

軸対称条件が成立しないトンネルを対象としたFEMによる最小掘削設計法 FEM MINIMUM EXCAVATION DESIGN METHOD FOR NON-AXISYMMETRIC TUNNELS

梨本 裕*・加藤育久**・松井幹雄**・高森貞彦***・今田 徹****

Yutaka NASHIMOTO, Ikuhisa KATO, Mikio MATUI, Sadahiko TAKAMORI and Toru KONDA

If the area of an excavation section can be minimized after the design requirements have been satisfied, economic efficiency and safety can be greatly enhanced. Viewed in this light, "the minimum excavation design method" has been proposed. This method, however, was confronted with a difficult problem that the prediction of the minimum excavation section is impossible in the case of non-axisymmetric tunnels. To solve this problem, an execution system for the FEM minimum excavation design method that enables the alteration of the sectional geometry, taking into account the design requirements and obtained FEM analytical data, has been developed. The serviceability of the system was also examined.

Keywords: tunnel, minimum excavation design method, finite element method (FEM)

1. はじめに

山岳トンネルに対しては標準支保パターンが作成されているが、地山強度比が2以下あるいは1以下であるような低強度地山の場合にはそれを適用することはできない。試行錯誤の設計を余儀なくされているのが現状であり、設計法の確立が望まれている。

設計においては目標を設定する必要がある。例えば、支保部材の規模をできるだけ小さくしよう、というようにである。吹付コンクリートとロックボルトを主要支保部材とするトンネルでは地山特性曲線に存在する最小支保圧が設計目標として最適であると言われてきた。支保圧が最小になるように施工できれば支保部材の規模を最小にできるからである。しかし、最小支保圧およびこれに対応する変位を定量的に求める方法はまだ確立されていない。

著者らは、支保圧を最小にするよりも必要掘削断面の面積を最小にする方が安全性と経済性が高くなると考えて「トンネルの最小掘削設計法」を提案し、その有用性の検証に取り組んできた^{1)~4)}。ただし、ここでは、吹付コンクリートの応力が許容値と一致しているときに、設計内空断面と吹付厚と地山変位の和とし

*正会員 工博 前田建設工業(株)土木設計部

**前田建設工業(株)情報システム部

***前田建設工業(株)土木設計部

****正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科

て表現できる断面を必要掘削断面と定義する。このような必要掘削断面の大きさと形状は地山と支保部材の物性、初期地圧、支保部材の設置時期などによって変化するが、これらの必要掘削断面のうち面積が最も小さいものが最小掘削断面であり、「トンネルの最小掘削設計法」は最小掘削断面を設計目標とするものである。これを設計目標とすることにより、掘削量が最小になるので経済性が向上し、応力を直接解放する範囲も最小になるので地山に与える損傷が小さくなり安全性も向上すると考えられる。

しかし、今までは、掘削断面は円形、初期地圧は等方一様、周辺地山は等方等質であるという軸対称条件が成立しない場合への対応が困難であった。等方一様でない初期地圧、馬蹄形や鉛直の側壁部などを含む任意断面形状、そして、吹付コンクリートの部分施工、などの取り扱いが困難で、最小掘削断面の形状も求めることができなかった。本報告では、これらの解決策とその有用性について述べる。

2. 軸対称条件が成立する場合のFEMによる最小掘削設計法

吹付コンクリートの応力が許容値と一致している状態において設計内空断面と吹付厚と地山変位の和で表すことができる必要掘削断面を最小にしようというのが最小掘削設計法である。最小掘削断面の形状と大きさを求めることが設計目標になる。

軸対称条件が成立する場合、最小掘削断面の形状は円である。この場合、次の手順に従ってFEM解析を実行すれば、最小掘削断面の大きさおよびこれに対応する地山変位や吹付厚を求めることができる。

- ①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。トンネルの掘削半径をRとする。
- ②物性値や初期地圧などの設計条件を入力する。
- ③応力解放比 α を設定する。これは、支保部材を表す要素を解析モデルに付加するまでに解放する地圧と初期地圧の比である。
- ④吹付厚Tを設定する。吹付コンクリートは位置によらず等厚とする。
- ⑤2次元平面ひずみ状態のFEM弾塑性解析を実行し、吹付コンクリートの最大軸力 $N_{\max}$ を求める。
- ⑥吹付コンクリートの最大圧縮応力 $\sigma_{\max}$ ($=N_{\max}/T$) が許容値 σ_{ca} と一致しているかどうかを判定する。

