

(86)トンネル切羽の安定に及ぼすベンチ長の影響に関する研究

前田建設工業(株) 正会員 関 順一 鈴木武志

前田建設工業(株) 正会員 鷺澤栄紀

前田建設工業(株) ○ 西野健一郎

Effect of Bench Length on The Stability of Tunnel Face

Jun'ichi SEKI, Takesi SUZUKI, MAEDA Construction Co., Ltd.

Eiki WASHIZAWA, ken'ichiro NISHINO, MAEDA Construction Co., Ltd.

Abstract

Recently, tunnels excavated by the short bench cut method where bench length ranges from 2m to 6m are rapidly increasing. This method can provided an advantage of simultaneous excavating operations for the upper half face and bench by selecting bench length and shape to suit to the ground conditions. In this method, as the factor of bench length is very important, we have studied the relation between length and stability of face by through case study and 3-dimensional FEM analysis. As a result, it is found that the shorter the bench, the greater the displacement stays within a similar degree to that of upper half advance method when the bench longer than 5m. However, the stress concentration and breakage of face ground are more affected by the shape of bench excavated height than length of bench.

1. はじめに

山岳トンネル工事では、近年ベンチ長を2～6mと非常に短くして、上下半ベンチを同時に掘削する工法の採用が増加している(以下本工法をMFB工法と呼ぶ)。従来のベンチ長が20～30mの上半ショートベンチに比べて、本工法は掘削作業を一カ所に集約することにより施工の省力化を行い、工期短縮などを図るものである。一方、この工法では

- ①ベンチ長が短いことにより切羽前方地山の安定性が低下する。
- ②切羽付近における急激な応力解放により、トンネル横断方向の地山の安定性が低下する。
- ③切羽崩壊が生じた場合の被害が大きくなる。

ことなどが危惧されている。しかし、これらについての調査・研究がまだ少なく、地山状態に応じた適切なベンチ長や補助工法はまだ確立されていない。本研究は主として切羽前方地山の安定性について、事例調査と数値解析により考察を行ったものである。

2. 事例調査

本工法が採用された4トンネルについて平成3年に調査を行い、現状の把握を行った。

本工法は施工延長2,486mの内1,923m(77%)で採用されており、土被りの薄い坑口部や切羽崩壊を生じた地山不良箇所などでは部分的に上半先進工法が採用されていた。最近では坑口から直に本工法で施工を行った例もあり、今後は更に広範囲な地質条件下で多くのトンネルに本工法が採用される方向にある。

1) ベンチ長・形状の現状

図-1に地山等級別のベンチ長・形状の現状を示す。本工法は2車線道路トンネルでは地山等級DⅢまで、新幹線鉄道トンネルでは地山等級I_Nまでの地山で採用されている。ベンチ長は地山等級がCⅠ～DⅢ、IV_N～I_Nへと悪くなるほど、2～6mにまで長くしており、CⅡやDⅠ、I_Nで核残しにする場合もある。

2) 切羽不安定現象の現状

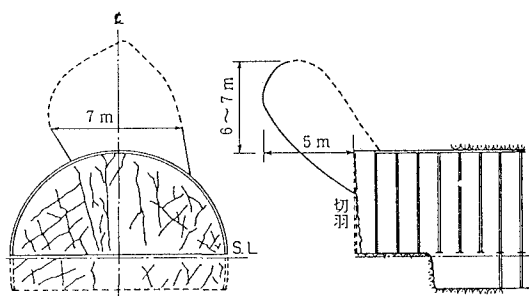
①今回の調査では局所的な天端の崩落や上半切羽面を含む崩落が発生しているが、下半切羽まで達する崩壊の生じた事例はなかった。

②天端部及び上半切羽までの小規模な切羽崩壊が生じた場合、掘削工法の変更は行われていない。

③地下水の湧出などを伴い大量の土砂崩落が生じた場合、本工法の方が崩落量が多くなり対策工も困難となることが考えられたため、上半先進工法に変更することもある。代表的な崩落事例を以下に示す。

