

投稿論文 (和文報告)

**TECHNICAL
REPORT**

ミニベンチ工法における トンネル挙動に関する一考察

篠川俊夫¹・三井康司²

1 正会員 工修 佐藤工業(株) 中央技術研究所(〒243-02 厚木市三田 47-3)
2 正会員 工博 信州大学教授 工学部社会開発工学科

ミニベンチ工法におけるトンネル挙動を把握するために、ミニベンチ工法とベンチカット工法における施工過程を、ベンチ長の違いとしてモデル化し、支保部材を考慮した有限要素法による3次元弾性逐次掘削解析を行い、掘削工法の違いによるトンネル挙動の差異を考察した。上半脚部沈下および切羽押し出し量や吹付けコンクリート応力の発生状況については掘削工法の違いによる差異が認められたが、他のトンネル挙動に関してはミニベンチ工法とベンチカット工法ではほぼ同様であるという結果が得られた。

Key Words: NATM, FEM, 3-dimensional analysis, Mini bench method, Bench cut method, Tunnel behavior

1. はじめに

近年、建設業は「危険」、「きつい」、「汚い」のいわゆる3Kと呼ばれる仕事のひとつと言われ、熟練労働者の不足と高齢化が進み、恒常的な労働者不足が深刻な問題となっている。この問題の解決策のひとつとして、工事の機械化、省力化や標準化を積極的に図り、安全で合理的な施工を確立していくことが急務となっている。トンネル工事においても、工事の機械化を図り、作業の単純化、自動化やロボット化を進めることにより、危険な作業を低減し、より安全で清潔な作業環境を確保することが重要な課題となっている。

山岳トンネル工事では、標準工法としてのNATMの定着とともに、大型機械の導入による施工の合理化が積極的に行われるようになってきている。トンネル工事において、トンネル掘削工法は、施工性、経済性、安全性および作業環境にもっとも大きな影響を与えるもののひとつである。従来、大断面トンネルの掘削では、切羽を上下に分割するベンチカット工法のなかでも、ベンチ長を30m程度にとるショートベンチ工法が最も一般的な掘削工法として多く採用されてきた。一方、近年、新たな掘削機械の開発に伴い、大断面トンネルの掘削工法として、ミニベンチ工法が採用されるようになってきた(ミニベンチ工法は、補助ベンチ付全断面工法、マイクロベンチ工法あるいはフリーベンチ工法とも呼ばれている)。ミニベンチ工法は、2~7mという短いベンチ長で、トンネル下半盤より上半と下半の削孔、装薬、ロックボルト打設ができる油圧ジャンボを用いて、上半と下半の並行

作業によりほぼ全断面掘削に近い状態で施工するという、切羽作業の集約化と並行作業を可能にしたNATMの効率的な掘削システムである。従来、ミニベンチ工法は、軟弱地山や膨張性地山等の不安定な地質のために早期にインバートの閉合が必要な地山に採用されていた。しかしながら、最近では、ベンチカット工法(以下、本論文では、ミニベンチ工法との対比で、従来のロングベンチ工法およびショートベンチ工法を総称してベンチカット工法と記述する。)を採用していた中硬岩地山や軟弱地山を対象にして、大断面トンネルにおける施工の合理化のために、ベンチカット工法に代わる掘削工法としてミニベンチ工法が採用されるようになってきた。ミニベンチ工法は、ベンチカット工法に比べて作業空間が広く取れるため、大型施工機械の投入が可能となり、施工の急速化、省力化の面で有利な工法である。また、作業箇所が一箇所を集約できるため、作業の簡素化、作業環境及び安全の向上が図れる利点もある。さらに、地質が悪化した場合、早期に断面の閉合が可能であり、幅広い地質条件に適用できる掘削工法である。

今後、ミニベンチ工法がさらに採用されていくためには、解析や計測により、トンネル挙動についてのベンチカット工法との相違点および一致点や力学的・トンネル工学的な特長を把握することが必要であるとともに、ミニベンチ工法の適用範囲、支保パターンおよび管理基準などを検討することが必要である。しかしながら、ミニベンチ工法については、計測を含めた施工実績は報告されている^{1)~3)}が、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによるトンネル挙動の差異については、

掘削および支保という施工過程を考慮した2次元有限要素解析による検討⁴⁾と、無支保状態でベンチ長を変化させた3次元有限要素解析による検討⁵⁾が報告されているだけである。このため、ミニベンチ工法におけるトンネル挙動に関しては、解析あるいは計測などにより十分には把握されていないのが現状である。

トンネル掘削時の挙動解析としては、トンネル横断面に平面ひずみ状態を仮定して、切羽の進行を応力解放率として考慮した2次元解析が通常行われている。3次元解析については、トンネル交差部の検討などで従来行われていた^{6)~9)}が、計算時間、計算コストやモデル化の問題などで、無支保状態での解析がほとんどであった。しかしながら、ハードウェアおよびソフトウェアの進歩により、最近、支保部材を考慮したトンネル掘削解析が行われてきつつある¹⁰⁾。都市トンネルを対象とした先受け工などの補助工法の検討においては、支保部材をモデル化した3次元解析の必要性や重要性が高まっている¹¹⁾。ミニベンチ工法とベンチカット工法の比較においては、ベンチ長が問題となるが、2次元解析では、ベンチ長の違いをいわゆる応力解放率を変化させることによって考慮している⁴⁾。

本研究では、ミニベンチ工法におけるトンネル挙動を、ベンチカット工法におけるトンネル挙動と比較検討することにより把握し、ミニベンチ工法の有効性を検証することを目的としている。しかしながら、実施工において、まったく同一な条件でミニベンチ工法とベンチカット工法のトンネル挙動を計測して比較検討することは困難である。そのため、本研究では、数値解析により同一条件下での2つの掘削工法におけるトンネル挙動を比較検討する。検討にあたっては、ミニベンチ工法とベンチカット工法における施工過程を、ベンチ長の違いとしてモデル化し、支保部材を考慮した有限要素法による3次元弾性逐次掘削解析を行うことにより、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによるトンネル挙動の差異について考察する。

