

押出し性地山におけるショートスパン導坑先進工法の 適用性に関する解析的評価

AN ESTIMATION ON THE EFFECTIVENESS OF GROUND SUPPORT ON SHORTSPAN ADVANCING DRIFT AS AN AUXILIARY CONSTRUCTION METHOD IN SQUEEZING ROCK

高橋浩¹⁾・森本真吾²⁾・重田佳幸³⁾・進士正人⁴⁾・中川浩二⁵⁾

Hiroshi TAKAHASHI, Shingo MORIMOTO, Yoshiyuki SHIGETA, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

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 studies field measurement data of Nikkureyama tunnel II. It examines the effect of bench cut and advancing drift by using 3D-FDM. Also, it proposes optimum drift length and bench length from the above result.

Key Words : squeezing rock, advancing drift, drift length, bench length

1. はじめに

大変形の発生が懸念される押出し性地山に先進導坑を採用する場合、導坑の支保効果として拡幅掘削時の切羽安定効果やいわゆるいなし効果などが期待されることが多い。筆者ら¹⁾は高速道路トンネルの建設において、導坑を切羽安定のための補助工法の一つとして取り扱い、導坑の有無、拡幅切羽からの先進距離、導坑形状や支保剛性などを変更した5通りの施工ケースを試行して、この施工を実物大の実験的研究と位置付けて、計測データなどを比較・検討した。その結果、既往の研究では必ずしも明確にされていない導坑の支保効果として、拡幅掘削時の切羽安定効果、変位抑制効果を確認した。さらに、研究成果を踏まえ、押出し性地山における合理的な施工方法のひとつとして、導坑の先進距離を下半盤から本坑用施工機械で掘削できる7m程度としたショートスパン導坑先進工法を提案し、この工法を採用することで導坑掘削専用施工機械を導入することなく導坑の支保効果が得られ、切羽距離約0.5Dでの早期閉合が達成できた。

本研究は、押出し性地山におけるショートスパン導坑先進工法をより一般化させるために、三次元数値解析によるパラメータ解析²⁾を行い、同工法の適用性を評価したものである。

