

# 三次元数値解析によるトンネル掘削工法の評価

村田洋一 (環境共生工学専攻) 高橋浩 (住友建設(株)) 重田佳幸 (社会建設工学科)  
進士正人 (社会建設工学科) 中川浩二 (社会建設工学科)

## EVALUATION OF TUNNEL EXCAVATION METHODS BY MEANS OF THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS

Yoichi MURATA (Division of environmental system engineering)

Hiroshi TAKAHASHI (Sumitomo construction)

Yoshiyuki SHIGETA (Department of civil engineering)

Masato SHINJI (Department of civil engineering)

Koji NAKAGAWA (Department of civil engineering)

Generally, the bench cut excavation is adopted in squeezing rock. However, advancing drift is used as auxiliary method for the occurrence of large-scale earth pressure in Nikkureyama Tunnel II. This paper is tidying field measurement data of Nikkureyama tunnel II. It is examining the effect of bench cut and advancing drift by using 3D-FDM. Also, it is proposing optimum bench length and drift length from the above result.

*Key Words:* squeezing rock tunnel, bench cut excavation, advancing drift, support effect, field measurement,

### 1. はじめに

我が国の山岳トンネルの標準工法であるNATMは、ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工などを用い、地山の本来保有している支保機能を最大限に活用しながら掘削を進めるトンネル工法である。NATMでは、一般に加背を大きくした掘削工法が施工上有利といわれており、掘削工法のうち全断面工法あるいはベンチカット工法が採用されている。しかし、押し出し性地山(膨張性地山)などの特殊地山にNATMを適用するためには、地山条件に適した掘削工法などを選定することが重要となる。ここで、押し出し性地山とは、ある種の軟岩にトンネルを掘削した場合、掘削断面の内空側への著しい地山の押し出しと支保工、覆工への強大な土圧が作用する地山をいう。

押し出し性地山でトンネル掘削を行う場合の留意点として、一般には切羽や切羽前方の地山を緩ませないことが重要であるといわれている<sup>1)~11)</sup>。そのためには、剛な支保を採用するとともに、断面を早期に閉合することが望ましい。早期閉合を達成するためには、加背を大きくした全断面工法が理想的な掘削工法となるが、一度に解放する掘削相当外力も大きくなり、切羽の安定性が著しく低下することがあり、やむなく加背を小さくした掘削工法の採用や、ベンチカット工法に補助工法を採用するこ

ととなる。一般に用いられている切羽安定対策としての補助工法は、鏡ボルトやフォアパイリング、AGFなどが挙げられるが、補助工法の施工に時間を要するため、結果として早期閉合の達成を遅らせる要因となり、地山の緩みを助長する可能性がある。そこで、以上を解決する手段として、ベンチカット工法の補助工法として導坑先進工法を採用し、一度に解放する掘削相当外力を低減することで切羽の安定性を確保しつつ早期閉合を達成した例が報告されているものの、その支保効果のメカニズムについて議論されているものは少ない。

本論文の目的は、押し出し性地山で施工されたトンネルの事例を整理し、ベンチカット工法および導坑先進工法のそれぞれの支保効果を三次元数値解析により把握することにより、押し出し性地山における適切なベンチ長、導坑長に関する提案を行うことである。まず押し出し性地山のトンネルで導坑先進工法を採用した日暮山トンネル期線の計測データを用いて、切羽安定効果について整理を行った。次に、三次元数値解析によりベンチ長あるいは導坑長をパラメータとして解析を実施し、評価を行った。さらに、ベンチカット工法、導坑先進工法の相互作用について解析結果から最適なベンチ長、導坑長について提案を行った。

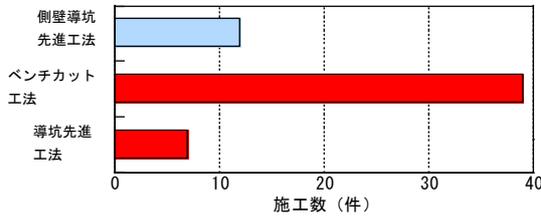


Fig.1 押し出し性地山の掘削工法

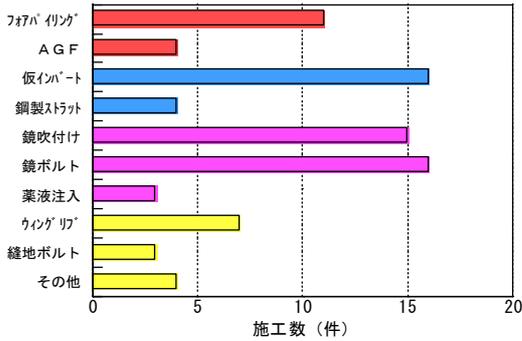


Fig.2 押し出し性区間の補助工法

掘削工法	加背割	主として地山条件からみた適用条件
補助ベンチ付き全断面工法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・全断面では施工が困難であるが比較的安定した地山</li> <li>・全断面施工中に施工が困難になった場合</li> <li>・良好な地山が多いが部分的に不良地山が挟まる場合</li> </ul>
ミニベンチカット工法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ショートベンチカット工法の場合よりさらに内空変位を抑制する必要がある場合</li> <li>・押し出し地山などで早期の閉合を必要とする場合</li> </ul>
ベンチカット工法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・土砂地山、押し出し性地山から中硬地山まで適用できる工法で最も基本的かつ一般的な施工法</li> </ul>
ロングベンチカット工法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・全断面では施工が困難であるが比較的安定した地山</li> </ul>
導坑先進工法		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質確認や水抜き効果を期待する場合</li> <li>・押し出し性地山などで切羽安定効果や変位や部材応力の軽減を期待する場合</li> </ul>