一致していない場合、解析結果に基づいて吹付厚を式(1)により変更し、両者が一致するまでFEM弾塑性解析を繰り返す。

$$T = N_{\max} / \sigma_{ca} \quad \cdots \cdots (1)$$

- ⑦両者が一致した解析結果から地山変位Uと吹付厚Tを取り出す。これらは掘削半径Rに対応する値である。必要掘削半径を R_o とすると、この R_o に対応する地山変位 U_o と吹付厚 T_o は、比例計算により、式(2)と式(3)で与えられる。

$$U_o = R_o \cdot U / R \quad \cdots \cdots (2)$$

$$T_o = R_o \cdot T / R \quad \cdots \cdots (3)$$

必要掘削半径 R_o は、吹付コンクリートの応力が許容値と一致した状態における設計内空半径 R_i と吹付厚と地山変位の和であるから、式(4)が成立する。

$$R_o = R_i + U_o + T_o \quad \cdots \cdots (4)$$

式(2)～(4)より式(5)が得られる。

$$R_o = R \cdot R_i / (R - U - T) \quad \cdots \cdots (5)$$

結局、地山変位Uと吹付厚Tを式(5)に代入して必要掘削半径 R_o を求める。この必要掘削半径に対応して式(3)で与えられる吹付厚が必要吹付厚である。

- ⑧③→⑦の作業を繰り返し、応力解放比毎に R_o と U_o を求めて、 $R_o - U_o$ 曲線を作成する。

⑨Ro-Uo曲線の最小値を求める。これが最小掘削半径Rominである。

以上のように軸対称条件が成立する場合には最小掘削断面の形状は円とあらかじめ分かっているので、その大きさを表す半径だけを求めることになる。まず、設定した掘削半径に対しFEM解析を繰り返し実行して最大圧縮応力が許容値と一致する吹付厚を求める。次に、設計内空をムダなく確保することを前提とした上で比例計算により必要掘削半径を求める。これらの作業を応力解放比毎に繰り返して必要掘削半径の最小値の最小掘削半径を求めるというのが軸対称条件が成立する場合の最小掘削設計法の基本的な流れである。ここでは、このような流れの中で実行するFEM解析を“掘削面比例計算FEM”と呼ぶことにする。

3. 軸対称条件が成立しない場合のFEMによる最小掘削設計法

3・1 必要掘削断面と必要吹付厚を求めるための掘削面自動追跡システム

軸対称条件が成立しない場合には最小掘削断面の形状が予測できないので、軸対称条件が成立する場合のように最小掘削断面の大きさを比例計算により求めることは不可能である。その形状と大きさを同時に追跡するシステムが必要である。そこで、次に示す手順に従ってFEM解析を実行する掘削面自動追跡システムを開発した。この手順に従ってFEM解析を実行すれば、軸対称条件が成立しない場合でも、最小掘削断面およびこれに対応する地山変位や吹付厚を求めることができると考えた。

①応力解放比を設定する。

②設計内空限界線を基準にして、掘削面上の節点を、図-1に示すように、“吹付厚移動”および“地山変位移動”させる。ただし、1回目の移動処理($i=1$)においては、吹付厚 T_1 は設定値とし、地山変位 U_1 は0とする。そして、掘削面上の節点およびその周辺の節点を移動させる毎に解析モデルの要素分割を変更する。

【吹付厚移動】：吹付表面が設計内空限界線と一致するように、吹付厚を考慮して掘削面上の節点を移動させる。設計内空限界線に対応する要素辺を吹付厚の分だけ地山側へ平行移動させ、移動後の要素辺の延長線の交点を掘削面上の節点とする。