①切羽上部から天端部の崩落事例

図-2に示すように上半アーチ部より崩落が発生した。これは、花崗岩層内の断層破砕帯にあった粘土層より上部の土砂が、集中湧水と共に流出したものである。



トンネル諸元

2車線道路トンネル、花崗岩層内の断層破砕帯
支保パターンCⅡ、ベンチ長4m

図-2 切羽天端部の崩落事例

今回の調査で把握した切羽崩落事例は地質不良箇所で発生しており、上半先進工法で施工を行っていたとしても同様に発生したと推察される。しかし、ベンチ長が短いために切羽周辺の変位及び地山応力度が、上半先進工法の場合と比較して大きく異なり、崩壊を誘発していることも考えられるため、次に三次元弾性FEM解析を行い、ベンチ長が切羽の安定性へ与える影響を検討する。

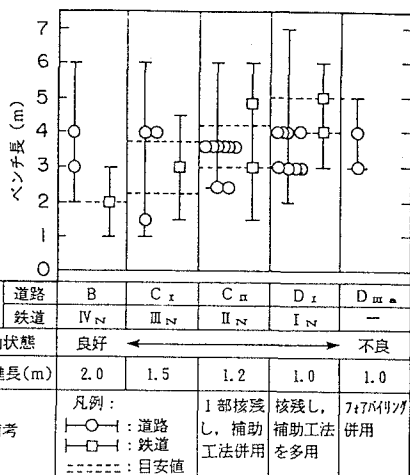
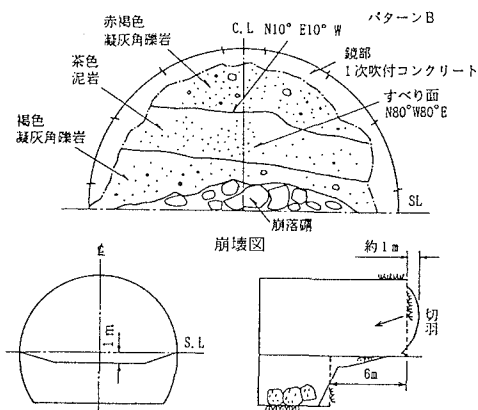


図-1 MFB工法における地山等級別ベンチの現状

②上半切羽の崩落事例

図-3に示すように上半切羽の奥行き約1mが油目に沿って崩落した。切羽はハンマー打撃で容易に碎ける状態であった。



トンネル諸元

複線(新幹線)鉄道トンネル、凝灰角礫岩及び泥岩
支保パターンⅡ_N、ベンチ長約6m

図-3 上半切羽の崩落事例

3. 三次元弾性FEM解析

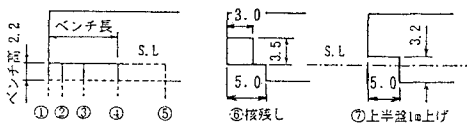
3.1 解析方法及び解析条件

本解析は土盛り100m程度の2車線道路トンネルを想定し弾性条件においてベンチ長が切羽周辺の変位・応力度などにどの程度影響を与えるのか、また、ベンチ高さを高くしたり、核残しなどの掘削工法を採用した場合の効果などを把握するために行う。

地層は単層の等方等質で、側圧係数は $K=1.0$ として、荷重により与える。解析条件を表-1に示す。解析モデルは図-4に示すようにトンネル中央での半断面立方体モデルとした。トンネルは素掘状態で、地山自重は考慮していない。解析ケースを表-2に示す。

表-2 三次元FEM解析ケース

解析ケース	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ベンチ長 (m)	0.0	2.0	5.0	10.0	∞	5.0	5.0
ベンチ高 (m)	0.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	3.2
備考	全断面 工法	上半盤 S.L.	同左	同左	上半盤 掘削工法	核残し	上半盤 1m上げ