2. ミニベンチ工法におけるトンネル挙動の考え方

ミニベンチ工法とベンチカット工法における変形挙動は図-1に示すようにモデル化できる。ベンチカット工法では、上半掘削時に一度変形が収束するが、下半切羽の接近に伴い再び変形が増加する。一方、ミニベンチ工法では、ほぼ全断面に近い掘削のため、変形挙動も図-1に示すように、全断面工法におけるトンネル挙動に近い変形挙動になると考えられる。地山を弾性体とすると、無支保状態における最終変位は、重ね合せの原理からミニベンチ工法とベンチカット工法で同一となるが、支

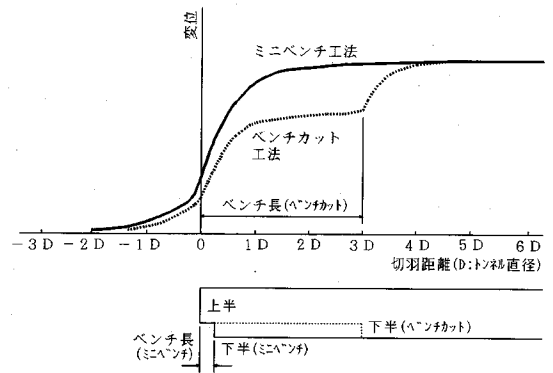


図-1 トンネル変形挙動の概念図

保がある場合には、加背割りおよび支保部材の打設によりトンネル全体の変形特性が変化するため、最終変位は異なるものになる。

ミニベンチ工法における地山挙動は、ベンチカット工法に比べて1サイクルあたりの掘削断面積が大きい、ベンチ長が極端に短いため、掘削により応力解放される面積が大きいことによるゆるみの増大と、早期の断面閉合による周辺地山のゆるみの抑制効果が影響を及ぼし合うと考えられる。一般に、応力解放される面積が大きければ大きいほど、切羽より前方での先行変位は大きくなる。このような先行変位は切羽前方の地山のゆるみを増大させたり、地山の強度劣化を引き起こしたりする可能性がある。このため、ベンチカット工法の方がミニベンチ工法に比べて、切羽前方において地山をゆるめないと考えられる。一方、掘削断面を早期に閉合することにより、支保部材が地山の変形を拘束するために切羽周辺において地山のゆるみや地山の強度劣化が生じ難くなる。このため、ミニベンチ工法の方がベンチカット工法に比べて、掘削後の地山をゆるめないと考えられる。

ミニベンチ工法は、ベンチカット工法と比べて上半と下半が分割されている時間が短く、インバートの施工により早期に掘削断面を閉合するので、上半脚部などに極端な応力集中は発生せず、内空変位はほぼ均等に発生し、支保部材にも均等な応力が作用すると考えられる。一方、ベンチカット工法は、上半と下半の掘削断面が完全に分割されているため、上半脚部に応力集中が起こり、ゆるみや塑性化の進行に伴う支保工脚部の沈下や内空変位の増大を生じる可能性があると考えられる。また、支保部材についても、下半部材に発生する応力に比べて上半支保部材に作用する応力が大きい傾向にあると考えられる。

表-1 支保パターン (CIIパターン)

地山等級		C II
一掘進長		1.2 m
吹付け厚		10 cm
ロボット カット	径	25 mm
	長さ	3.0 m
	周方向	1.5 m
	延長方向	1.2 m
鋼支 製保 工	上半部	H-125
	下半部	なし
建込間隔		1.2 m

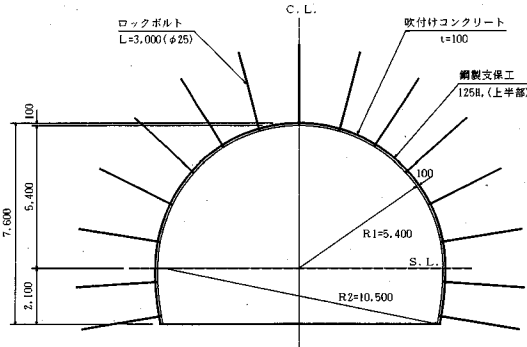


図-2 支保パターン (CIIパターン)

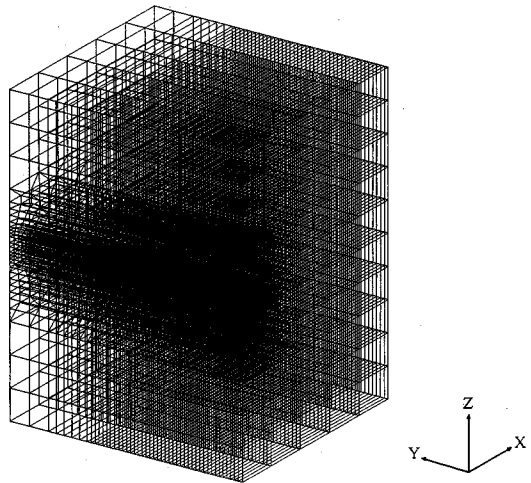
3. 解析概要

検討対象としたトンネルは、ミニベンチ工法による施工実績^{(1),(2)}が多い高速自動車道の2車線トンネルを想定し、土被りはスプリングライン (SL) より50m、支保パターンは、日本道路公団の標準支保パターンにおいて実施工での採用実績の多い支保パターン^{(1),(2),(12)}であるCIIパターン⁽³⁾を設定する。支保パターンを表-1、図-2に示す。