【地山変位移動】：吹付厚移動の後に、地山変位を考慮して掘削面上の節点を移動させる。前回の解析結果の変位と同じ距離だけ反対方向に掘削面上の節点を移動させる。

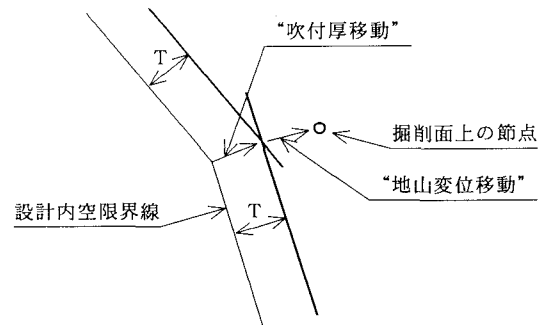


図-1 掘削面の移動

③2次元平面ひずみ状態のFEM弾塑性解析を実行する。

④解析結果に基づいて吹付厚を式(6)により変更する。吹付コンクリートは位置によらず等厚とする。

$$T_i = N_{\max} / \sigma_{ca} \quad \cdots \cdots (6)$$

⑤吹付厚と地山変位に関して前回と今回の節点移動処理における値が一致しているかどうかを判定する。すなわち、 $T_i = T_{i-1}$ かつ $U_i = U_{i-1}$ となっているかどうかを判定する。なっていれば、掘削面の位置、掘削断面積、吹付厚、地山変位など必要掘削断面に関する情報を出力し、なっていなければ②へ戻る。

⑥応力解放比毎に②⇒⑤の作業を繰り返し、必要掘削断面の大きさと地山変位の関係を表す曲線を作成して最小掘削断面を求める。

以上のような流れの中で実行するFEM解析を“掘削面自動追跡FEM”と呼ぶことにする。

3・2 解析例

掘削面自動追跡システムを導入したFEMにより実行した最小掘削設計結果を示す。なお、弾塑性解析はMohr-Coulombの降伏条件に従った。また、吹付コンクリートはトラス材として線要素でモデル化した。

(a) 軸対称条件が成立する問題での掘削面自動追跡システムの検証

次の設計条件の下で軸対称条件が成立する場合の掘削面自動追跡FEMと掘削面比例計算FEMによる必要掘削半径—地山変位曲線を図-2に示す。

地山の弾性係数=15000 tf/m²

地山のポアソン比=0.35

地山の粘着力=15 tf/m²

地山の内部摩擦角=20°

初期地圧=330 tf/m²

掘削半径=設計内空半径=5m

吹付コンクリートの弾性係数=330000 tf/m²

σ_{ca} (吹付コンクリートの許容応力)=600 tf/m²

両曲線には極小かつ最小の必要掘削半径すなわち最小掘削半径が存在している。最小掘削半径とこれに対応する地山変位など両曲線はよく一致しており、掘削面自動追跡システムが有効に機能していることが分かる。

(b) 初期地圧が等方でない場合の最小掘削断面

側圧係数が0.75と1.333というように初期地圧が等方でない場合の最小掘削断面を図-3に示す。初期地圧の水平成分以外は上記の設計条件と同じである。

鉛直径/水平半径は、側圧係数が0.75の場合には0.984と1より小さく、側圧係数が1.333の場合には1.022と1より大きくなっている。側圧係数が塑性領域の発生に影響を及ぼし、同時に塑性領域が変位分布に影響を及ぼし、最終的に変位分布が最小掘削断面を含む必要掘削断面の形状に影響を及ぼしていることが分かる。

(c) 任意断面形状と吹付コンクリートの部分施工

設計内空断面の上半が半径5mの半円、下半が高さ5m、幅10mの長方形であるトンネルで、底盤吹付を実施した場合としない場合の必要掘削量—地山変位曲線を図-4に示す。設計内空断面の大きさや形状以外は上記の設計条件と同じである。ただし、地山変位は式(7)により算出した掘削面の平均的な換算変位 U_m である。