3.2 解析結果

1) 切羽の押し出し変位

トンネルセンターで縦断方向に見た切羽面の押し出し変位の算定結果を図-5に示す。また、切羽面での最大押し出し変位量とベンチ長・形状との関係を図-6に示す。同図より全断面工法、ベンチ長2m、5mの場合の最大押し出し量はそれぞれ、上半盤工法の1.32倍、1.12倍、1.05倍、であることが分かる。

これらのことからベンチ長2mでも押し出し防止効果があること。また、ベンチ高を1.0m高くすることや核残しを行うことは、上半盤工法よりも最大押し出し変位を小さくすることが分かる。

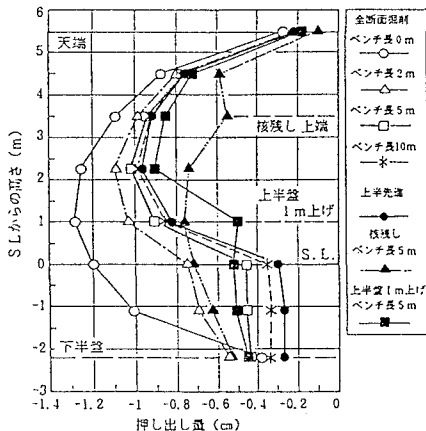


図-5 切羽押し出し変位 (Z方向変位)

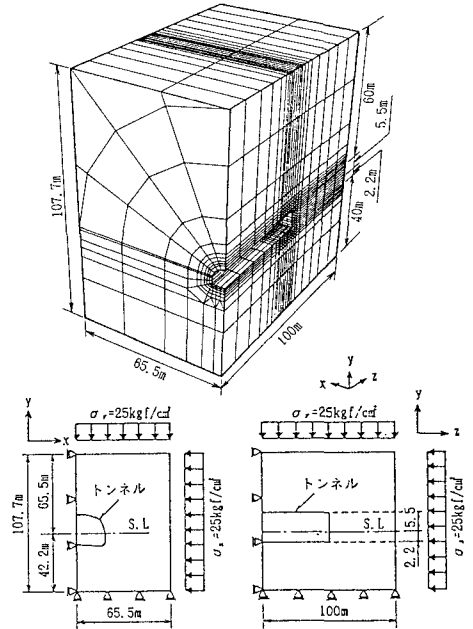


図-4 三次元FEM解析モデル

表-1 三次元FEM解析条件

弾性係数 E (kgf/cm ²)	10,000
ポアソン比 ν	0.3
初期応力 σ ₀ (kgf/cm ²)	25.0
備考	σ _x = σ _y = σ _z = σ ₀ 土盛り高100~125mを想定

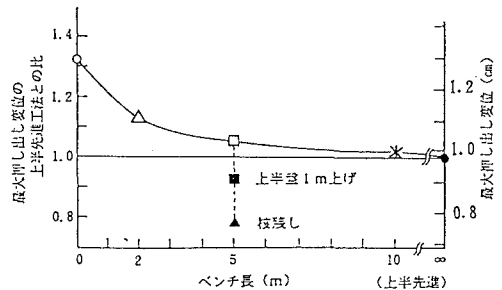


図-6 ベンチ長と切羽の最大押し出し変位との関係
(増減率 = $u_{\max}/u_{5, \max}$, $u_{\max}$:各最大変位,
 $u_{5, \max}$:上半盤工法の最大変位)