Table 1 各工法の特徴

## 2. 押し出し性地山におけるトンネル掘削工法の事例整理

### 2.1 押し出し性地山に用いられる掘削工法・補助工法の種類と特徴

文献調査を中心に、押し出し性地山に施工された49のトンネル施工事例を収集した。

掘削工法について整理した結果をFig.1に示す。49事例中、側壁導坑先進工法は12事例、ベンチカット工法は39事例、導坑先進工法は7事例であり、ベンチカット工法が最も多いことが分かる。ただし、側壁導坑先進工法は、NATMの前の矢板工法で主に用いられた工法で、近年では、土被りが小さい土砂地山で地表面沈下を抑制する必要のある場合や、地耐力が不足している坑口部に用いられており、押し出し性区間で採用された事例は少なくなる傾向がある。

そこで、本論文ではNATM工法で採用された事例の多いベンチカット工法、導坑先進工法に着目し整理を行った。以下に、ベンチカット工法、導坑先進工法について概要を述べる。Table 1にそれぞれの工法の特徴を示す。

#### (1) ベンチカット工法

一般に、上半、下半に2分割して掘進する工法であり、ベンチの長さによって、補助ベンチ（マイクロベンチ）、ミニベンチ、ショートベンチ、ロングベンチに分けられる<sup>12)</sup>。押し出し性地山では、これらのうちトンネル断面の早期閉合と切羽の自立を目的にショートベンチカット工法やミニベンチカット工法などのベンチ長を短くした掘

削工法を採用することが多い。

#### (2) 導坑先進工法

トンネルの本坑掘削に先立って、半径の小さな導坑を先進させて後、本坑を拡幅する工法であり、導坑の位置により頂設導坑、底設導坑などがある。

一般的に、導坑先進工法を採用する場合に期待する効果は、地質確認・水抜き効果などである。大変形が発生する地山では、それらに加えて拡幅掘削時の切羽安定効果や導坑掘削による初期応力の解放を促して拡幅掘削時の変位や部材応力を軽減する効果を期待して採用する機会が多い<sup>13)</sup>。

次に、押し出し性区間の補助工法に関して記載がある24トンネルの補助工法の採用頻度をFig.2に示す。図に示すとおり補助工法をその目的別に整理すると、天端部の崩落の防止（フォアパイル工、AGF）、内空変位の抑制（上半仮インバート、鋼製ストラット）、切羽の押し出しの抑制（鏡吹付け、鏡ボルト、薬液注入）が考えられる。特に、切羽面や切羽前方変形抑制のための補助工法が多く採用されている。このことから、押し出し性地山では切羽の自立性が問題となっていることがうかがえる。

### 2.2 事例からみる周辺地山の挙動の整理

ここでは、押し出し性地山において導坑先進工法を採用した日暮山トンネル 期線工事の現場計測データを用いて、断面の閉合と変位量との関係、導坑による変位、支保応力の抑制効果について整理を行う。

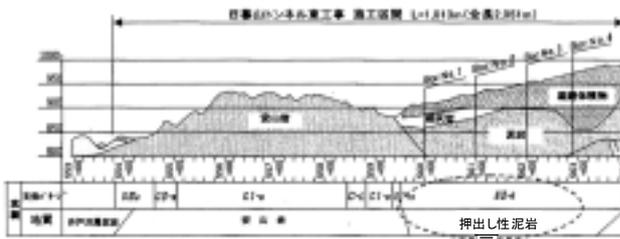


Fig. 3 日暮山トンネル 期線工事地質縦断面図

施工ケース	導坑長(m)	ベンチ長(m)	導坑吹付け厚(cm)
① 補助ベンチ付き 全断面掘削(導坑なし)	0	5~9	35
② 円形導坑 ロングスパン	40~60	5	35
③ 馬蹄形導坑 ロングスパン	28	3	35
④ 馬蹄形導坑 ショートスパン	7	3	35
⑤ 馬蹄形導坑 ショートスパン	7	3	25