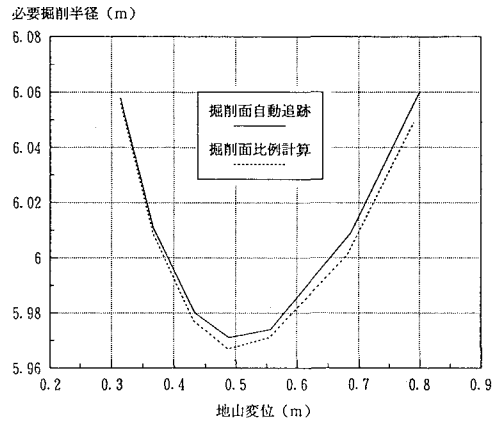


図-2 必要掘削半径—地山変位曲線

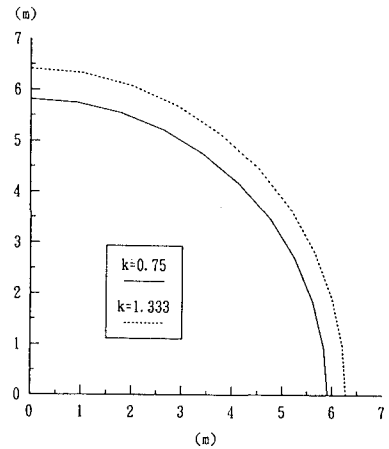


図-3 側圧係数と最小掘削断面

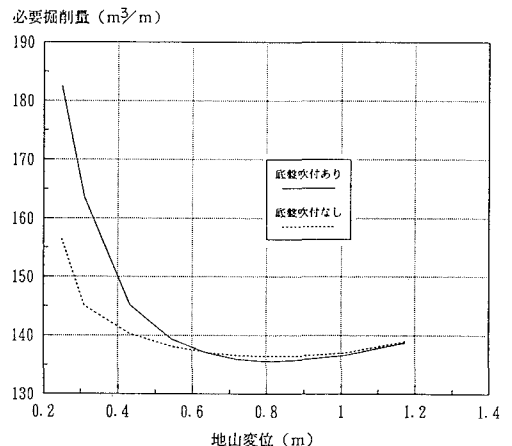


図-4 必要掘削量—地山変位曲線

$$U_m = R_{om} - R_{im} \quad \cdots \cdots (7)$$

R_{om} ：変位前の必要掘削断面の換算半径

$$(\quad = \sqrt{S_o / \pi} \quad)$$

S_o ：必要掘削量（単位奥行き長さ当たり）

あるいは必要掘削断面積

R_{im} ：変位後の必要掘削断面の換算半径

$$(\quad = \sqrt{(S_i + T_v) / \pi} \quad)$$

S_i ：設計内空断面積

T_v ：単位奥行き長さ当たりの必要吹付量

地山変位を小さく押さえることができる場合には底盤吹付を実施しない方が必要掘削量は少ない。しかし、ある程度大きな地山変位を許すことができる場合にはその関係は逆転する。

また、図－５に示すように、必要吹付厚は底盤吹付を実施した方が小さくなる。このため、図－６に示すように、ある程度大きな地山変位を許すことができる場合の必要吹付量は底盤吹付を実施してしなくてもほとんど変わらない。したがって、地山条件によっては底盤吹付を実施した方が施工費が安くなるということも起こり得ると考えられる。

以上はロックボルトを打設しない場合の解析例である。

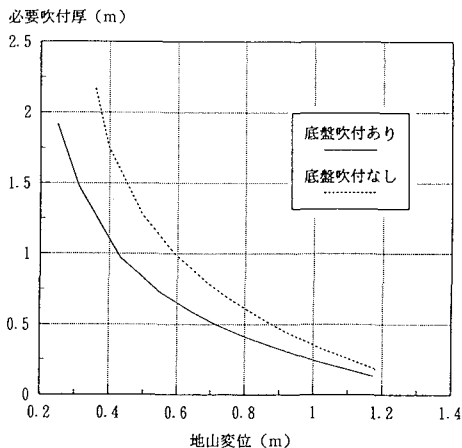
次に、表－１にロックボルトの効果を示す。これは、ロックボルトを打設せずに底盤吹付を実施した場合の最小掘削断面に対応する応力解放比の状態、吹付コンクリートの施工と同時にロックボルトを打設したときの必要掘削量、必要吹付量、地山変位などである。ロックボルトの打設本数は20本/mで、ロックボルトの有無と長さ以外は同じ設計条件の下での結果である。

ただし、必要掘削断面の掘削面を追跡するために解析モデルの要素分割を変更するので、入力時と出力時とでは掘削面の位置も要素分割も異なる。したがって、ロックボルトの正確な長さも結果が出て初めて分かるというプログラムになっている。表－１のロックボルトの長さは1.9mと3.9mとなっているが、これは出力値である。入力値は2.5mと5.0mであった。