1) 正会員 三井住友建設(株)土木事業本部土木技術部

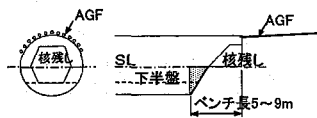
2) 学生会員 山口大学大学院理工学研究科

3) 正会員 元山口大学工学部社会建設工学科助手、現(株)ダイヤコンサルタントジオエンジニアリング事業部

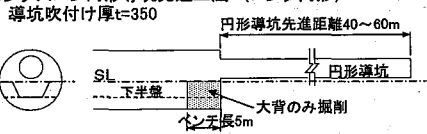
4) 正会員 学術博士 山口大学工学部社会建設工学科

5) フェロー 工学博士 山口大学臨床トンネル工学研究所

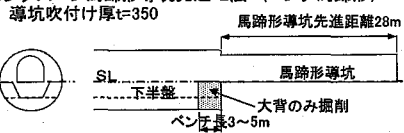
①補助ベンチ付き全断面工法（導坑なし）



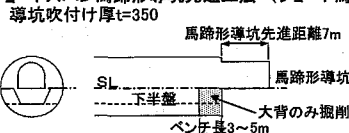
②ロングスパン円形導坑先進工法（ロング円形）



③ロングスパン馬蹄形導坑先進工法（ロング馬蹄形）



④ショートスパン馬蹄形導坑先進工法（ショート馬蹄形35）



⑤ショートスパン馬蹄形導坑先進工法（ショート馬蹄形25）

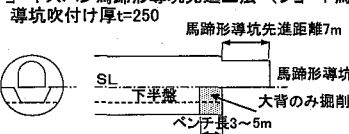


図-1 導坑の施工ケースとその名称¹⁾

2. 実験的研究によるショートスパン導坑先進工法の適用性

上信越自動車道^{につくれやま}日暮山トンネルⅡ期線において採用した5通りの導坑施工ケースを図-1に示す。図-2は拡幅掘削時の天端沈下および内空変位の収束値（平均値）を①導坑なしのケースに対する比率で示している。図-2によると、①導坑なしに比べて、②ロング円形から⑤ショート馬蹄形25の天端沈下および内空変位は小さく、導坑による変位抑制効果が明かである。また、導坑形状と吹付けコンクリート厚さが同じ条件の③ロング馬蹄形と④ショート馬蹄形35を比較すると、ほぼ同程度の変位であることから、導坑先進距離を下半盤から施工できる7m程度とすることで、ロングスパン導坑と同等の支保効果が得られると考えられる。

図-3は断面閉合達成日数とベンチ長（上半切羽と下半・インバートの離れ）の関係を示しており、図中の大マークは平均値を表している。図によると、ベンチ長が5m程度（約0.5D）で早期閉合が達成されていることがわかる。このことは、導坑により拡幅

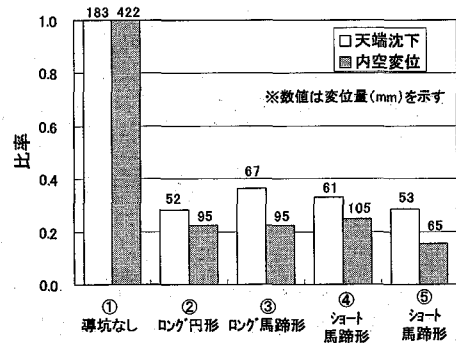


図-2 拡幅時の収束値（平均値）¹⁾

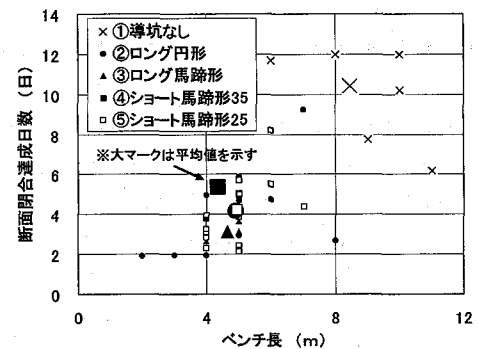
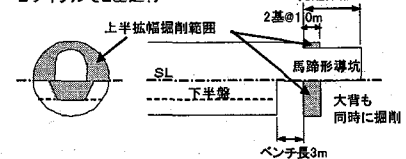


図-3 断面閉合達成日数とベンチ長¹⁾

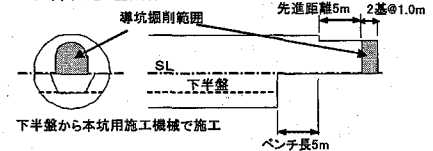
①上半拡幅掘削

2サイクルで2基進行



②導坑掘削

2サイクルで2基進行



③下半・インバート

1サイクルで2基進行

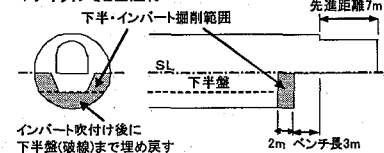


図-4 ショートスパン導坑先進工法

要領図

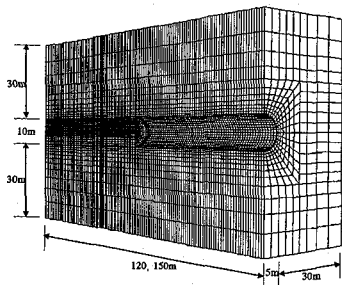


図-5 解析領域



図-6 解析トンネル断面図

表-1 解析に用いた物性値

	要素	弾性係数E (N/mm ²)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比ν	粘着力 C(N/mm ²)	内部摩擦 角φ(°)	備考
弾塑性体地山	solid	150	21	0.35	0.2	30	-
吹付けコンクリート	solid	4000	24	0.20	-	-	-
鋼製支保工	beam	210000	78	0.3 ⁴⁾	-	-	H-150(導坑) H-250(本坑)