Table 2 日暮山トンネル施工ケース

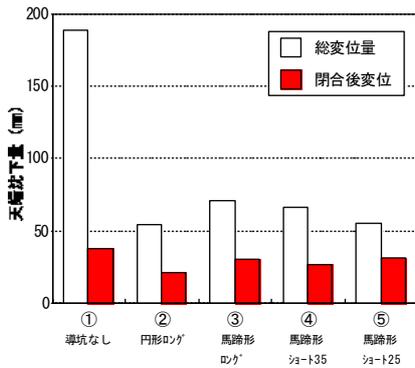


Fig. 4 天端沈下の総変位置と閉合後の変位置

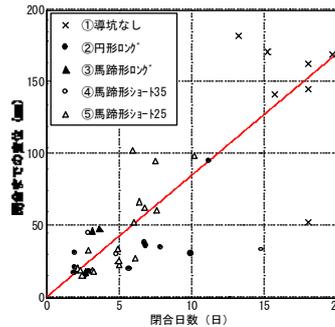


Fig. 5 天端沈下の閉合日数と閉合までの変位置

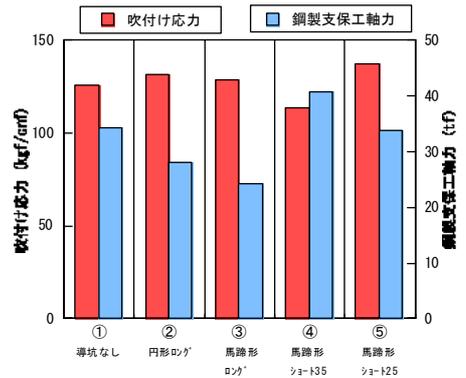


Fig. 6 吹付け応力, 支保工軸力

(1) 日暮山トンネル 期線工事の概要

日暮山トンネル 期線工事は、上信越自動車道の4車線化工事の一部で、長野と群馬の県境付近に位置する全長2,051mの高速道路トンネルである。Fig.3に示すように、地形は標高1,000mを超える起伏の激しい山地となっている。トンネル周辺の地質は、新第三紀中新世の泥岩、砂岩を主体とし、中新世末期から鮮新世にかけての火山活動による安山岩の貫入岩類などで構成されている。

現在供用中の日暮山トンネル 期線工事では、脆弱な泥岩区間において内空変位および天端沈下の最大変位置が3mに達し、トンネル掘削に非常に困難をきわめたことが報告されている。

日暮山トンネル 期線工事では、期線工事における経験を生かして押し出し性泥岩区間において早期閉合による変位抑制を期待して導坑先進工法を採用している (Fig.3参照)。その実施にあたっては最適な施工法を探るため、導坑の有無、導坑形状、拡幅切羽からの導坑先進距離および導坑吹付けコンクリート厚さなど変更した5通りの導坑設置ケースを設定して試験掘削を行った。施工ケースはTable 2に示す5通りである。

(2) 現場計測データの分析結果

Fig.4に天端沈下量の総変位置と断面閉合後の変位置を示す。ここで総変位置とは計測開始時から変位収束までの変位を示し、断面閉合後の変位置とは断面閉合後の増分変位を示す。総変位置は導坑なしが188mm、導坑設置

ケースでは約55~70mmと明らかに導坑なしケースが大きい。しかし、断面閉合後の変位を比較すると、導坑なしケースが38mm、導坑設置ケースが約20~30mmと各ケースともあまり変わらない。また、導坑設置ケースは、導坑形状、導坑先進距離、導坑吹付けコンクリート厚さを変更しても顕著な差異は見出せなかった。

導坑なしケースと導坑設置ケースで、天端沈下量の総変位置が明らかに違う理由として断面の閉合日数にその原因があると思われる。Fig.5に天端沈下の閉合日数と閉合までの変位置を示す。この図より、閉合日数と閉合までの変位置はほぼ線形の関係があることがわかる。また、導坑なしケースが導坑設置ケースに比べて閉合日数が遅いことがわかる。したがって、導坑なしケースと導坑設置ケースの総変位置の差は閉合日数(時間)の違いにより生じたものと推定される。それぞれのケースにおける閉合後の変位があまり変わらないことを考えると、早期の断面閉合が変位置の抑制に非常に効果があるといえる。

導坑なしケースの閉合が遅れた理由として、核残し、鏡吹付け、鏡ボルト、AGFなど切羽安定のための補助工法に要する時間が長くなり、結果として断面閉合が遅れてしまうこと、切羽の安定性を向上させる目的でベンチ長を長くする必要があったこと、その一方、導坑設置ケースは切羽安定対策工が鏡吹付けのみ可能であったことによるものである<sup>13)</sup>。

Fig.6に本坑吹付け応力と本坑支保工軸力を示す。本坑吹付け応力は切羽距離3D (Dはトンネル掘削外径) 時点における断面毎の平均値を示している。本坑支保工軸

	トンネル断面	ベンチ長0m	ベンチ長5m	ベンチ長10m	ベンチ長30m
導坑なし					
導坑長5m					
導坑長10m					
導坑長60m					

Fig.7 解析ケース

	要素	弾性係数E (kgf/cm <sup>2</sup> )	単位体積重量γ (kg/m <sup>3</sup> )	ポアソン比ν	粘着力C (kgf/cm <sup>2</sup> )	内部摩擦角φ(°)	備考
地山	solid	1500	2100	0.35	2	30	-
吹付けコンクリート	solid	40000	2400	0.20	-	-	-
鋼製支保工	beam	2100000	7848	0.30	-	-	H-150(導坑) H-250(本坑)

