

膨張性地山における導坑の適用性に関する 実験的研究

高橋 浩¹・谷井 敬春²・岩井 勝彦³・桑原 秀樹⁴・進士 正人⁵・中川 浩二⁶

¹正会員 住友建設(株) 土木本部技術部 (〒160-8577 東京都新宿区荒木町 13-4)
E-mail: htaka@sumiken.co.jp

²日本道路公団東京建設局佐久工事事務所 (〒385-0051 長野県佐久市大字中込 2913)

³正会員 Ph.D (財) 高速道路技術センター 上席参与 (〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関 3-7-2)

⁴住友建設(株) 土木本部技術部 (〒160-8577 東京都新宿区荒木町 13-4)

⁵正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁶フェロー会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

膨張性地山など大変形の発生が予測される地山でのトンネル建設において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。筆者らは高速道路トンネルの建設において、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た。この施工を実スケールの実験的研究と位置付け、施工ケース毎に計測データなどを比較・検討した結果、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①切羽安定効果、②変位抑制効果を確認した。また、導坑によるいなし効果とは変位抑制が主な効果で、作用土圧軽減効果は少ないことなどを確認した。

Key Words : *squeezing rock tunnel, advancing drift, auxiliary construction method, support effect, field measurement*

1. はじめに

日本にいわゆる NATM が導入されてから 20 年余りが経過し、山岳トンネルの標準工法として定着している。NATM は基本的に全断面あるいはショートベンチなどによって加背を大きく掘削する工法である。しかし、地圧が地山の強度を超えることによりトンネル掘削後に大変形が発生しうるスキューズィング (squeezing) 地山や吸水して体積膨張を引き起こすスウェリング (swelling) 地山などのいわゆる膨張性地山では、加背を大きく掘削することを断念し、導坑先進工法を採用して突破した事例が報告されている¹⁾⁶⁾。

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、上半脚部の支持力確保などである。大変形の発生が予測される地山では、それらに加えて本坑断面への拡幅掘削時の切羽安定効果やいわゆるいなし効果などを期待して採用するケースが多いと考えられる。なお、いなし効果の力学上の定義は既往の研究でも明確にされていないが、一般には「導坑を先進させることにより初期応力の先行解放および先行変位の発生を促し、拡幅掘削時の部材発生応力および変位が軽減される効果」と解釈されていると思われる。本論文では、

膨張性地山などにおいて導坑を施工することによる拡幅掘削時のこれらの効果を総称して、「導坑の支保効果」と呼ぶこととする。

筆者らは、大変形の発生が懸念された新第三紀の泥岩地山に高速道路Ⅱ期線トンネルを建設するに当たり、剛な支保による早期閉合を設計思想とし、導坑先進工法を掘削工法として採用した。しかし、先進導坑を本坑掘削の一部として位置付けた掘削工法として採用するのではなく、本坑掘削とは別に早期閉合達成のための補助工法の1つとして取り扱うこととした⁷⁾。すなわち、専用の施工設備を準備して導坑の単独長距離施工を行うのではなく、切羽や施工状況に即応し、導坑の形状のみならず先進距離までも調整し、適宜導坑による支保効果と施工性を最適にバランスさせながら本坑掘削することを目的として導坑を取り扱う設計思想を新たに考案した。このような考え方をもとに、導坑なしを含めた5通りの導坑施工ケースを実トンネルで試行し、これらの施工結果を実スケールの実験的研究と位置付けて計測データなどを比較・検討することで、既往の研究では必ずしも明確にされていなかった導坑の支保効果を評価した。

本論文では、まず既往の研究を整理し、これまで明確にされていない導坑の支保効果を取りまとめた。次に実

表-1 NATMによる導坑の支保効果に関する既往の研究のまとめ

路線 トンネル名	根拠とするデータ		導坑の支保効果
	施工データ	数値解析	
膨張性地山			
北越北線 鶴立山トンネル ^{1)~3)}	○		・いなし効果により、切上げ時の内空変位量が減少 ・ショートベンチ工法の内空変位76cm → 導坑（非可縮）先進工法の内空変位27cm
	○		・地山の潜在応力の一部を解放し、支保に作用する応力を軽減する効果 ・本坑切り上げ時に切羽押し出しを抑制するためのアンカー効果
東北自動車道 折爪トンネル ⁴⁾	○		・切り上げ時の切羽の自立性が確保できる ・切り上げ時の初期変位速度が減少し、掘削後の内空変位量が激減する
		2次元FEM (弾性)	・本坑掘削後全体変位量は大きくなるが、吹付けコンクリート施工後の変位量は小さくなる ・導坑径4mの場合、吹付け後の変位量は導坑なしの場合の58%となる ・導坑径が大きいほど、吹付けコンクリートの負担は減少する
上信越自動車道 日暮山トンネル ⁵⁾	○		・いなし効果とは、導坑を先進させることで先行変位を発生させ、本坑における変位を抑制する効果
一般国道345号 瀬波トンネル ⁶⁾	○	2次元FEM (弾性)	・切羽の安定に対する効果は極めて高い ・初期変位速度が減少する ・地山に先行変位を発生させる効果は小さかった
TBM導坑			
第二東名・名神 3車線断面トンネル ⁸⁾		3次元FEM (弾性)	・導坑を本坑上半断面内上部に設けた場合、導坑がない場合に比べ、天端沈下（切羽距離5m）が約45%減少する ・天端沈下の抑制効果は、導坑支保工の剛性に依存している ・天端部の地山安定効果は、導坑径に依存する ・影響範囲は、導坑径3mに比べて、径5mで80%、径7mで54%減少する
秋田自動車道 湯田第二トンネル ⁹⁾		3次元FEM (弾性非線形)	・切羽面の改良効果が期待できる ・導坑が切羽の自立に貢献し、掘進長を延ばすことが可能となる ・導坑支保により内圧を受け、切羽が三軸状態に保持され、結果として切羽を安定させる ・いなし効果により、周辺地山に掘削解放荷重を分散させ、結果的に本坑掘削時の支保軽減が図れる
第二東名高速道路 静岡第二トンネル ¹⁰⁾	○		・切羽の安定に貢献しており、肌落ちなどの発生する地山には有利

