

# 鏡止めボルトによるトンネル切羽面の補強効果

吉岡 尚也<sup>1</sup>・木梨 秀雄<sup>2</sup>・道廣 一利<sup>3</sup>・谷本 親伯<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工)大阪工業大学短期大学部 土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区5-16-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 (〒204-0011 清瀬市下清戸4-640)

<sup>3</sup>正会員 工博 摂南大学 工学部土木工学科 (〒572-8508 寝屋川市池田中17-8)

<sup>4</sup>正会員 工博 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

不良地山内にトンネルを掘削するときには、掘削工法として最も基本的かつ一般的なショートベンチカット工法が用いられている。しかし、トンネル断面を早期に閉合したい場合には、標準の支保パターンに鏡止めボルト程度の補助工法を併用し、補助ベンチ付き全断面工法で施工できることが望ましい。そこで、三次元による数値解析的な検討を行った結果、鏡止めボルトを併用することによって鏡面の押出し変位が抑制され、これにより切羽前方地山に形成される緩み域が縮小し、切羽の安定性が確保されることが判明した。

**Key Words :**fully grouted face bolts, very poor rock, 3 dimensional analysis

## 1. 序

普通の地山にトンネルを掘削する場合には、切羽自身の拘束効果により、自立するための支保能力をトンネル切羽地山が有している。しかしながら、強度定数が悪い地山、すなわち、地山強度比が1以下となるような地山内にトンネルを掘削するときには、切羽の自立時間が問題になることが想定される。このような切羽の自立時間が問題になるような地山においてトンネルを安全に施工していくためには、何らかの補助工法を採用してトンネル切羽周辺地山の安定性を確保する必要がある。

切羽の安定性を確保するには、掘削断面を分割する方法や一掘進長を短くするなどの方法がある。しかし、近年では、長尺鋼管フォアペイリングやフォアポーリングを積極的に採用し、大きな断面で施工している例が多い。ところが、長尺鋼管フォアペイリングやフォアポーリングなどの補助工法にどの程度の効果があるのかということを定量的に把握し、補助工法を採用している現場は少ないようである。なぜなら、現場での計測結果や数値解析結果に基づき、長尺鋼管フォアペイリングやフォアポーリングなどの補助工法を併用したことによる効果を解明した論文が殆ど公表されていないためであろう。

そこで、著者らは、補助工法のうち、鏡面の安定対策としての鏡止めボルトがどの程度の効果を発揮するのかを解明するため、数値解析的な考察を行った。なお、数値解析では、土かぶり高さが100m程度で、粘

着力100kN/m<sup>2</sup>・内部まさつ角0.26rad.のような強度定数を有する地山を想定し、このような地山内に二車線の高速自動車道が構築されるものとして計算した。

## 2. 鏡止めボルト併用による補助ベンチ付き全断面工法

不良地山内にトンネルを掘削するときの掘削工法としては、最も基本的かつ一般的なショートベンチカット工法が用いられている。ショートベンチカット工法が用いられるのは、地山の変化に対応しやすいという長所を有しているためである。その反面、インバートによってトンネル断面を早期に閉合することによって変形を抑制したい場合には、ショートベンチカット工法ではいろいろな不都合が生じる。

トンネル断面を早期に閉合するためには、上半・下半・インバートの掘削および支保設置に係わる作業を上半切羽近傍に集約させることが望ましい。しかし、土かぶり高さが100m程度で、強度定数としての粘着力が100kN/m<sup>2</sup>、内部まさつ角が0.26rad.のような不良地山内にトンネルを掘削する場合には、切羽の安定性を確保するための最適な補助工法を併用することが望ましい。ここでは、標準的な支保パターンによる補助ベンチ付き全断面工法に鏡止めボルト程度の補助工法を併用した場合、鏡止めボルトを併用することによって鏡面の押出し変位が抑制され、これにより切羽前方地山に形成される緩み域が縮小し、切羽の安定性が確

保されるものと考えた。

このような鏡ボルトによる切羽面の補強効果を検討するため、三次元の数値解析を行い、切羽周辺地山の変形・応力・緩み域などについて考察した。

### 3. 数値解析による鏡止めボルトの効果

不良地山内において補助ベンチ付き全断面工法に鏡止めボルト程度の補助工法を併用した場合、鏡止めボルトが切羽面の補強にどの程度効果があるのかを検討するため、FLAC<sup>3D</sup> (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions の略称)<sup>1)</sup>による弾塑性解析を行った。FLAC<sup>3D</sup>は欧米で適用実績の多い有限差分解析コード FLAC の三次元版で、通常用いる FEM と同様に応力-変形解析ができる。また、FLAC<sup>3D</sup>はロックボルトや鏡ボルトの材料および付着特性を考慮できるケーブル要素なる機能を有している。解析条件を以下に示す。