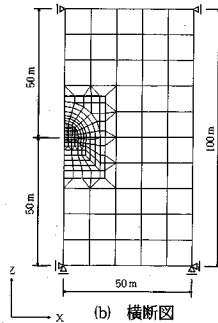
掘削工法は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の2ケースである。一掘進長は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の上半断面が1.2m、ベンチカット工法の下半断面が2.4mである。ミニベンチ工法のベンチ長は3.6mとする。

解析方法は、有限要素法による3次元弾性逐次掘削解析である。解析モデルは、対称性を考慮して図-3に示すようにトンネル中心軸を対称とした半断面である。支保部材は、吹付けコンクリートを3次元ソリッド要素、ロックボルトをバー要素、鋼製支保工をビーム要素でモデル化する。支保部材のモデル図を図-4に示す。

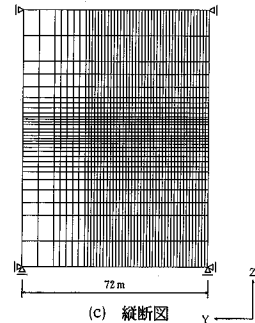
地山物性値は、CIIパターンに対応する地山等級CIIを考慮して表-2に示すように設定する。吹付けコンクリートについては若材令は考慮せず、文献14)に示されている等価弾性係数34,000kgf/cm²を用いる。また、初期応力状態は、土被り圧による等方圧(静水圧)状態を



(a) 立体図

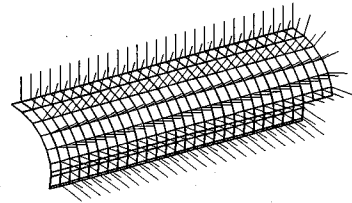


(b) 横断面

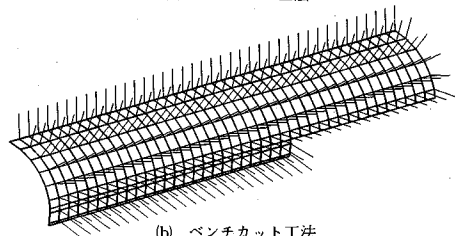


(c) 縦断面

図-3 解析モデル



(a) ミニベンチ工法



(b) ベンチカット工法

図-4 支保部材モデル

表-2 地山物性値

弾性係数	10,000 kgf/cm ²
ポアソン比	0.3
単位体積重量	2.5 tf/m ³

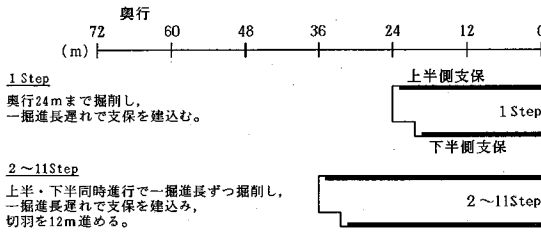


図-5 解析ステップ (ミニベンチ工法)

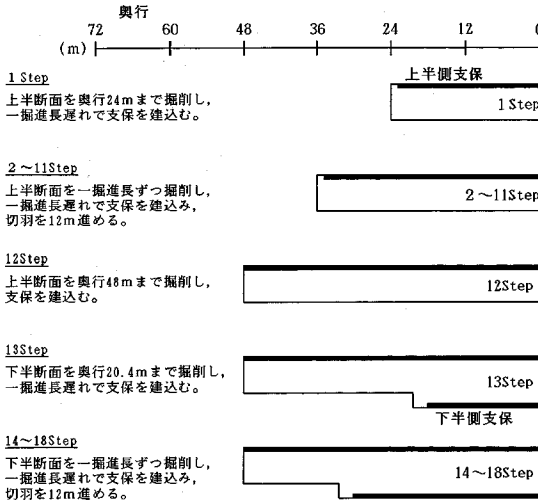


図-6 解析ステップ (ベンチカット工法)

設定する。

掘削計算にあたっては、解析モデルの境界の影響を除くとともに、解析ステップ数を低減させるため、上半切羽を24m進行させた位置(トンネル直径 $D=11\text{m}$ の約2倍に相当)を初期状態として、一掘進長ずつ掘削・支保を繰返しながら切羽を12m(トンネル直径 D にほぼ相当)進める逐次掘削解析を行うことを基本とする。ミニベンチ工法とベンチカット工法の解析ステップを図-5, 6に示す。図-5, 6のトンネルのモデル図において、上部の太線は上半側の支保が、下部の太線は下半側の支保が建込まれていることを示す。なお、ベンチカット工法では、下半断面の掘削前に、ベンチカット工法として上半断面を下半切羽位置からある程度離れた位置まで先行させておくために、12ステップにおいて奥行48m(約 $4D$)まで掘削するとともに、切羽まで支保を建込む。また、13ステップの奥行20.4mはミニベンチ工法の1ステップの下半切羽位置に対応している。

解析結果については、各解析ステップにおいて、奥行方向の着目点(節点あるいは要素)で、前ステップの計算値との差から増分値を求め、着目点から切羽位置までの距離を考慮して重合せることにより、切羽が-24mから24mまで進行する過程におけるトンネル挙動として整理する。たとえば、切羽位置24mでは、奥行48mは

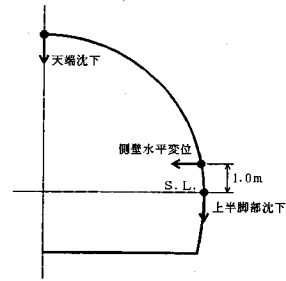


図-7 トンネル壁面変位の着目点

切羽が24m手前(-24m)の位置にあり、切羽位置36mでは、奥行12mは切羽が24m進んだ位置にあることになる。ここで、切羽距離24mは、トンネル直径($D=11\text{m}$)のほぼ2倍に相当する。なお、ミニベンチ工法の切羽距離は上半断面の切羽位置からの距離であり、ベンチカット工法の切羽距離は、上半掘削時は上半断面の、下半掘削時は下半断面の切羽位置からの距離である。