	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					

図-7 解析ケース

時の切羽が安定するため、施工がスムーズになったことを意味している。

以上のように、日暮山トンネルにおける実験的研究によって、ショートスパン導坑先進工法の適用性が確認された。なお、ショートスパン導坑先進工法とは、日暮山トンネルⅡ期線ではじめて採用した施工方法で、図-4に示すように上半、導坑、下半・インパートの順に掘進を繰り返し、導坑は下半盤から本坑用施工機械で掘削するために導坑掘削専用施工機械を必要としない工法である。

3. 三次元数値解析による評価

3-1 三次元数値解析モデル

ショートスパン導坑先進工法を特殊な施工事例とするのではなく一般化させるために、パラメータ解析を実施し、導坑長とベンチ長の最適な組み合わせを検討した。解析コードは大変形および非線形モデルが容易に扱える有限差分法 (FLAC-3D) を用い、地山は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾塑性体を仮定した。解析のモデル化では、日暮山トンネルを参考に土被りは 100m とし、土被りに相当する内部応力を与え、側圧係数を 1.0 とした地山モデルを設定した。トンネルの拡幅断面は円形断面で直径 $D=10\text{m}$ 、導坑も同じく円形で $D=3\text{m}$ とした。地山物性値は、日本道路公団が示している DⅡ相当の地山の物性値³⁾を用いることで、一般的な押し出し性地山を対象とすることが可能と考えた。解析ケースは導坑先進距離とベンチ長を変化させた 16 ケースとし、解析結果を相対評価した。なお、解析によって傾向を知ることが目的としたため、変位量や応力値の絶対値は、必ずしも日暮山トンネルで得られた計測値と合致しなくても良いとした。図-5に解析領域、図-6に解析に用いたトンネル断面図、表-1に解析に用いた物性値、図-7に解析ケースを示す。

3-2 導坑の支保効果

本節では、導坑先進距離の違いが天端沈下と内空変位、地中変位、切羽押し出し量および吹付けコンクリート応力・鋼製支保工軸力に与える影響について検討し、導坑の支保効果を評価する。解析ケースは、全断面

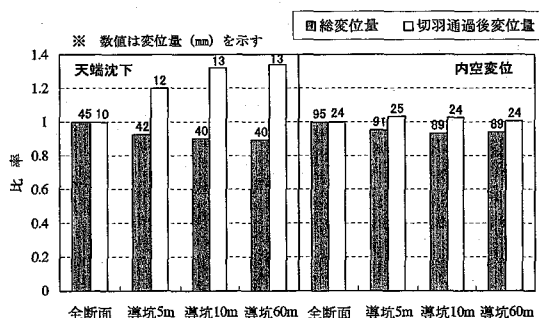


図-8 導坑先進距離と天端沈下と内空変位

(導坑なし), 導坑先進距離 5m, 10m, 60m の計 4 ケースとした。また, 解析ステップは, 導坑先進距離 5m, 10m のケースでは導坑掘削とインバートをを含む本坑全断面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こととした。導坑先進距離 60m のケースでは, 導坑を 60m 掘削した後に本坑を拡幅することとした。

(1) 天端沈下と内空変位

図-8 に導坑先進距離の違いによる天端沈下と内空変位の総変位量と切羽通過後の変位量を示す。図の左側は天端沈下, 右側は内空変位で, 全断面の場合の変位量を 1.0 とした比率で示している。総変位量とは導坑掘削前から拡幅掘削完了までに発生した全変位量で, 全断面の場合と比較すると, 導坑設置ケースは天端沈下では 0.89 ~ 0.93, 内空変位では 0.93 ~ 0.96 となっている。また, 導坑が長くなるにつれ総変位量が減少する傾向にある。切羽通過後変位量とは計測断面に上半切羽が到達した時点から下半切羽が 3D 進んだ時点までに生じた変位量で, 天端沈下では導坑設置ケースの方が大きくなる結果となり, 内空変位は各ケースともほとんど変わらない結果となった。しかし, 変位量の絶対値の差はわずかであることから, 導坑の有無による差異はほとんどないと考えられる。