Table 3 解析物性値

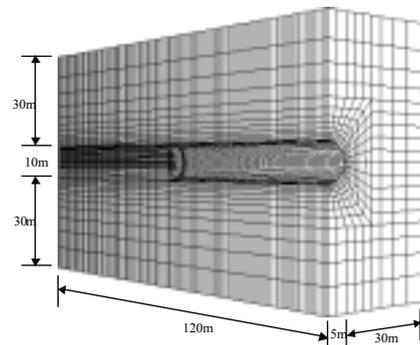


Fig.8 解析領域

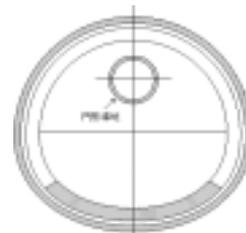


Fig.9 日暮山トンネル断面図

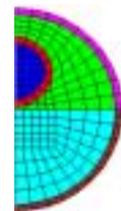


Fig.10 解析トンネル断面図

力は本坑切羽1m進行時点での断面毎の平均値を示している。どの施工ケースもほぼ同程度で、導坑の有無、先進距離、導坑の形状などの違いによる明確な差異は見出せない。

以上の施工データの分析より得られた知見を以下に示す。

早期の断面閉合が変位量の抑制に非常に効果があり、変位量は閉合日数(時間)に依存するといえる。

導坑を施工する効果としては、切羽安定効果が大きい。なお、切羽の自立性が悪いと閉合が遅れ、結果として変位量が増大する。

拡幅掘削時の部材発生力を軽減する効果は確認できなかった。

### 3. 三次元掘削解析

日暮山トンネルでは、導坑先進工法と補助ベンチを併用し、押し出し性地山における最適な施工法を目指して実験的な施工が行われた。その結果、早期閉合の重要性和導坑の切羽安定効果について確認できた。

本論文では、Fig.7に示す導坑長・ベンチ長を変えた三次元の掘削解析を行うことにより、押し出し性地山で採用されている掘削工法の違いによる周辺地山の挙動を定量的に把握し最適な掘削工法の提案を試みる。

#### 3.1 三次元掘削解析モデル

解析のモデル化では、日暮山トンネル 期線工事を参考にして土被りは100mとし、土被り100mに相当する内部

応力を与え、側圧係数を1とし地山モデルとした。Fig.8にそのモデル図を示す。トンネル断面は、拡幅断面は円形断面でD=10m、導坑は円形でD=3mとした。日暮山のトンネル断面図をFig.9に、解析に用いたトンネル断面図をFig.10に示す。

地山物性値は、日暮山トンネルの地山物性値にほぼ相当し、日本道路公団が示す一般的に地質の悪いD 地山の物性値を用いた。なお、地山はMohr-Coulombの破壊基準に従う弾塑性体と仮定した。Table 3に解析物性値を示す。

#### 3.2 ベンチカット工法の効果

本節では、断面の早期閉合に着目し、ベンチ長を変える(断面閉合のタイミングを変える)ことによって天端沈下量、内空変位量、切羽押し出し量、吹付け応力、支保工軸力がどのように影響してくるかについて検討する。

解析ケースは、全断面(ベンチ長0m)とベンチ長5m、10m、30mの計4ケースとした。また、解析ステップは、上半掘削・下半掘削を交互繰り返す、計測断面から下半切羽が30m進むまで掘削を行う。解析結果を以下に示す。

##### (1)天端沈下量、内空変位量

Fig.11に天端沈下量と内空変位量の総変位量と切羽通過後の変位量を示す。図の左側为天端沈下量で右側が内空変位量である。総変位量は、掘削によって生じた全変位であり、切羽通過後の変位は計測断面に上半切羽が到達したときから計測断面から下半切羽が3D進んだときに生じた変位量である。