4. 解析結果

(1) トンネル壁面変位

トンネル壁面変位として、図-7に示す側壁水平変位、天端沈下および上半脚部沈下に着目する。

a) 側壁水平変位

切羽距離24mにおける側壁水平変位を表-3、側壁水平変位の経時変化を図-8に示す。

①切羽距離24mにおいて、ミニベンチ工法が5.84mm、ベンチカット工法が5.83mmと、ミニベンチ工法とベンチカット工法でほぼ同一である。

②切羽進行に伴う影響範囲は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の下半掘削時が $-0.5D \sim 1D$ 、ベンチカット工法の上半掘削時が $-0.5D \sim 0.5D$ である。

ミニベンチ工法では、上半と下半が短いベンチ長で同時に掘削されるため、上半切羽通過後、下半切羽通過の影響がすぐに現れている。一方、ベンチカット工法の上半掘削時は、上半断面のみの掘削のため、ミニベンチ工法に比べて掘削断面積が小さく、影響範囲も狭い。また、下半掘削時の影響範囲が掘削断面積の大きい上半掘削時よりも広いのは、下半掘削時の一掘進長(2.4m)を上半掘削時(1.2m)の2倍としているためである。

b) 天端沈下

切羽距離24mにおける天端沈下を表-3、天端沈下の経時変化を図-9に示す。

①切羽距離24mにおいて、ミニベンチ工法が7.63mm、ベンチカット工法が7.69mmと、ミニベンチ工法とベンチカット工法でほぼ同一である。

②切羽進行に伴う影響範囲は、ミニベンチ工法とベンチ

表-3 トンネル壁面変位 (切羽距離 24m)

	ミニベンチ工法	ベンチカット工法
側壁水平変位	-5.84 mm	-5.83 mm
天端沈下	-7.63 mm	-7.69 mm
上半脚部沈下	-0.85 mm	-1.06 mm

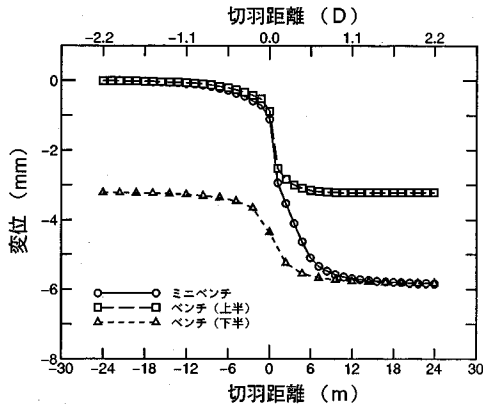


図-8 側壁水平変位の経時変化

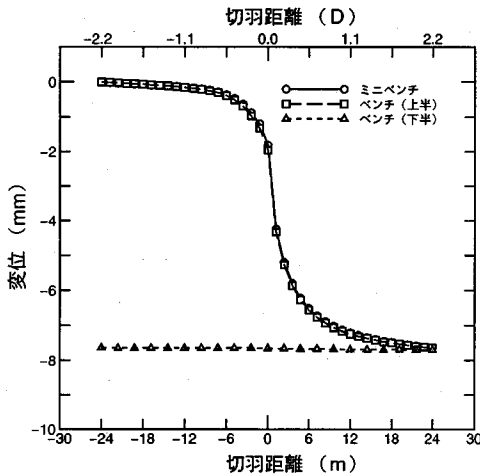


図-9 天端沈下の経時変化

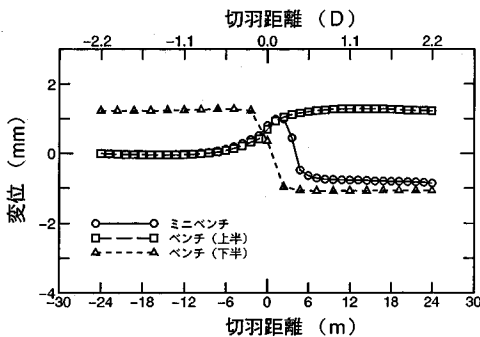


図-10 上半脚部沈下の経時変化

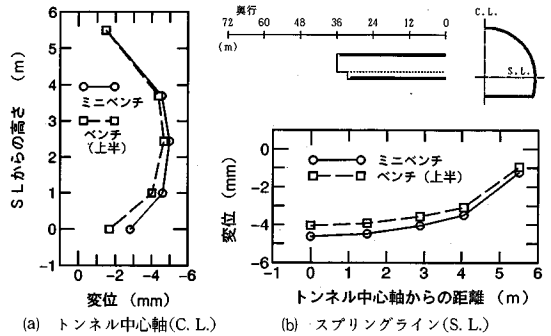


図-11 切羽押し出し変位 (上半切羽位置: 奥行 36m)

チカット工法の上半掘削時が $-1D \sim 2D$ である。

ベンチカット工法では、解析上、下半掘削時にすでに上半断面が先行して掘削されており、天端付近には掘削相当外力が作用せず、下半断面の周囲にのみ掘削相当外力が作用するため、下半掘削の影響が天端沈下に現れていない。すなわち、天端付近で掘削に伴い解放される掘削相当外力は、ベンチによる影響をあまり受かず、土被り圧のみの影響を受けている。

c) 上半脚部沈下

切羽距離 24m における上半脚部沈下を表-3, 上半脚部沈下の経時変化を図-10 に示す。

①切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 0.85 mm, ベンチカット工法が 1.06mm と、ミニベンチ工法とベンチカット工法で異なり、ベンチカット工法における上半脚部の沈下の方がミニベンチ工法の約 1.2 倍大きい。