①トンネルは、粘着力  $100\text{kN/m}^2$ ・内部まさつ角  $0.26\text{rad}$  のような強度定数を有する地山内に掘削されるものとする。

②トンネル施工時の支保パターンは、日本道路公団によって提案された  $D_{\text{H}}$  を基本にし、これに鏡止めボルトを併用するものとする。

③トンネル掘削前の地山は、静水圧的な応力を受けているものとし、その大きさを  $2000\text{kN/m}^2$  とする。

#### (1) 解析のためのモデル化

鏡止めボルトによる切羽面の補強効果を数値解析的に解明するためには、地山と支保部材の力学的挙動をどのように表現するのかが重要となる。まず、トンネルが掘削される地山については、完全弾塑性体的な挙動を呈するものとした。降伏の判定には、ドラッカー・プラガーの降伏基準を用いた。つぎに、ロックボルトについては、FLAC<sup>3D</sup>の構成要素として用意されているケーブル要素でモデル化した。ケーブル要素では、ロックボルトと地山との間のせん断挙動が定着材のせん断剛性および粘着強さによって表現できるようになっている。ただし、ロックボルト自体は、引張りと圧縮による軸力に抵抗できるようになっている。また、鏡止めボルトについてもケーブル要素でモデル化した。そして、吹付けコンクリートについては、彈性的な挙動をするものとした。

#### (2) 解析に用いた入力定数の値

解析で用いた入力定数の値を表-1 に示す。地山の弹性係数については、つぎのようにして設定した。ビニ

表-1 入力定数の値

		入力定数の値
地 山	弹性係数; $1500 \times 10^9 \text{kN/m}^2$	
	ポアソン比; 0.3	
	引張り強度; $0\text{kN/m}^2$	
	粘着力; $100\text{kN/m}^2$	
	内部まさつ角; $0.26\text{rad}$	
ロックボルト	断面積; $4.52 \times 10^{-4} \text{m}^2$	
	弹性係数; $210 \times 10^9 \text{kN/m}^2$	
	引張り強度; $179.3\text{kN}$	
	せん断剛性; $1.1 \times 10^4 \text{kN/m/m}$	
	粘着強さ; $230\text{kN/m}$	
鏡止めボルト	まさつ角; $0.52\text{rad}$	
	穿孔径; $132 \times 10^{-3} \text{m}$	
	F R P ボルト	
	断面積; $452.2 \times 10^{-6} \text{m}^2$	
	弹性係数; $210 \times 10^9 \text{kN/m}^2$	
定着材	引張り強度; $179.3\text{kN}$	
	せん断剛性; $1.1 \times 10^4 \text{kN/m/m}$	
	粘着強さ; $230\text{kN/m}$	
	まさつ角; $0.52\text{rad}$	
	穿孔径; $132 \times 10^{-3} \text{m}$	
吹付けコンクリート	弹性係数; $3400 \times 10^9 \text{kN/m}^2$	
	ポアソン比; 0.2	

アウスキー<sup>2)</sup>が提案したRMR法によれば、この解析で設定した地山の強度定数に見合うRMRは  $11 \sim 20$  となる。このRMRからセラフィムら<sup>3)</sup>の提案式を利用して弹性係数の値を推定した。

ロックボルトは、ねじり棒鋼 TD24 を打設するものとし、定着材のせん断剛性などはハイエット<sup>4)</sup>が行った引抜き試験から得られた結果に基づいて決定した。

鏡止めボルトには、グラスファイバー補強プラスチック (FRP) ボルトを使用するものとし、定着材のせん断剛性などは、石塚ら<sup>5)</sup>による引抜き試験結果の値を用いた。

吹付けコンクリートの弹性係数については、土屋<sup>6)</sup>の提案した値を用いた。

#### (3) 解析手順

まず、解析領域内に静水圧的な初期応力を与える。つぎに、このような初期応力を受けた地山内に  $2\text{m}$  の補助ベンチ付き全断面工法でトンネルを掘削する。ただし、トンネル支保部材としてのロックボルトと吹付けコンクリートは、掘削と同時に施工されるものとした。ロックボルトは、解析を半断面で行っているため、トンネル周方向に 9 本打設した。また、掘進方向には  $1\text{m}$  ピッチで各切羽面の手前  $0.5\text{m}$  まで打設した。吹付けコンクリートは、各切羽面と同じ面まで吹付けられ