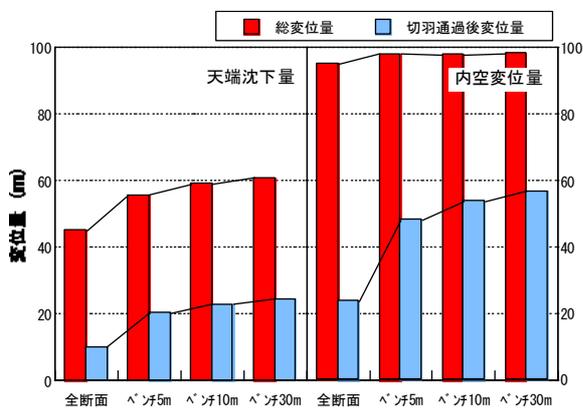


Fig.11 天端・内空の総変位量と切羽通過後変位量

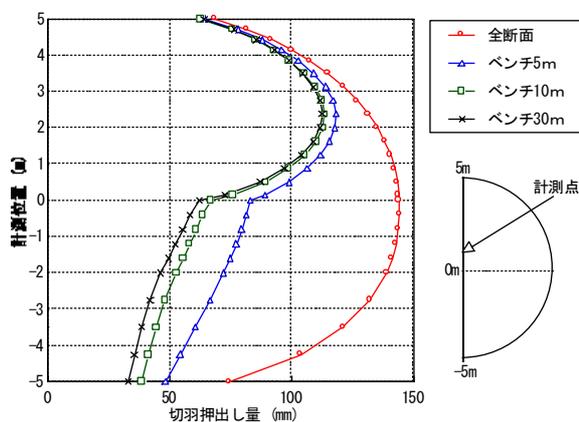


Fig.13 切羽押し出し量

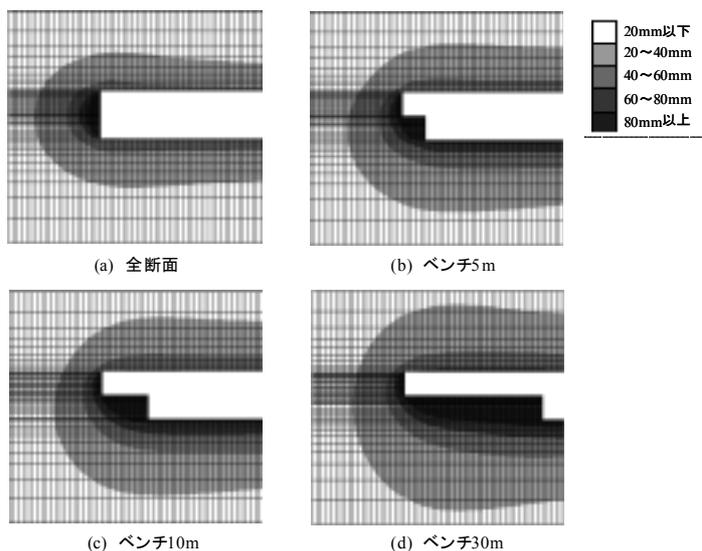


Fig.12 地中変位等分布図

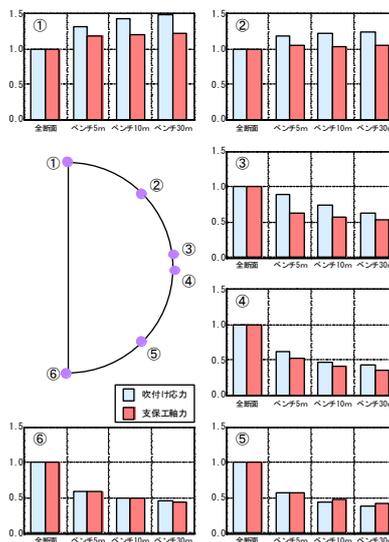


Fig.14 部材力

切羽通過後の変位量ではベンチが長いほど変位が増大する。天端沈下量は全断面で約10mm、ベンチ設置ケースで約20～24mmと二倍以上も増加している。また、内空変位量についても同じような傾向にあることがわかる。したがって、天端沈下量、内空変位量を抑えるためには、早期の断面閉合が望ましいことがわかる。

(2)地中変位

切羽周辺地山の地中変位等分布をFig.12に示す。このコンター図はトンネル中心線を縦断方向にみたもので、全方向変位の絶対量である。ベンチが長いほど、周辺地山の変位が大きくなる。先程と同様にこの図からも早期の断面閉合が重要であることがいえる。

(3)切羽押し出し量

Fig.13に鉛直方向の切羽押し出し量を示す。図からわかるように、全断面ではトンネル中心が最大になっているのに対し、ベンチ設置ケースは上半に切羽の押し出しが集中している。最大変位は、全断面で最大変位144mm、ベ

ンチ5mでは118mm、ベンチ10mでは114mm、ベンチ30mでは113mmであり、全断面の最大変位を1として比較すると、ベンチ5mでは0.82、ベンチ10mでは0.79、ベンチ30mでは0.78と約2割程度の切羽押し出し量が抑制された。また、ベンチ長の違いによる切羽押し出し量に大きな差は認められないため、ベンチをあまり長くしても効果は変わらないことがわかる。

(4)部材力

Fig.14に本坑拡幅時の吹付けコンクリート応力と、鋼製支保工軸力を示す。この図は全断面掘削時の部材力として比較している。

天端部( ),右肩部( )においてベンチが長くなるほど部材力は大きくなる傾向にあり、Fig.11に示す天端沈下量の傾向と一致してことを考えると、変位の発生に伴って応力が増加したものと考えられる。

これに対して、他の計測点( ~ )では、ベンチが長くなるほど部材力は小さくなる傾向にある。この理由として、下半部分は上半の切羽進行に伴う影響を直接に

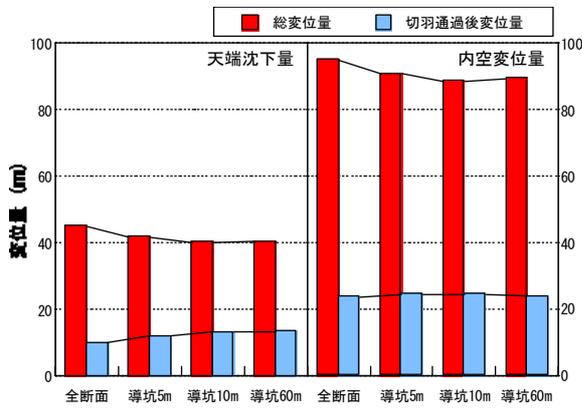


Fig. 15 天端・内空の総変位量と切羽通過後変位量

は受けないため、ベンチが長くなるにつれ影響度合いが小さくと考えられる。

(5)結果のまとめ

以上の解析結果をとりまとめると、

ベンチが長くなると変位量が増大し、地中変位の領域領域が大きくなる。このことより、早期閉合は変位抑止と変位発生領域を小さくする効果がある。

ベンチを設置することにより、切羽押し出量を抑えられる。ベンチが長くなるほど切羽安定効果は大きくなるが、ある程度の長さ以上はあまり効果に差が生じない。また、上半切羽面に何らかの対策工を設ける必要がある。