②切羽進行に伴う影響範囲は、ミニベンチ工法とベンチカット工法ともに $-0.5D \sim 0.5D$ である。

ベンチカット工法では、解析上、上半掘削時に、下半側から上向きの掘削相当外力が作用することにより上半脚部が浮上り、下半掘削時に、上半掘削により隅角部である上半脚部付近に集中した応力が解放されて、上半脚部に下向きの掘削相当外力が作用することにより上半脚部が沈下する。ミニベンチ工法も同様の傾向を示し、上半切羽通過時は浮上りを示し、その後、下半切羽通過とともに脚部沈下を示す。

d) 切羽押し出し量

ミニベンチ工法において、上半切羽位置が図-5.6 に示す奥行 36m の地点にある時のトンネル中心軸 (C.L.) およびスプリングライン (S.L.) における切羽押し出し量を図-11 に示す。ここで、スプリングラインは下半切羽位置の切羽押し出し量である。

①トンネル中心部において、トンネル中心軸ではミニベンチ工法が 2.82mm, ベンチカット工法が 1.69 mm であり、スプリングラインではミニベンチ工法が 4.62mm, ベンチカット工法が 4.04mm である。

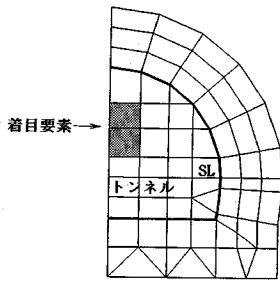


図-12 地山せん断応力の着目要素

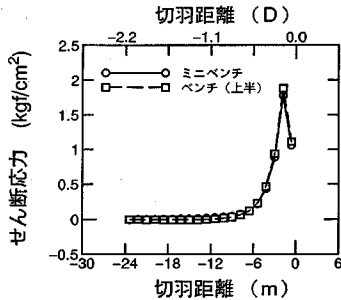


図-13 地山せん断応力 τ_{yz} の経時変化

②トンネル中心軸における最大切羽押し出し量は、ミニベンチ工法が5.00mm、ベンチカット工法が4.68mmである。

(2) 地山応力

地山応力として、図-12に示すトンネル上半断面中央部の要素のトンネル縦断方向に発生するせん断応力 τ_{yz} に着目する。トンネル掘削において、切羽の自立性は重要な問題であり、切羽の安定性を考える上で、切羽前面のトンネル縦断方向のせん断応力がどのような状態にあるかを把握しておくことは重要である^{(15),(16)}。しかしながら、通常行われている2次元解析では、トンネル横断面に平面ひずみ状態を仮定しており、トンネル縦断方向のせん断応力 $\tau_{yz}=0$ となり、切羽の安定性を検討することは困難である。3次元解析を行うことによって、トンネル縦断方向の発生応力が求められ、切羽の安定性を評価することが可能になる。図-12に示す2つの着目要素に発生するトンネル縦断方向のせん断応力 τ_{yz} の平均値の経時変化を図-13に示す。

①トンネル縦断方向のせん断応力の発生状況は、ミニベンチ工法とベンチカット工法ともに同様であり、切羽が1Dより手前に近づくとも発生しはじめ、切羽より1列奥の地山要素でピークを示し、切羽では応力の解放面となるため奥の地山要素に比べてせん断応力が減少する。

②発生するせん断応力の最大値は、ミニベンチ工法が1.8kgf/cm²、ベンチカット工法が1.9kgf/cm²と同

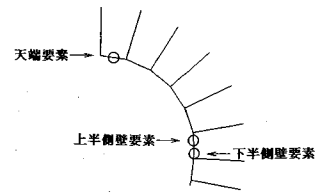


図-14 吹付けコンクリート最大せん断応力の着目要素

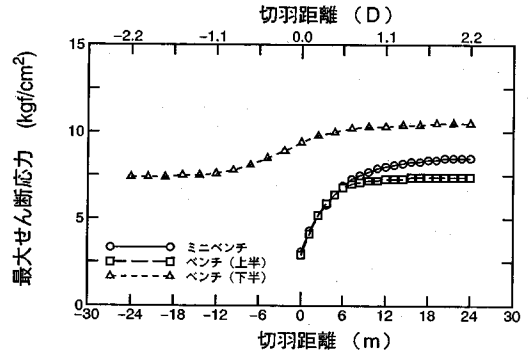


図-15 吹付けコンクリート(天端)最大せん断応力の経時変化

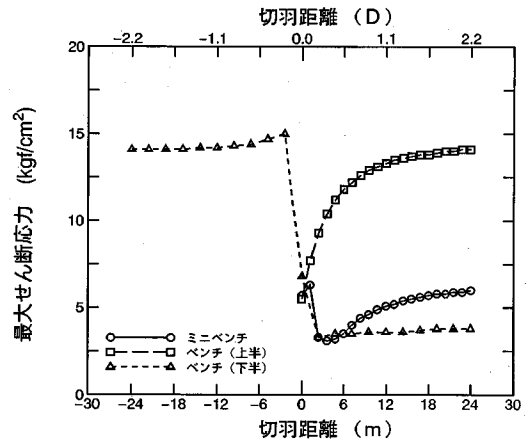


図-16 吹付けコンクリート(上半側壁)最大せん断応力の経時変化

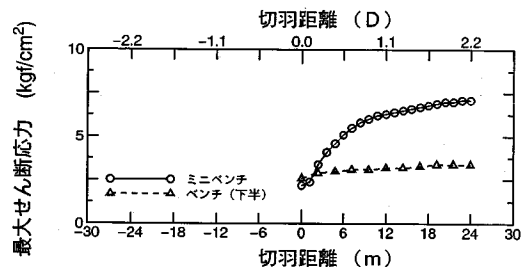


図-17 吹付けコンクリート(下半側壁)最大せん断応力の経時変化

程度である。

(3) 部材応力

a) 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートについては、図-14 に示す天端、上半側壁および下半側壁の各要素のトンネル横断面に発生する最大せん断応力に着目する。天端、上半側壁および下半側壁の最大せん断応力の経時変化を図-15~17 に示す。