(2) 地中変位

切羽周辺地山の地中変位分布図を図-9 に示す。この分布図はトンネル中心線を縦断方向にみた変位量の大きさを表すもので, 全方向変位の絶対量である。図によると, 導坑が長くなるに従って, 本坑の切羽周辺に発生していた大きな変位 (濃い色の領域) 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も小さくなる。このことから, 導坑を施工することで地山に発生する変位を抑制する効果があるといえる。なお, 導坑先進距離が短いと切羽に向かって変位量 (切羽押出し量) が大きくなるので, 解析上はある程度の導坑先進距離が必要であると考えられる。図-10 は, 参考として導坑先進距離と塑性領域の関係を示したものであるが, 支保工により塑性域の発生が抑制された結果となっている。

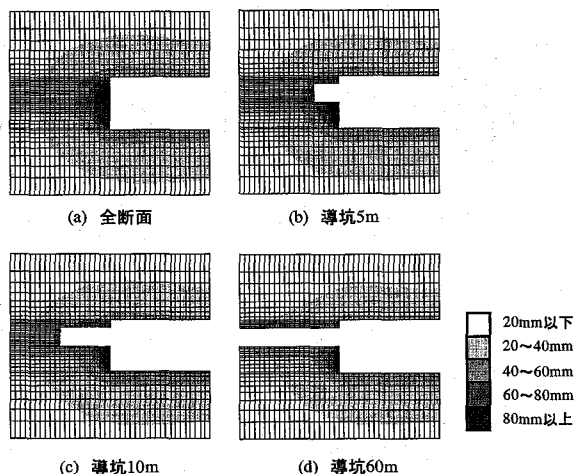


図-9 導坑先進距離と地中変位

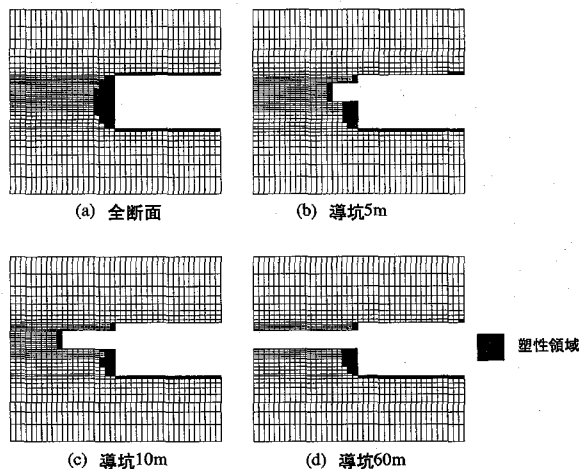


図-10 導坑先進距離と塑性領域

(3) 切羽押し出し量

図-11 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、全断面に比べて導坑を設置したケースでは切羽押し出し量が明らかに抑制されている。導坑なしの最大変位は144mmとなっており、これを1.0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、導坑先進距離が長いほど切羽押し出し量が抑制されていることがわかる。

(4) 吹付けコンクリート応力と鋼製支保工軸力

図-12 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（以下、部材力という）の解析結果を示す。この図は全断面の場合の部材力を1.0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を設置したケースの方が若干大きくなっているがその差は3~8%である。図-13 は実施工において得られた軸力の平均値で、①導坑なしを1.0とした場合の比率を示している。この図から、実施工では導坑の有無による拡幅支保部材に発生する軸力に大きな差はなく、ほぼ同程度と評価できる。以上のように、解析結果と計測結果の傾向はほぼ一致し、導坑を設置することによる部材発生応力の軽減効果はほとんどないと考えられる。