るものとした。吹付けコンクリートの厚さは0.2mである。

#### 4. 解析結果と考察

図-1は、日本道路公団によるD<sub>IIa</sub>支保パターンを基にし、補助ベンチ付き全断面工法で掘削したときにトンネル周辺地山に生じる緩み域(塑性域)を黒く塗りつぶして表示したものである。弾性挙動を示す領域と緩み域との境界に着目すると、緩み域の外側境界はほぼトンネル中心軸とスプリングラインとの交点を中心とする同心円上に形成されていることがわかる。この緩み域の外側境界が、NATMにおける地山内部に形成された支持力帯に相当するものと考える。このような観点から図-1を見ると、切羽前方の地山にはドーム状の支持力帯が、切羽面より後方の地山にはアーチ状の支持力帯が形成されていることが理解できる。

図-2は、解析から得たトンネル壁面間の変位および天端の変位を切羽面からの距離との関係で示したものである。図-2に示した変位曲線は、同心円状に形成された図-1の緩み域と関連していて、緩み域の外側境界までの径をD' とすれば、2D' に相当する位置で収束することがわかった。この例では、2D' に相当する切羽位置は、2D'=38m となった。逆に言えば、図-2は、計測された変位をトンネル切羽位置との関係で整理し、2D' に相当する位置がわかれれば、トンネル周辺における緩み域の拡大状況が推定できることを示唆している。なお、鏡止めボルトを併用した場合にも図-2に示した変位曲線とほぼ同じであった。

図-3は、トンネルを補助ベンチ付き全断面工法で掘削したときの切羽面周辺の押出し変位の大きさをグレー階調で示したものである。この図より、トンネル切羽面の近傍では、0.08m を越える切羽面の押出し変位が生じていることがわかる。この程度の押出し変位が生じると、切羽での作業の安全性を確保するために補助工法を併用する必要があると考える。切羽面の押出し変位を抑制するためには、鏡止めボルトが有効であると考える。そこで、図-1に示した切羽前方地山に形成されたドーム状の緩み域を考慮し、約1.5倍の長さ、すなわち9m長さの鏡止めボルトを上半切羽面から打設し、再度数値解析を実施した。鏡止めボルトは、トンネル半断面に12本打設した。これは、約2m<sup>2</sup>に1本の割合で鏡止めボルトを打設したことになる。

図-4は、補助ベンチ付き全断面工法に鏡止めボルトを併用してトンネルを掘削したときの切羽面周辺における押出し変位の大きさをグレー階調で示したものである。トンネル切羽面の近傍における押出し変位は、

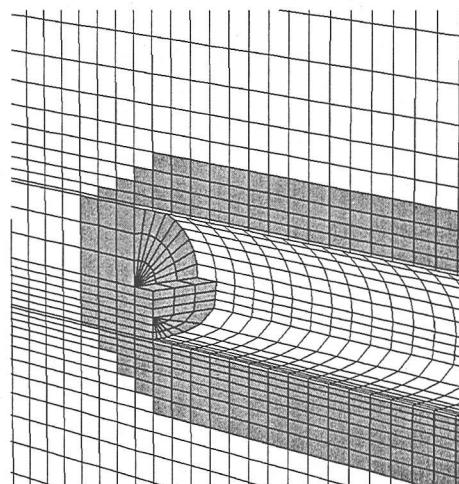


図-1 トンネル周辺の緩み域(鏡止めボルトなし)

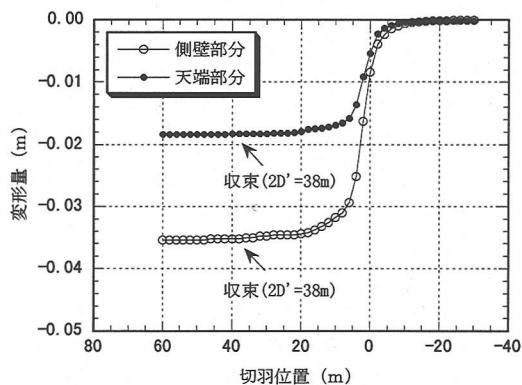


図-2 変位曲線(鏡止めボルトなし)