3.3 導坑先進工法の効果

本節では、導坑長の違いが、天端沈下量・内空変位量、切羽押し出量、吹付け応力、支保工軸力に与える影響について検討する。

解析ケースは、全断面（導坑なし）、導坑先進距離5m、導坑先進距離10m、導坑先進距離60mの計4ケースである。また、解析ステップは、導坑先進距離5m・10mは導坑掘削・本坑掘削を交互に繰り返しながら、計測断面から本坑切羽が30m進むまで掘削を行うケースである。導坑先進距離60mは導坑を60m掘削した後に本坑を拡幅していくケースである。解析結果を以下に示す。

(1)天端沈下量，内空変位量

Fig. 15に導坑長の違いによる天端沈下量と内空変位量の総変位量と切羽通過後の変位量を示す。総変位量は天端沈下量、内空変位量とも全断面に比べ、導坑設置ケースの方が小さくなっているがわかる。全断面を1として比較すると、導坑設置ケースは天端沈下量では0.89～0.93、内空変位量では0.93～0.96と1割程度ではあるが減少している。また、導坑が長くなるにつれ総変位量が

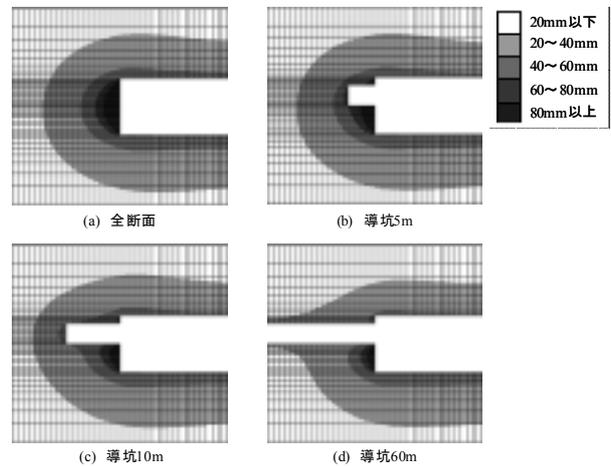


Fig. 16 地中変位等分布図

減少する傾向にある。したがって、導坑は全断面に比べて変位を抑止する効果があるといえる。

切羽通過後の変位量を見ると、天端沈下量では、導坑設置ケースの方が大きくなる結果となった。内空変位量は各ケースともほとんど変わらない。しかし、その差はわずかであり導坑の有無による差異はほとんどないといえる。

(2)地中変位

切羽周辺地山の地中変位等分布をFig. 16に示す。導坑が長くなるにつれ、本坑の切羽周辺に集中していた変位が本坑と導坑に分散していることがわかる。また、変位が80mm以上発生している分布領域の割合が少なくなる。したがって、導坑は地山に発生させる変位を抑制する効果があるといえる。なお、導坑が短いと切羽に向かって変位していくので、解析では、ある程度の導坑の長さが必要であると考えられる。

(3)切羽押し出量

Fig. 17に鉛直方向の切羽押し出量を示す。図からわかるように、全断面と比較して、導坑設置ケースは切羽押し出量が抑制されている。

最大変位は、導坑なしで最大変位144mm、導坑5mでは125mm、導坑10mでは117mm、導坑60mでは108mmであり、導坑なしの最大変位を1として比較すると、導坑5mでは0.87、導坑10mでは0.81、導坑60mでは0.75であり、導坑が長い方が切羽押し出量を抑制できていることがわかる。

(4)部材力

Fig. 18に本坑拡幅時の吹付けコンクリート応力と、鋼製支保工軸力を示す。この図は全断面の部材力を1として比較している。部材力はどの計測点においても導坑設置ケースの方が若干大きくなっていることがわかる。特