2) 切羽の応力状態

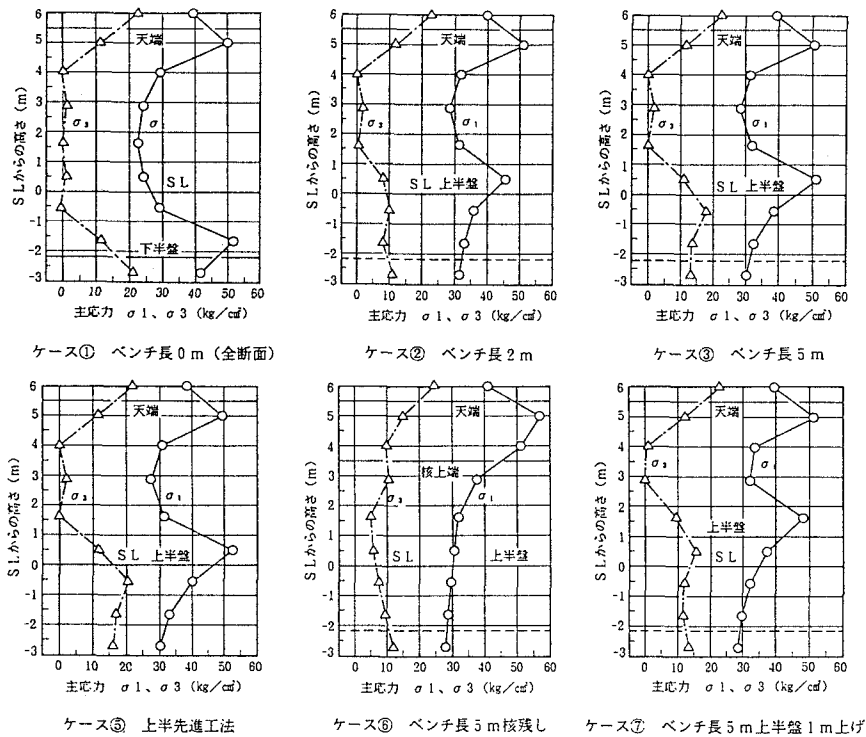


図-7 トンネル中央縦断切羽面における最大最小主応力の分布

- トンネル中央縦断切羽面における最大・最小主応力度分布を図-7に示す。同図より以下のことが分かる。
- ①核残しを除く全てのケースにおいて、トンネル掘進方向の応力度がほぼ0となる2軸応力状態が見られる。その範囲はベンチ位置により異なるが、ベンチより約1.5m高い位置～天端の下方約1.5mの区間である。
 - ②天端～2軸応力状態、及びベンチ～2軸応力状態となる区間において、初期地山応力度の約2倍の応力集中が見られるが、この位置における最大主応力度はベンチ長に関わらずほぼ等しい。また、最小主応力度は各ケースとも12kg/cm²程度で、3軸応力状態である。
 - ③核残しを行えば、切羽は3軸応力状態が保持され切羽の崩壊防止に効果があると言える。
 - ④2軸応力状態区間における最大主応力度は、各ケースで初期応力度の1.16～1.26倍であり、ベンチ長の影響は小さい。このため、切羽面の地山強度比が約1.5以上あれば、圧縮破壊を生じないと考えられる。

4. 切羽の安定解析

4.1 切羽近傍の安全率分布

三次元弾性FEM解析による切羽近傍の応力状態の安定性をモール・クーロンの破壊規準に対する安全率として評価した。地山の強度特性はダム基礎岩盤の岩盤等級から予想される強度定数の範囲を道路トンネルの地山等級と対比して、表-3のように定めた。

表-3 地山分類に対応した地山強度比別の地山強度の設定値

道路トンネルの地山等級	C I～C II	DI	DH	E	
地山強度比 $\sigma_c / \gamma H$	—	4.0	2.0	1.0	0.5
地山の軸圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	—	100.0	50.0	25.0	12.5
地山の内部摩擦角 ϕ (°)	—	45.0	38.0	30.0	15.0
地山の粘着力 C (kgf/cm ²)	—	20.7	12.2	7.2	3.6