- ①天端の最大せん断応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 8.5kgf/cm^2 、ベンチカット工法が 10.5kgf/cm^2 であり、ミニベンチ工法はベンチカット工法の 0.8 倍となっている。
- ②切羽進行に伴う天端の最大せん断応力の影響範囲は、ミニベンチ工法が $1.5D$ まで、ベンチカット工法が上半掘削時と下半掘削時とも $1D$ までであり、ベンチカット工法の下半掘削時は $-1D$ より掘削による影響が現れる。
- ③上半側壁の最大せん断応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 6.0kgf/cm^2 、ベンチカット工法が 3.8kgf/cm^2 であり、ミニベンチ工法はベンチカット工法の 1.6 倍となっている。
- ④切羽進行に伴う上半側壁付近の最大せん断応力の影響範囲は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の上半掘削時が $1.5D$ まで、ベンチカット工法の下半掘削時は $1D$ までであり、ベンチカット工法の下半掘削時は $-1D$ より掘削による影響が現れる。
- ⑤下半側壁の最大せん断応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 7.1kgf/cm^2 、ベンチカット工法が 3.4kgf/cm^2 であり、ミニベンチ工法はベンチカット工法の 2.1 倍となっている。
- ⑥切羽進行に伴う下半側壁の最大せん断応力の影響範囲は、ミニベンチ工法では $1.5D$ までであるが、ベンチカット工法では、下半掘削による下半側壁への影響は切羽通過直後に現れるだけである。

b) ロックボルト

ロックボルトについては、図-18 に示す天端、上半側壁および下半側壁のトンネル壁面から 1m の区間における各要素に発生する軸応力に着目する。天端、上半側壁および下半側壁の軸応力の経時変化を図-19~21 に示す。

- ①天端の軸応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 2108kgf/cm^2 、ベンチカット工法が 2058kgf/cm^2 と同程度である。
- ②切羽進行に伴う天端の軸応力の影響範囲は、ミニベンチ工法が $1D$ まで、ベンチカット工法では上半掘削時と下半掘削時ともに $0.5D$ までであり、ベンチカット工法の下半掘削時は $-1D$ より掘削による影響が現れる。
- ③上半側壁の軸応力は、切羽距離 24m において、ミニ

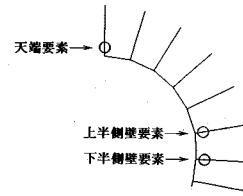


図-18 ロックボルト軸応力の着目要素

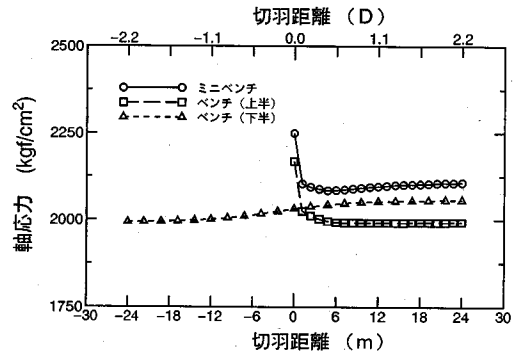


図-19 ロックボルト (天端) 軸応力の経時変化

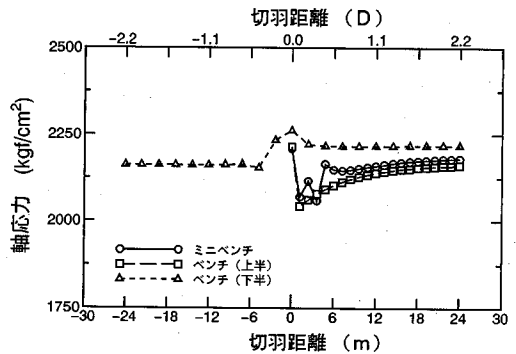


図-20 ロックボルト (上半側壁) 軸応力の経時変化

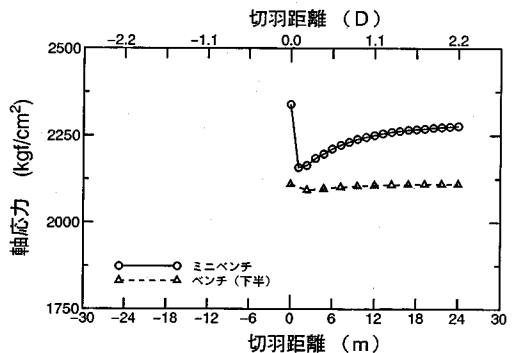


図-21 ロックボルト (下半側壁) 軸応力の経時変化

ベンチ工法が 2181kgf/cm^2 、ベンチカット工法が 2218kgf/cm^2 と同程度である。

- ④切羽進行に伴う上半側壁の軸応力の影響範囲は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の上半掘削時が

1.5D まで、ベンチカット工法の下半掘削時が 0.5D までであり、ベンチカット工法の下半掘削時は -0.5D より掘削による影響が現れる。

⑤ 下半側壁の軸応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 2277kgf/cm²、ベンチカット工法が 2112kgf/cm² であり、1.08 倍と若干ではあるがミニベンチ工法の軸応力が大きい。

⑥ 切羽進行に伴う下半側壁の軸応力の影響範囲は、ミニベンチ工法が 1.5D までであるが、ベンチカット工法では、下半掘削による下半側壁への影響は到達時に現れるだけである。

なお、ミニベンチ工法とベンチカット工法の上半掘削時において、ロックボルト打設から次のステップにかけて軸応力が減少しているのは、トンネル近傍の地山の変位分布に、切羽から一掘進長遅れでの支保の建込みの影響が現れていることによると考えられる。各解析ステップにおいて、切羽から一掘進長は無支保状態にある。

c) 鋼製支保工

鋼製支保工については、図-22 に示す天端および上半側壁の各要素に発生するトンネル内空側の縁応力に着目する。CII パターンでは、鋼製支保工が上半部だけに建込まれる。天端のおよび上半側壁の縁応力の経時変化を図-23~24 に示す。