3-3 ベンチの効果

本節では、断面閉合の時期、すなわちベンチ長（上半切羽と下半・インパートの距離）を変えることによる天端沈下と内空変位、地中変位、切羽押し出し量および部材力への影響度合いについて検討する。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、上半掘削と下半・インパート掘削（下半掘削とインパートを同時に掘削・支保する）を交互に繰り返し、計測断面から下半切羽が30m進むまで掘削を行うこととした。

(1) 天端沈下と内空変位

図-14 に解析によって得られた天端沈下と内空変位を示す。図によると、切羽通過後の変位量ではベンチが長いほど変位が大きくなっている。天端沈下は全断面の場合に約10mmで、これを1.0とするとベンチを設置したケースで2.0~2.4となる。内空変

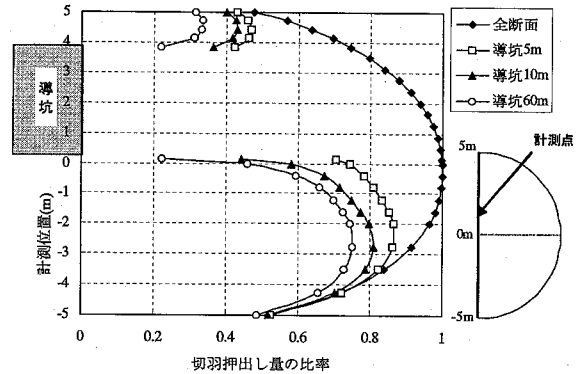


図-11 導坑先進距離と切羽押し出し量

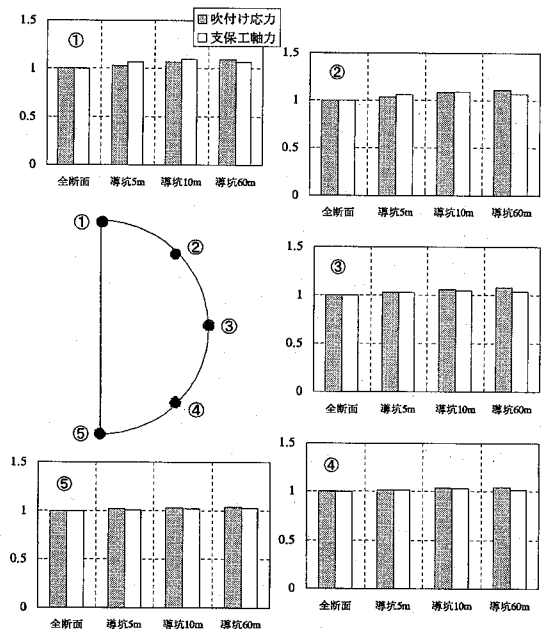


図-12 導坑先進距離と拡幅時の部材力（解析結果）

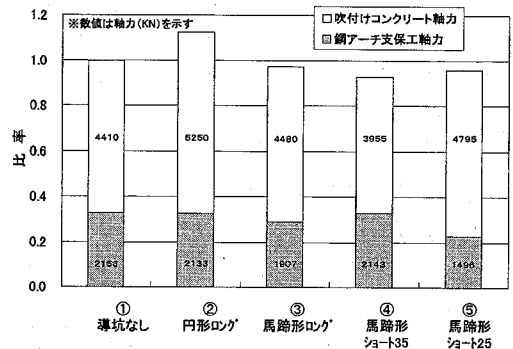


図-13 拡幅時の部材力（実施工）¹⁾

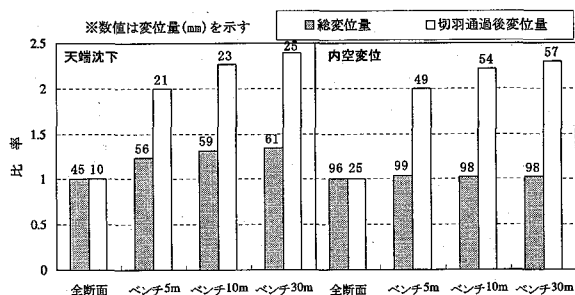


図-14 ベンチ長と天端沈下・内空変位

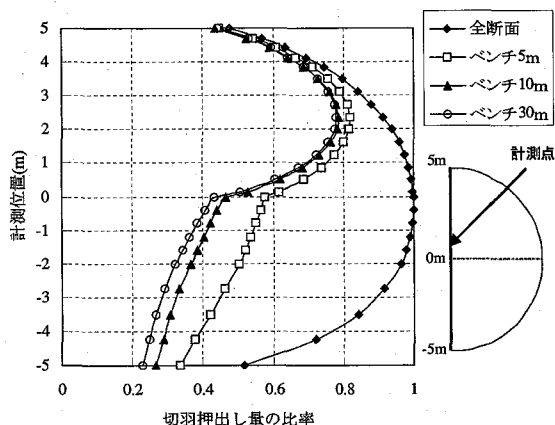


図-16 ベンチ長と切羽押出し量

位についても同様の傾向を示す。このことから、天端沈下と内空変位を抑制するためには、ベンチ長を短くする、すなわち断面の早期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等変位分布図を図-15 に示す。ベンチが長いほど、周辺地山の変位が大きくなっており、天端沈下・内空変位と同様に、図-15 からベンチ長を短くする、すなわち早期閉合が地中変位の抑制効果が高いことがわかる。

(3) 切羽押出し量

図-16 に鉛直方向の切羽押出し量を示す。図からわかるように、全断面ではトンネル中心部の切羽押出し量が最大になっているのに対し、ベンチを設置したケースでは上半で切羽押出し量が大きくなっている。全断面の場合の最大変位は 144 mm で、この値を 1.0 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 割程度の切羽押出し量が抑制されていることになる。また、ベンチ長の違いによる切羽押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切羽押出し量抑制効果はほとんど変わらないと言える。

