法の確立が急務であると考えられる。同時に、原位置で、トンネル掘削と同じ応力経路を辿りながら、残留強度を含む物性値が得られる試験法の開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準設計方書（山岳トンネル編）・同解説。
- 2) トンネル工学委員会：NATM とシールド工法の境界領域に関するシンポジウム，土木学会論文報告集，第 427 号，1991.3.
- 3) 谷本親伯：NATM における情報化施工，土と基礎，30-7 (294)，pp.63~70，1982.7.
- 4) 梨本 裕・高森貞彦・今田 徹：大深度低強度地山におけるトンネル設計の合理化，土木学会論文報告集，第 427 号，1991.3.
- 5) 梨本 裕・高森貞彦・今田 徹：孔内除荷模型実験による地山特性曲線とトンネルの最適設計，土木学会論文報告集投稿中。
- 6) 今田 徹：トンネルの支保構造に関する構造力学的研究，1980.7.
- 7) Kastner, H. : トンネルの力学（金原 弘訳），森北出版，1974.
- 8) 土質工学会：堆積軟岩の工学的性質とその応用，土質基礎工学ライブラリー—30.
- 9) 梨本 裕・松井幹雄：トンネル掘削弾塑性解析と塑性領域推定法，土木学会第 44 回年次学術講演会，1989.10.
- 10) 鉄道総合技術研究所：NATM 設計施工指針（案），p.254.

(1991.10.16 受付)

## A TUNNEL DESIGN FOR MINIMUM EXCAVATION IN LOW STRENGTH GROUND

Yutaka NASHIMOTO, Sadahiko TAKAMORI and Toru KONDA

NATM is generally accepted as a standard method of tunnelling. In that method, standard patterns of supports are conceived for relatively high strength ground, but those for low strength ground are a subject for further studies. Tunnels in such ground are uniquely designed and constructed in the practice of trial and error. This study, to ensure a design method for NATM in such ground, proposes a sample method in which minimum excavation limit obtained from ground characteristic curve is used as an aim of optimum design and examines its availability to tunnel construction. Further, in the study, utilization of FEM is examined to enhance wider applicability of the method.

---