① 天端の縁応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 1794kgf/cm²、ベンチカット工法が 1827kgf/cm² とほぼ同一である。

② 切羽進行に伴う天端の軸応力の影響範囲は、ミニベンチ工法が 1.5D まで、ベンチカット工法が上半掘削時と下半掘削時ともに 1D までであり、ベンチカット工法の下半掘削時は -1D より掘削による影響が現れる。

③ 上半側壁の縁応力は、切羽距離 24m において、ミニベンチ工法が 1319kgf/cm²、ベンチカット工法が 1299kgf/cm² とほぼ同一である。

④ 切羽進行に伴う上半側壁の軸応力の影響範囲は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の上半掘削時が 1.5D まで、ベンチカット工法の下半掘削時が 0.5D までであり、ベンチカット工法の下半掘削時は -1D より掘削による影響が現れる。

5. 考察

(1) トンネル壁面変位

側壁水平変位の切羽進行に伴う経時変化は、ミニベンチ工法とベンチカット工法で、図-1 の概念図に示すように変形しており、最終変位量もほぼ同一である。また、天端沈下は、ベンチカット工法の下半掘削による影響をほとんど受けず、ミニベンチ工法とベンチカット工法の

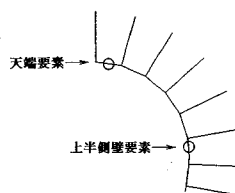


図-22 鋼製支保工縁応力の着目要素

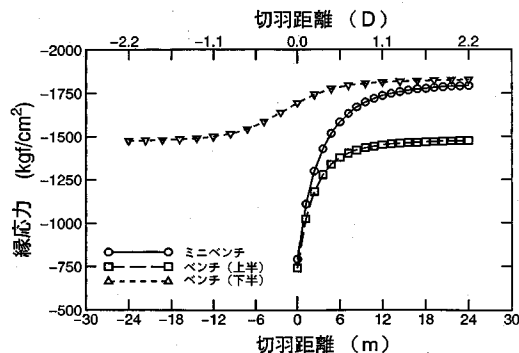


図-23 鋼製支保工 (天端) 縁応力の経時変化

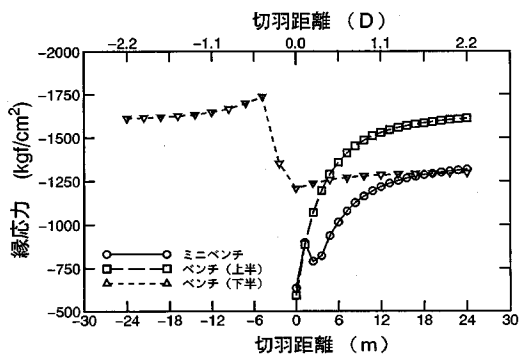


図-24 鋼製支保工 (上半側壁) 縁応力の経時変化

上半掘削時にはほぼ同一の挙動をしている。このように、側壁水平変位の経時変化には掘削工法の違いによる挙動の差異が現れているが、先行変位や最終変位についてはほぼ同一であり、トンネル掘削時に通常計測される内空変位や天端沈下の変位量に関しては、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は認められない。

壁面変位では、上半脚部の沈下量にミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異が認められる。ベンチカット工法では、上半掘削と下半掘削が完全に分離されているため、応力集中が起こりやすく、その応力が掘削とともに解放されるため、脚部沈下がミニベンチ工法と比べて大きくなっている。

また、切羽押し出し量についても、掘削工法の違いによる差異が認められる。切羽押し出し量は、天端や側壁などのトンネル壁面付近では、ミニベンチ工法とベンチ

カット工法でほぼ同一であるが、トンネル中心に向かうにしたがってミニベンチ工法の方が大きくなっている。ミニベンチ工法では、上半掘削時に短いベンチ長で同時に下半掘削も行われるため、ベンチカット工法に比べてトンネル中心付近で切羽押し出し量が大きくなっている。

(2) 地山応力

切羽前面のトンネル縦断方向のせん断応力については、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は認められない。切羽前面におけるトンネル縦断方向のせん断応力の発生は、上半断面の掘削による影響を受け、特に掘削断面積の大きさに影響を受けると予測されるが、下半断面の切羽位置や掘削による影響は受けていない。このように、上半切羽の地山応力に関しては、ベンチ長が短いミニベンチ工法でも、ベンチの効果を発揮し、ミニベンチ工法とベンチカット工法でほぼ同一の挙動を示している。

(3) 部材応力

a) 吹付けコンクリート

ミニベンチ工法では、天端、上半側壁および下半側壁における最大せん断応力は同程度であり、応力がほぼ一様に発生していると考えられる。これは、上半と下半が短いベンチ長で同時に掘削されることにより、全断面工法の状態に近づく傾向にあるためと考えられる。一方、ベンチカット工法では、上半掘削と下半掘削が完全に分離されているため、天端に比べて側壁部では1/3程度の応力が発生しているだけである。吹付けコンクリートについては、ミニベンチ工法がほぼ一様な応力を発生しており、ベンチカット工法と比較して、構造物としては安定的な挙動を示す傾向にあると考えられる。

b) ロックボルト

ロックボルトに発生する軸応力は、下半側壁においてミニベンチ工法とベンチカット工法で若干異なるが、天端および上半側壁において同程度であり、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異はあまり明確には認められない。

c) 鋼製支保工

鋼製支保工に発生する縁応力は、天端および上半側壁ともミニベンチ工法とベンチカット工法においてほぼ同一であり、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は認められない。これは、CIIパターンでは、鋼製支保工が上半部のみ李建込まれていることも理由のひとつと考えられる。