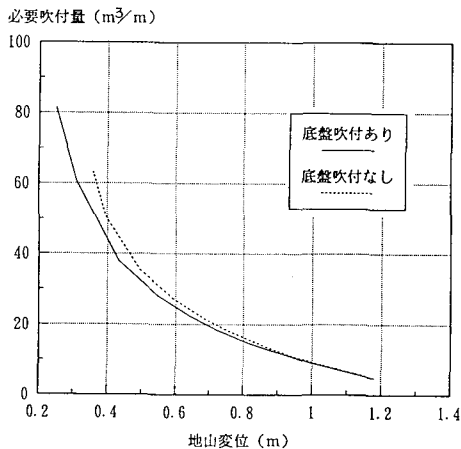
ロックボルトがない場合と長さが1.9mの場合を比較すると、ロックボルトが必要掘削量と必要吹付量の低減に大きく寄与することが分かる。しかし、長さが1.9mと3.9mの場合を比較すると、ロックボルトを長くしても必要掘削量と必要吹付量はわずかに低減せず、ロックボルトにも合理的な長さが存在することが推察される。なお、ロックボルトはトラス材として線要素でモデル化し、次の物性値を与えた。

ロックボルトの弾性係数＝ $2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$

ロックボルトの断面積＝ 4.59 cm^2



図－５ 必要吹付厚－地山変位曲線



図－６ 必要吹付量－地山変位曲線

表－１ ロックボルトの効果

L (m)	0	1.9	3.9
S_o (m^2)	135.6	131.8	130.8
R_{om} (m)	6.57	6.48	6.45
T_v (m^2)	14.6	11.8	11.0
U_m (m)	0.819	0.807	0.802

4. おわりに

FEM解析において設計条件と解析結果を考慮しながら掘削面を自動的に変更できる制御システムを考案し、軸対称条件が成立しないトンネルを対象としたFEMによる最小掘削設計法の実行プログラムを開発した。そして、等方一様でない初期地圧や任意断面形状そして吹付コンクリートの部分施工などに対してプログラムが有効に機能し、最小掘削断面の大きさと形状が算出できることを確認した。

また、次に挙げる知見が得られた。

- ①初期地圧の側圧係数によって最小掘削断面の大きさと形状が変化する。
- ②底盤吹付により必要掘削量を減らすことが可能である。
- ③底盤吹付により必要吹付厚を減らすことができる。したがって、底盤吹付を実施しても全体の必要吹付量は大きくは増加しない。
- ④ロックボルトは必要掘削量と必要吹付量を低減させる効果がある。
- ⑤ロックボルトはある程度の長さを越えると、長くしても効果はそれほど大きくならない。

これらのことから、必要掘削量あるいは必要掘削断面を最小にしようとする最小掘削設計法は、吹付厚と吹付範囲およびロックボルトの長さや打設間隔などの妥当性の判定に対しても有用性が高いと考えられる。

また、今回開発したFEMによる最小掘削設計法の実行プログラムには次に挙げる課題も残されている。

- ①吹付厚を位置によって変えられるようにする。
 - ②ロックボルトの超過軸力を再配分できるようにする。
 - ③複雑な施工過程も考慮できるようにする。
 - ④吹付コンクリートの曲げ応力も考慮できるようにする。
 - ⑤掘削面を移動させて解析モデルの要素分割を変更するとき、ロックボルトの長さが変わらないようにする。
 - ⑥地山の時間依存性も考慮できるようにする。
- これらの課題を解決することにより最小掘削設計法の有用性はさらに高くなると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 梨本 裕・高森貞彦：NATMにおける設計目標の合理化＜必要最小掘削径＞，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.126-130，1990.2
- 2) 梨本 裕・高森貞彦：悪質地山におけるNATMの合理的な設計，土木学会第45回年次学術講演会，pp.584-585，1990.9
- 3) 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，土木学会論文集，No.427/VI-14，pp.183-191，1991.3
- 4) 梨本 裕・高森貞彦・今田 徹：低強度地山におけるトンネルの最小掘削設計法の提案，土木学会論文集，No.453/VI-17，pp.69-76，1992.9