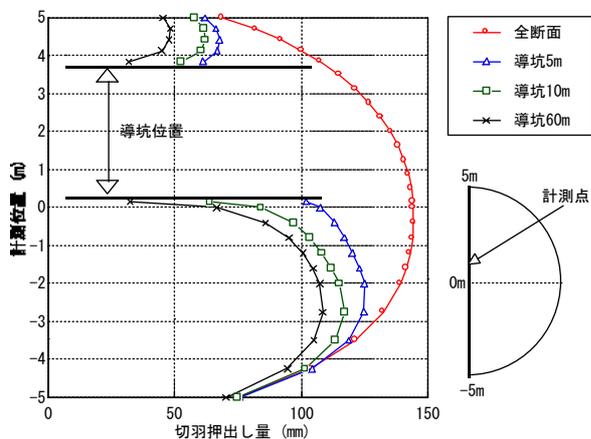


Fig. 17 切羽押し出し量

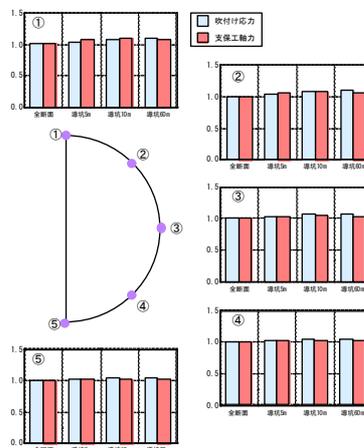
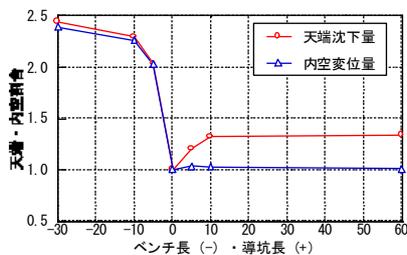
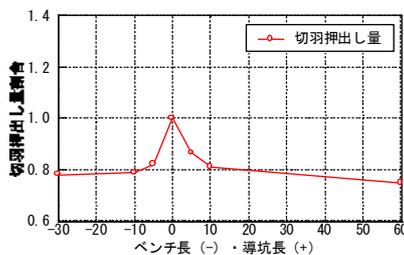


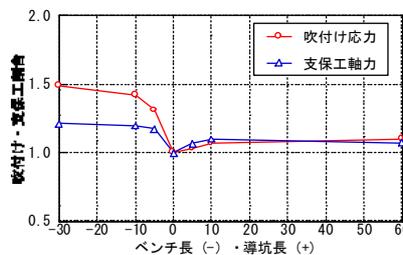
Fig. 18 部材力



(a) 導坑長・ベンチ長と天端沈下量・内空変位量の関係



(b) 導坑長・ベンチ長と切羽押し出し量の関係



(c) 導坑長・ベンチ長と吹付け応力・支保工軸力の関係

Fig. 19 導坑長・ベンチ長と天端・内空・切羽・吹付け応力・支保工軸力の関係

に天端部，右肩部で全断面に比べて大きくなっている。

(5)結果のまとめ

以上の解析結果をとりまとめると，

全断面と導坑設置ケースを比較して，天端沈下量・内空変位量，吹付け応力・支保工軸力には顕著な差は見られない．これは現場計測データと同様の結果を示している．

導坑の効果は切羽の安定性が主であり，切羽安定対策工として，導坑はきわめて効果があるといえる．

3.4 導坑とベンチの相互効果と最適な掘削工法の提案

Fig. 19に3.2節，3.3節の解析結果を整理し，導坑長・ベンチ長と天端沈下量，内空変位量，切羽押し出し量，吹付け応力，支保工軸力との関係を比率で示す．

比較方法は，天端沈下量・内空変位量は切羽通過後の変位量，切羽押し出し量は最大値を，吹付け応力・支保工軸力は天端部の最終的な値をそれぞれ比較している．また，これらの図は全断面（導坑長0m，ベンチ長0m）の値を1とし，横軸は，導坑長を（正の方向），ベンチ長を（負の方向）として整理，比較している．

Fig. 19の(a)～(c)より，以下のことがわかる．

(a)より，天端・内空変位を抑制するためには全断面がもっともすぐれている．また，ベンチが長くなるほど変位量は大きくなる．

(b)より，全断面が最も切羽の押し出し量が大きくなることがわかる．また，導坑長・ベンチ長とも10m以上になると切羽押し出し量はあまり変わらないことがわかる．

(c)より，吹付け応力・支保工軸力とも天端沈下量と同じような挙動を示し，全断面が最も良いことがわかる．

以上の結果から，導坑とベンチの単独の効果を示すことができた．しかし，一般的に導坑先進工法を採用した場合，導坑単独ではなく，導坑とベンチを併用して施工されている．日暮山トンネルにおいても，ベンチを3～5m程度設置して施工されている(Table 2参照)．したがって，導坑とベンチを両方設置して掘削した場合はどのような相互効果が得られるか，Fig. 7に示す16ケースの解析を行い整理した．

Fig. 20に天端沈下量と切羽押し出し量，天端部の吹付け応力を比較した結果を示す．全断面（導坑0m，ベンチ0m）の値を1として比較した．

天端沈下量は，導坑，ベンチが長くなるにつれ大きくなり，導坑60m・ベンチ30mでは全断面と比較して約3倍にも増加する．

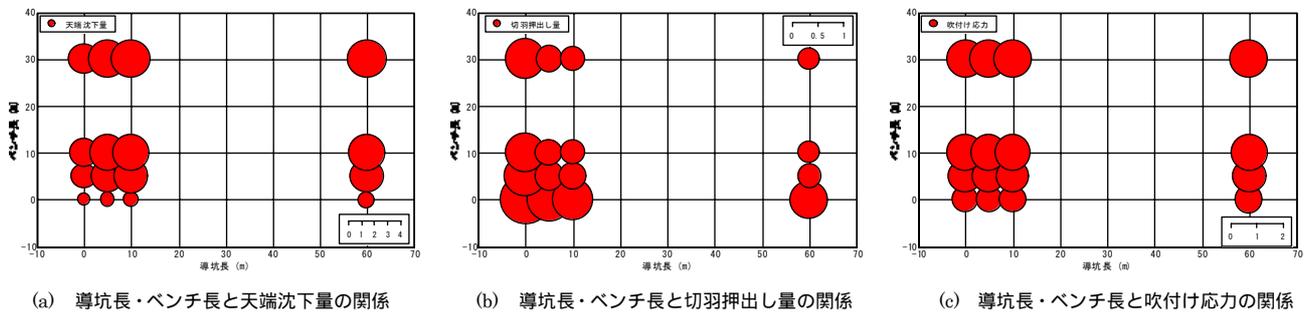


Fig.20 導坑長・ベンチ長と天端・切羽・吹付け応力の関係

一方、切羽押し出し量は、導坑、ベンチが長くなるにつれ小さくなり、導坑60m・ベンチ30mでは全断面と比較して約半分となる。導坑のみ、ベンチのみでは切羽押し出し量抑制効果は少ないが、導坑とベンチを併用することにより相乗効果が得られると考えられる。