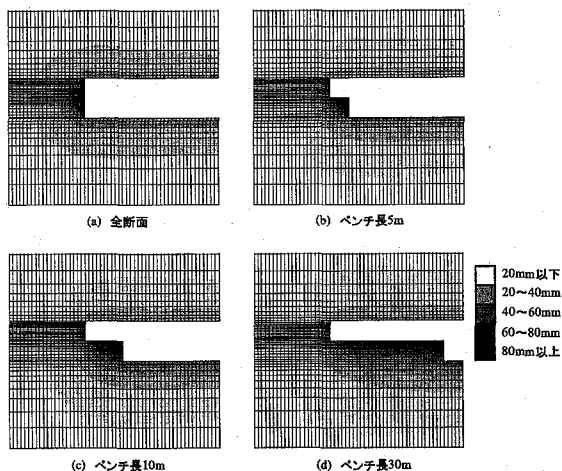


図-15 ベンチ長と地中変位

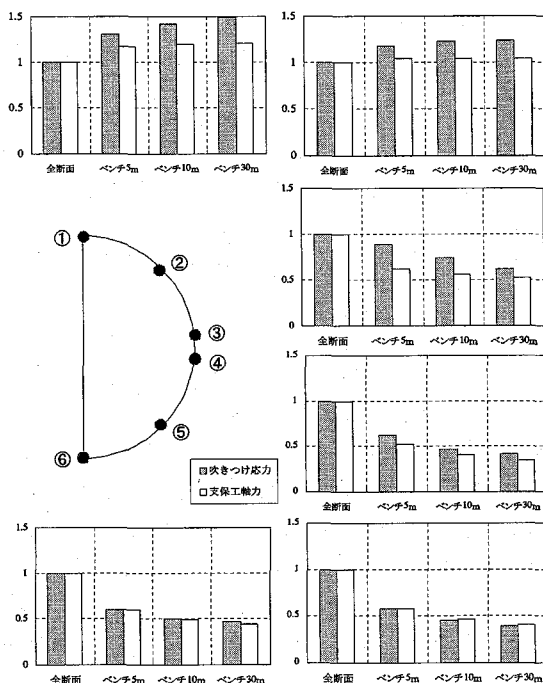


図-17 ベンチ長と部材力

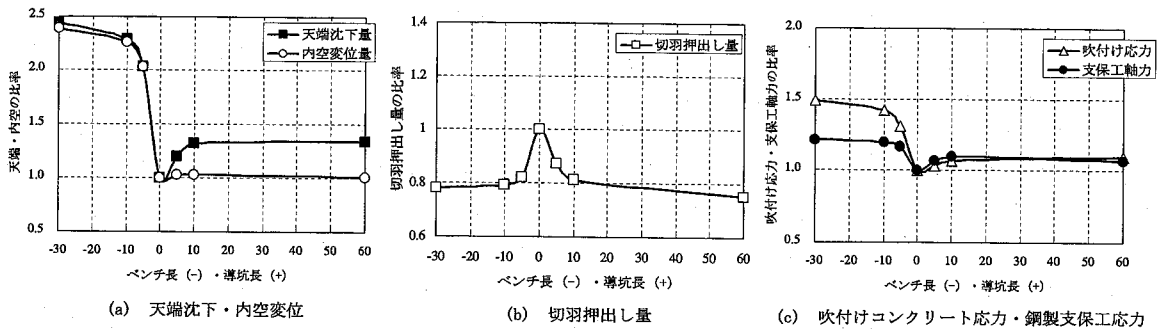
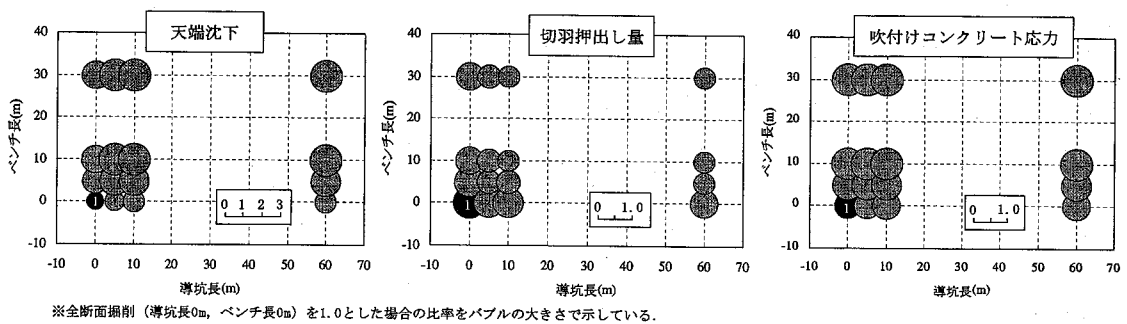


図-18 導坑先進距離とベンチ長の影響



※全断面掘削（導坑長0m，ベンチ長0m）を1.0とした場合の比率をバブルの大きさで示している。

図-19 導坑先進距離・ベンチ長と天端沈下・切羽押出し・吹付けコンクリート応力

(4) 吹付けコンクリート応力と鋼製支保工応力

図-17 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。導坑先進距離の影響検討と同様に全断面掘削時の部材力を1.0として比較している。天端部(①)，右肩部(②)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，図-14 に示す天端沈下の傾向と一致しており，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(③～⑥)では，ベンチ長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・インバート部分は上半の切羽進行に伴う影響を直接には受けないため，ベンチが長くなるにしたがって影響度合いが少なくなることによって考えられる。

3-4 最適な導坑先進距離とベンチ長

3.2 節と3.3 節の解析結果を整理して図-18 に示す。図では，天端沈下と内空変位は切羽通過後の変位量，切羽押出し量は最大値，部材力は天端部の最終的な値をそれぞれ比較している。また，全断面掘削（導坑長0m，ベンチ長0m）の値を1.0とし，横軸は導坑先進距離を正方向，ベンチ長を負方向として示している。