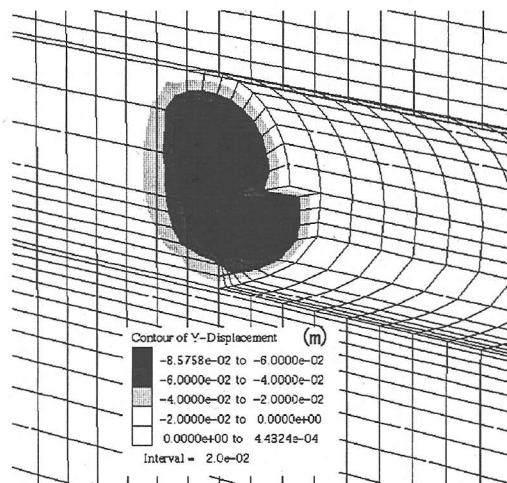


図-3 切羽面の押出し変位(鏡止めボルトなし)

0.06m程度に抑制されていることがわかる。このことより、補助工法としての鏡止めボルトを上半切羽面に約2m<sup>2</sup>に1本の割合で打設するだけでも、切羽面の押出し変位を抑制できることが数値解析的に解明できたと言える。

図-5は、補助ベンチ付き全断面工法に鏡止めボルトを併用した場合のトンネル周辺地山に生じる緩み域(塑性域)を黒く塗りつぶして表示したものである。図-5より、トンネル切羽周辺地山に形成される緩み域は、鏡止めボルトを打設していない場合に比べると、減少していることがわかる。言い換えれば、鏡止めボルトを打設することにより、切羽前方の地山にはドーム状の支持力帯がより切羽面近く形成されるため、トンネルの安定性にとっては都合のよいことがわかる。

図-6、7は、鏡止めボルトの有無がトンネル切羽前方地山の応力に及ぼす影響を把握するため、再配分された主応力状態をプロットしたものである。ただし、これらの図は圧縮側を負の値で示している。図-6は、天端近傍の切羽前方地山における主応力状態を図示したものである。□印と■印は、それぞれ鏡止めボルトがない場合の最大主応力と最小主応力を表している。一方、○印と●印は、それぞれ鏡止めボルトがある場合の最大主応力と最小主応力を表している。最大主応力と最小主応力に着目すると、弾塑性の境界部では主応力差が同じになり、それより深部では徐々に初期の応力状態に近づいていく様子が認められる。これに対し、切羽面側の塑性化した地山では、鏡止めボルトを打設することによりせん断強さが増加していることがわかる。具体的には、図-6に示した最大・最小主応力のみに着目し、その平均主応力で比較すると、鏡止めボルトが打設されている場合には、切羽面近傍では約1.4倍大きくなっている。言い換えると、鏡止めボルトがない場合には、不足する拘束効果を地山自身が負担するため、せん断強さは強度定数のみに依存している。しかしながら、鏡止めボルトがある場合には、鏡止めボルトによる拘束効果が与えられてせん断強さが増加しているとも考えることができる。

図-7は、側壁近傍の切羽前方地山における主応力状態を図示したもので、図-6の考察で述べたのと同じような結果が得られている。ここで、最大・最小主応力のみに着目し、その平均主応力で比較すると、鏡止めボルトが打設されている場合には、切羽面近傍では約1.2倍大きくなっている。このことは、切羽面の安定性を確保するために、地山条件に応じた鏡止めボルトの適切な配置が存在していることを示唆している。

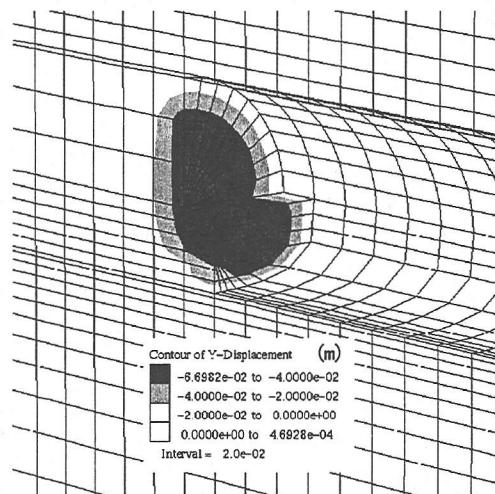


図-4 切羽面の押出し変位(鏡止めボルトあり)

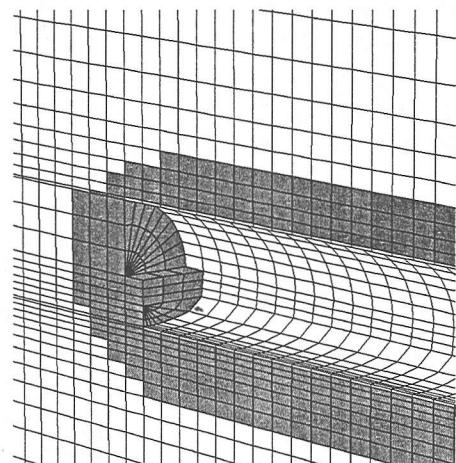


図-5 トンネル周辺の緩み域(鏡止めボルトあり)