電中研分類より推定して設定
 $C = \frac{\sigma_c \cdot (1 - \sin \phi)}{2 \cdot \cos \phi}$

図-8に地山強度比1.0における各ケースのトンネル中央縦断面の安全率分布を示す。

同図より以下のことが分かる。

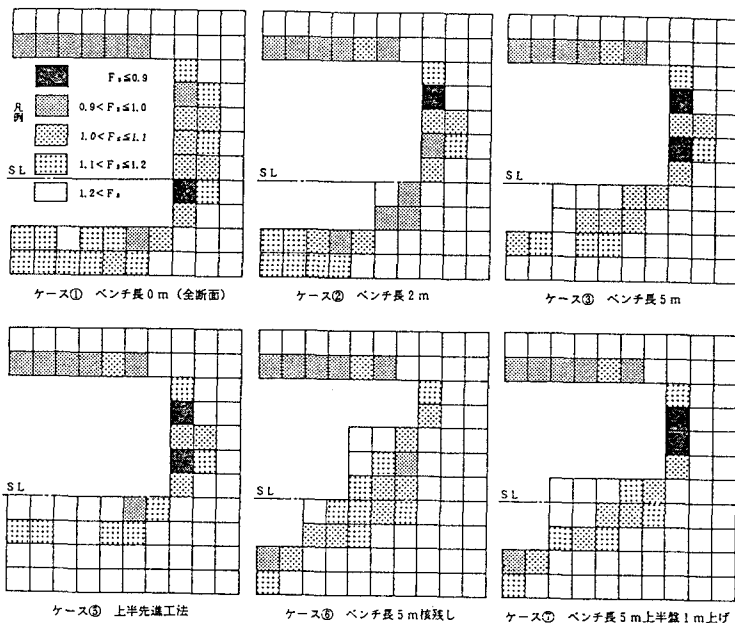


図-8 地山強度比1における各ベンチ長・形状でのトンネルセンターの安全率分布

①安全率が1.2以下となるのは、全断面掘削工法の場合でも高々切羽前方2.0mまでであり、ベンチ長2m、5mの場合の安全率分布は上半先進工法のものと同様である。

②核残しを除く各ケースにおいて安全率が1.0以下となる箇所が見られ、その位置は天端・ベンチ近傍の3軸応力状態から2軸応力状態となる境界付近（天端・ベンチより約1.5m）である。

③核残しを採用した場合、安全率が1.0を下回る所は見られない。また、核残し及びベンチ高さを1.0m高くした場合安全率が1.2を下回る領域は切羽前方1.0mまでである。

5 まとめ

ベンチ長を短くした場合、ベンチ長・形状が切羽の安定性にどのように影響するのかを、事例調査と数値解析により検討した。その結果、ベンチ長が長いほど切羽の押し出し変位は小さくなるが、5m以上あれば上半先進工法と大差がなく、2m程度でも押し出し防止効果が十分ある。切羽前方の塑性域はベンチ長が2mでも上半先進工法でも同じであり、ベンチ長よりもベンチ形状・高さによる影響の方が大きい。等の事が分かった。今回の事例調査や数値解析の結果、および公表文献での施工実績などを考慮してMFB工法における地山等級別ベンチ長・形状の目安を表-4のように設定した。しかし、今回の解析は弾性連続体としての基礎的な考察であり、岩盤の不連続性や膨張性を考慮していない。今後これらの点についても検討を加えたいと考えている。

表-4 MFB工法における地山分類別のベンチ長・形状の目安

地山	道路	B	C I	C II	D I	D II	E	備考
等級	鉄道	IV _a	III _a	II _a	I _a	I _a , I _b , 特S, 特L		
想定地山強度比		4以上			4~2	2~1	1~0.5	
掘削長(m)		2.0	1.5	1.2	1.0	1.0	1.0以下	
ベンチ長(m)		2.0	2.25~3.75	3.0~4.2	4.0~5.0	4.0~5.0	20以上	上半1間掘進時 ~下半掘進時
ベンチの掘進間数(間)		1.0	1.5~2.5	2.5~3.5	4.0~5.0	4.0~5.0	—	
ベンチ形状					(部分的に核残し)	核残し	核残し	
補助工法				部分的に併用	多用	多用		ファイバーステッド、鋼打板等

参考文献

- 1) 前田建設工業(株)：トンネル切羽の安定に及ぼすベンチ長の影響に関する研究 技術研究所報VOL.33
- 2) 前田建設工業(株)：MFB工法による山岳トンネル施工計画事例 社内資料 平成3年9月
- 3) 菊池宏吉、他：ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価、応用地質特別号、1984年