6. おわりに

ミニベンチ工法におけるトンネル挙動を把握するために、ミニベンチ工法とベンチカット工法における施工過程を、ベンチ長の違いとしてモデル化し、支保部材を考慮した有限要素法による3次元弾性逐次掘削解析を行い、掘削工法の違いによるトンネル挙動の差異を考察した。

本研究により以下のような知見が得られた。

- 1) トンネル掘削時に通常計測される内空変位や天端沈下の変位量に関しては、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は認められない。
- 2) 上半脚部の沈下量はミニベンチ工法に比べてベンチカット工法の方が大きい。
- 3) 切羽押し出し量はトンネル中心部でベンチカット工法に比べてミニベンチ工法の方が大きい。
- 4) 切羽前面のトンネル縦断方向のせん断応力については、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は認められない。
- 5) 吹付けコンクリートについては、ミニベンチ工法では、天端、上半側壁および下半側壁で最大せん断応力が同程度であり、応力がほぼ一様に発生していると考えられる。一方、ベンチカット工法では、天端に比べて側壁部では1/3程度の応力が発生しているだけである。
- 6) ロックボルトの軸応力は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異はあまり明確には認められない。
- 7) 鋼製支保工の縁応力は、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は認められない。

ミニベンチ工法では、上半と下半が短いベンチ長で同時に掘削されることにより、全断面工法の状態に近づく傾向にあるが、ベンチカット工法では、上半掘削と下半掘削が完全に分離されている。このため、ミニベンチ工法とベンチカット工法の掘削工法の違いによる差異は、特に側壁部やトンネル中心部のトンネル挙動に現れる。

本研究は、ミニベンチ工法の採用実績が多いひとつの地山条件に特定して、数値解析手法によりミニベンチ工法とベンチカット工法のトンネル挙動の差異について考察したものである。本研究で採用した地山条件においては、上半脚部沈下および切羽押し出し量や吹付けコンクリート応力の発生状況に掘削工法の違いによる差異が認められたが、他のトンネル挙動に関してはミニベンチ工法とベンチカット工法ではほぼ同様であるという結果が得られた。

ミニベンチ工法は、大断面トンネルの施工において効率的な掘削工法であり、トンネル挙動がベンチカット工法とほぼ同様であるならば、施工の急速化や省力化の面

で有利であり、ミニベンチ工法を採用する利点がある。このため、今後は地山条件の悪い地山も含めてベンチカット工法に代わってミニベンチ工法がますます採用されていくと考えられる。

参考文献

- 1) 細江増一, 新地和昭, 石田義昭: ミニベンチにおける効率的施工 (九州横断自動車道杵島トンネル), トンネルと地下, Vol. 19, No. 8, pp. 23-28, 1988.
- 2) 大川征治, 伊藤修, 大窪克巳: 新第三紀泥岩を補助ベンチ付き全断面で掘削 (長野自動車道会田トンネル), トンネルと地下, Vol. 23, No. 4, pp. 7-15, 1992.
- 3) 市橋学, 斉藤浩司, 戸出正義, 服部一夫: 大型自由掘削機でミニベンチ掘削 (北陸新幹線里見トンネル), トンネルと地下, Vol. 23, No. 7, pp. 7-18, 1992.
- 4) 篠川俊夫, 西野治彦, 中村創, 山本松生: 有限要素解析によるミニベンチカット工法におけるトンネル挙動, 土木学会第47回年次学術講演会, 第三部門, pp. 708-709, 1992.
- 5) 関順一, 鈴木武志, 鷲澤栄紀, 西野健一朗: 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, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 411-415, 1993.
- 6) Hocking, G.: Stresses around tunnel intersections, *Computer Method in Tunnel Design* (Ed. A. Burt), The Institution of Civil Engineers, pp.41-60, 1978.
- 7) 伊藤文雄, 竹田直樹, 亀村勝美: 斜交トンネルが本線トンネルに与える影響, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 261-265, 1985.
- 8) Tsuchiyama, S., Hayakawa, M., Shinokawa, T. and Konno, H.: Deformation behavior of tunnel under the excavation of new crossing tunnel, *6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.1591-1596, 1988.
- 9) Shinokawa, T. and Mitsui, Y.: Application of boundary element method to geotechnical analysis, *Computers & Structures*, Vol. 47, No. 2, pp. 179-187, 1993.
- 10) 箱石安彦, 安部吉生, 亀村勝美: 3次元逐次掘削プログラムによるトンネルの解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol. 1, pp. 177-182, 1991.
- 11) 横山功一, 竹林亜夫, 高森貞彦, 蓮井昭則: 都市域土砂NATMの建設技術に関する研究, 地下空間利用シンポジウム1993, pp. 199-208, 1993.
- 12) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: NATM施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察, 土木学会論文集, 第427号/VI-14, pp. 261-270, 1991.
- 13) 日本道路公団; 設計要領第三集 (トンネル), p. 79, 1985.
- 14) 土屋敬: トンネル設計のための支保と物性値に関する研究, 土木学会論文集, 第364号/III-4, pp. 31-40, 1985.
- 15) 門田俊一, 石井武美: 核を残して掘削するトンネル周辺地山の二次元・三次元解析, 第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 210-214, 1984.
- 16) 箱石安彦, 安部吉生, 亀村勝美: 3次元FEMによるトンネル切羽の3次元挙動と安定性の検討, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 136-140, 1992.

(1993.8.11 受付)

A STUDY OF TUNNEL BEHAVIOR DURING EXCAVATION BY MINI BENCH METHOD

Toshio SHINOKAWA and Yasushi MITSUI

The difference between the tunnel behavior during excavation by the mini bench method and the bench cut method is examined using the 3-dimensional finite element technique. In the excavation analysis, the sequence of construction which are excavation, support members and bench length are considered. It is recognized that the tunnel behavior by the mini bench method and the bench cut method are almost same, except leg settlement of upper half section, face squeezing and distribution of shotcrete stress.