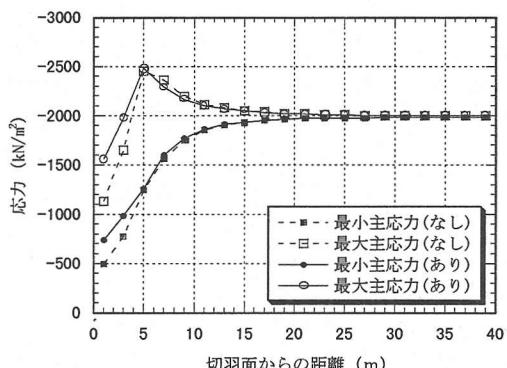


図-6 天端近傍の切羽前方地山における主応力

## 5. 結

トンネル施工時における切羽面の安定性を確保するために使われている鏡ボルトの作用効果を把握するため、三次元による数値解析的検討を行った。数値解析結果から得られた知見をまとめると以下のようになる。  
①切羽前方の地山にはドーム状の支持力帯が、切羽面より後方の地山にはアーチ状の支持力帯が形成され、これによりトンネルの安定性が確保されることが明らかになった。

②上に述べた支持力帯の形成位置(すなわち、トンネル周辺における緩み域の外側境界)は、計測された内空変位をトンネル切羽位置との関係で整理し、ゆるみ域外側境界までの2倍に相当する位置を見出すことで推定できることができることがわかった。

③補助ベンチ付き全断面工法に補助工法としての鏡止めボルトを上半から打設すれば、切羽面の押し出し変位を抑制できることがわかった。

④応力的には、鏡止めボルトを打設することによって切羽面近傍では地山のせん断強さが増加し、切羽面の安定性が向上することが明らかになった。

今後は、不良地山内でトンネルを施工していくうえで、切羽面の安定性を効率よく確保できる鏡止めボルトの打設本数・打設長さについて数値解析的に解明する所存である。

## 参考文献

- 1) Itasca Consulting Group, Inc.: FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions) Version 2.0 User's Manual, 1997.
- 2) Bieniawski,Z.T.: Rock mechanics design in mining and tunneling, BALKEMA, pp. 97-136, 1984.

(1999.4.8 受付)

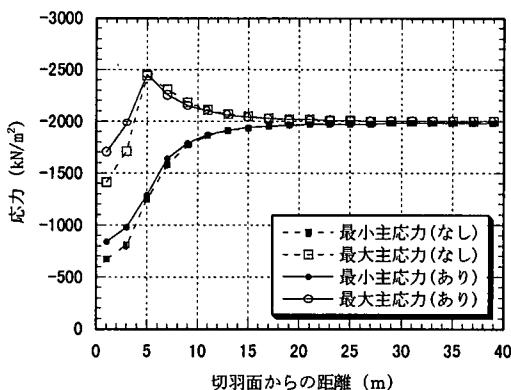


図-7 側壁近傍の切羽前方地山における主応力

- 3) Serafim,J.L. and Pereira,J.P.: Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski of International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, LNEC, Lisbon, Portugal, Vol.1, pp. 33-42,1983.
- 4) Hyett, A. J. , Bawden,W.F. and Reichert,R.D.: The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, Int. J.Rock Mech. Sci. and Geomechanics Abstract, Vol. 29, No. 5, pp. 503-524, 1992.
- 5) 石塚与志雄, 安部透: ケーブルボルトの付着抵抗性と解析モデルに関する研究, トンネル工学研究論文報告集, 第7卷, pp.7-14, 1997.
- 6) 土屋敬: トンネル設計のための支保と地山物性に関する研究, 土木学会論文集, 第364号/III-4, pp.31-40, 1985.

## THE SUPPORT EFFECT OF FULLY GROUTED FACE BOLTS IN VERY POOR ROCK

Hisaya YOSHIOKA, Hideo KINASHI, Kazutoshi MICHIIHIRO  
and Chikaosa TANIMOTO

In general, tunnels in very poor rock are driven by the short bench cut method. However, to limit the deformation of tunnel side walls and roof, the micro bench tunneling method, utilizing face bolts as auxiliary measures, will be required. From this view of point, three dimensional finite difference analysis was carried out to simulate the rock behaviors around the tunnel face. Analytical results indicate that fully grouted face bolts are available to reduce the deformation of the tunnel face, and the extent of the plastic zone around tunnel face.