図-18 から，以下のことがわかる。

- ① 天端沈下および内空変位を抑制するためには全断面掘削がもっとも効果的である。また，ベンチが長くなるほど変位量は大きくなる傾向にある（図-18 (a) 参照）。
- ② 全断面掘削が最も切羽の押出し量が大きくなる。また，導坑先進距離およびベンチ長とも10m以上になると切羽押出し量はあまり変わらない（図-18 (b) 参照）。
- ③ 部材力は天端沈下と同じような傾向を示し，全断面掘削が最も少ない（図-18 (c) 参照）。

図-19 は、全断面掘削（導坑 0m, ベンチ 0m）の場合の天端沈下量、切羽押出し量および吹付けコンクリート応力をそれぞれ 1.0 として、これに対する比率を●印の大きさに示している。天端沈下は、導坑先進距離と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 倍も増加する。一方、切羽押出し量は、導坑先進距離と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。導坑とベンチがそれぞれ単独では切羽押出し量抑制効果は少ないが、適切な先進距離の導坑とベンチ長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。

天端部の吹付けコンクリート応力は、ベンチ長が長いほど大きくなり、導坑 60m・ベンチ 30m では全断面と比較して約 1.5 倍となる。

以上より、三次元数値解析結果に基づく天端沈下と切羽押出し量を抑制するための最適な掘削工法は、ベンチを設置しないで導坑先進距離を 10m 程度確保する工法、すなわち先進距離 10m 程度の導坑を設けた全断面掘削ということになる。しかし、切羽押出し量に着目すると、導坑のみを設ける工法に比べて、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出し量が格段に減少することから、導坑とある程度の長さのベンチを採用することが望ましいと考えられる。

実施工においては、導坑先進距離が 10m 以上になると、導坑掘削専用機械を導入する必要がある、施工効率性が悪くなってしまう。このことから、実験的研究で得られた結果と三次元数値解析で得られた結果の傾向は一致し、押出し性地山において導坑先進工法を採用する場合の導坑先進距離は最大 10m 程度で、ベンチ長は可能な限り短くした工法が最適である、すなわちショートスパン導坑先進工法が合理的な施工方法のひとつと考えられる。

5. まとめ

押出し性地山において、導坑を切羽安定のための補助工法と位置付けた実トンネルの施工を実物大の実験的研究と位置付けて比較検討した結果、ショートスパン導坑先進工法が合理的な施工方法と考えられた。同工法をより一般化するために、三次元数値解析によるパラメータ解析を行って評価した結果、下記の知見が得られた。

- ① 導坑の支保効果は、切羽の安定効果が顕著で部材力の軽減効果は少ない。（図-11, 図-12, 図-13, 図-18, 図-19 参照）。
- ② ベンチ長を長くすると変位量が増大する傾向にある。したがって、できるだけベンチを短くして早期閉合を行うことが重要である（図-14, 図-18, 図-19 参照）。
- ③ 押出し性地山に導坑先進工法を採用する場合、最適な導坑先進距離は 10m 程度で、ベンチ長は可能な限り短くすることが望ましい（図-18, 図-19 参照）。
- ④ 実施工で得られた結果と同様の傾向が解析結果においても確認された。すなわち、押出し性地山において、ショートスパン導坑先進工法が合理的な施工方法のひとつであると考えられる。

参考文献

- 1) 高橋浩, 谷井敬春, 岩井勝彦, 桑原秀樹, 進士正人, 中川浩二: 膨張性地山における導坑の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.728/VI-58, pp.27-39, 2003.3
- 2) 田中信次, 村田洋一, 高橋浩, 重田佳幸, 進士正人, 中川浩二: 三次元数値解析を用いた押出し性地山における掘削工法の検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会 第三部門, 2002.9
- 3) 日本道路公団試験所: トンネルの標準設計に関する研究報告書, pp.20, 1986.2
- 4) 橋善雄: 橋梁工学, 共立出版, pp.39-40, 2000.3