天端部の吹付け応力は、ベンチが長くなるにつれ大きくなり、導坑60m・ベンチ30mでは全断面と比較して約1.5倍となる。

したがって、三次元数値解析結果より、天端沈下量と切羽押し出し量を最適にするには、ベンチを設置しないで、導坑を10m程度確保して、掘削することが良いと考えられる。しかし、切羽押し出し量に着目すると、導坑のみに比べ、導坑とベンチを併用することにより相乗効果が得られ切羽押し出し量が格段に減少する。

現場では、導坑長が10m以上であると、導坑掘削専用機械を設置しなくてはならぬ施工性が悪くなることを考慮すると、導坑は最大10m程度で、ベンチは可能な限り短くしたほうが良いと思われる。

#### 4. おわりに

押し出し性地山トンネルの事例を整理し、三次元数値解析結果から得られた知見を以下に示す。

##### (1) 押し出し性地山トンネルの事例整理

導坑の効果は切羽の安定効果が主である。

早期の断面閉合が変位抑制に最も効果的であり、早期閉合を行うためには、切羽の自立が最も重要である。

##### (2) 三次元数値解析結果

ベンチを長くすると変位量が増大する。したがって、できるだけベンチを長くして早期閉合を行う必要がある。

導坑の効果は切羽安定効果が主で、天端や内空、部材力の軽減効果はない。

ベンチのみ、導坑のみでは切羽の安定効果は弱く、両者を併用することによって、相乗効果が生まれる。

最適なベンチ長・導坑長については、導坑は10m程度で、ベンチは可能な限り短くすることが望ましい。

#### 参考文献

- 1) 杉山保利・山橋正文・岡田正男・坂田和幸：子不知衝上断層を克服、北陸自動車道子不知トンネル、トンネルと地下、第19巻3号、pp.7～14、1988.3.
- 2) 稲葉英恵・西谷直人・手塚洋・新田訓弘：神居古潭蛇紋岩地帯にトンネルを掘る(その2)、道央自動車道嵐山トンネル、トンネルと地下、第20巻5号、pp.15～23、1989.5.
- 3) 木村隆雄・森芳博・朝倉清：神居古潭変成帯をNATMで貫く、道央自動車道常磐トンネル、トンネルと地下、第20巻6号、pp.39～45、1989.6.
- 4) 二唐時雄・佐藤秀行・芹沢尚一・高須賀俊行：流紋岩質凝灰岩熱水変質部の膨張性地山を掘る、山形自動車道盃山トンネル、トンネルと地下、第22巻2号、pp.25～31、1991.2.
- 5) 中山隆・大利泰宏・古田広幸：膨張性地山と可燃性ガスを克服、国道113号新宇津トンネル、トンネルと地下、第22巻10号、pp.25～31、1991.10.
- 6) 角田至啓・鈴木金吾・佐藤重知：新第三紀凝灰岩の膨張性地山を掘る、東北新幹線岩手トンネル(中里)、トンネルと地下、第22巻11号、pp.7～17、1991.11.
- 7) 佐藤重知・池田豊・高橋信夫・一條勝：新第三紀凝灰岩の膨張性地山を掘る(2)、東北新幹線岩手トンネル一戸工区、トンネルと地下、第25巻5号、pp.15～20、1994.5.
- 8) 熊耳哲雄・保坂邦彦：膨張と湧水に挑む、北陸新幹線一ノ瀬トンネル、トンネルと地下、第26巻3号、pp.7～14、1995.3.
- 9) 小林和正・緒方健治・安藤正司・野村雅明：脆弱な凝灰角礫岩・泥岩地山を克服、上信越自動車道堀越第二トンネル、トンネルと地下、第28巻2号、pp.15～24、1997.12.
- 10) 豊原正俊・早坂治敏・江戸川修一：鋼製支保工の高耐力化と早期閉合で膨圧を克服、北陸新幹線朝日トンネル東工区、トンネルと地下、第29巻12号、pp.7～17、1998.12.
- 11) 北川修三・梶原雄三・鈴木恒夫・川原一則：二重支保工法で膨張性地山を克服、北陸新幹線飯山トンネル富倉工区、トンネルと地下、第31巻11号、pp.7～16、2000.11.
- 12) トンネル標準示方書 [ 山岳工法編 ]・同解説平成8年版、土木学会
- 13) 高橋浩・桑原秀樹・谷井俊春・石松辰博・進士正人・中川浩二：スキージング地山における補助工法としての導坑の支保効果に関する研究、土木学会論文集投稿準備中

(平成13年12月27日受理)