験を行った日暮山トンネルの概要と実験方法およびその結果、そして確認できた導坑の支保効果について述べる。

2. 導坑の支保効果に関する既往の研究

NATMによる導坑の支保効果に関する既往の研究を整理して表-1に示す。既往の研究は、NATMの普及や補助工法の発展などを考慮して、主に1990年以降に発表されたものを対象としている。また、表には膨張性地山における研究事例のほか、参考として第二東名・名神トンネル群などにおいて施工の合理化を目指したTBM導坑による支保効果に関する研究も併せて示している。

これら既往の研究では、膨張性地山における導坑の主な支保効果は、本坑断面へ掘削する時の①切羽安定効果、②変位抑制効果、③作用土圧軽減効果に大別できる。このうち、②と③の効果については明確に区別することなく、いわゆるいなし効果として一般に取り扱われているようである。

切羽安定効果は、導坑の存在自体が掘削時の切羽の押し出しを抑制する水平アンカー的変位抑制効果を発揮したり、あるいは掘削時の加背を小さくしたことにより切羽の自立性が向上する効果、言い換えれば、導坑

が存在することにより、切羽近傍で安全に作業できる時間が増加する効果と考えられる。しかし、その効果に関する定量的な評価は明確でない。

変位抑制効果は、数値解析では導坑の剛性に依存すると考えられている⁸⁾。このことは、導坑を設置して先行変位の発生や応力解放を惹起すれば掘削時には変位発生が少なくなることを意味する。逆に導坑施工時の変形が小さければ、その効果は少ないものと解釈できる。また、導坑を先進させたが先行変位の発生は少なかったとの報告事例⁶⁾はあるが、導坑の剛性の変化などがいなし効果に与える影響についても実トンネルでの検証は報告されていない。

作用土圧軽減効果に関しては、数値解析では変位抑制効果と合わせて掘削時の部材発生応力も減少する⁴⁾、あるいは作用土圧が減少して支保の軽減が図れる⁹⁾とされている。しかし、現場計測では変位が減少したことは確認されているものの^{2)~6)}、作用土圧あるいは部材発生応力に関する報告事例は見あたらない。

このように、既往の研究では、導坑を施工することによる掘削時の①切羽安定効果、②変位抑制効果、③作用土圧軽減効果について、必ずしも明快に説明されておらず、かつ実施工による確認もできていないのが現状と思われる。

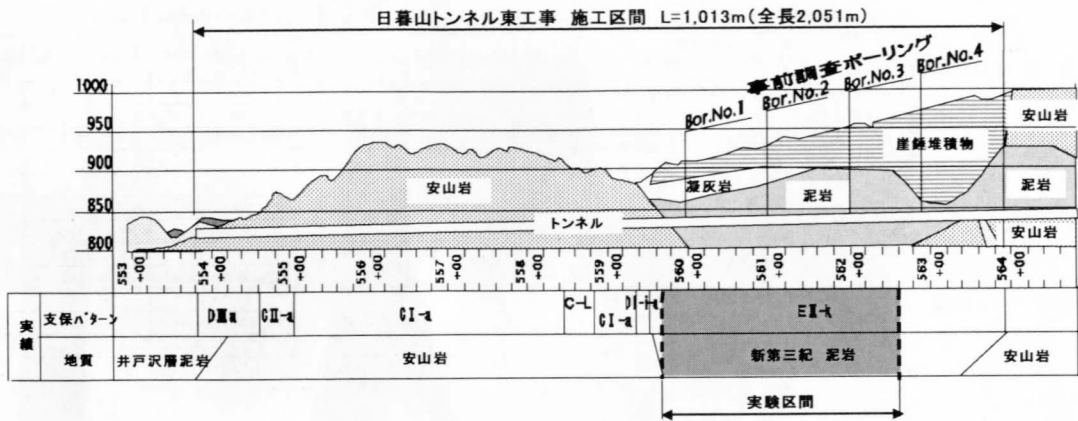


図-1 II期線トンネル地質縦断面図

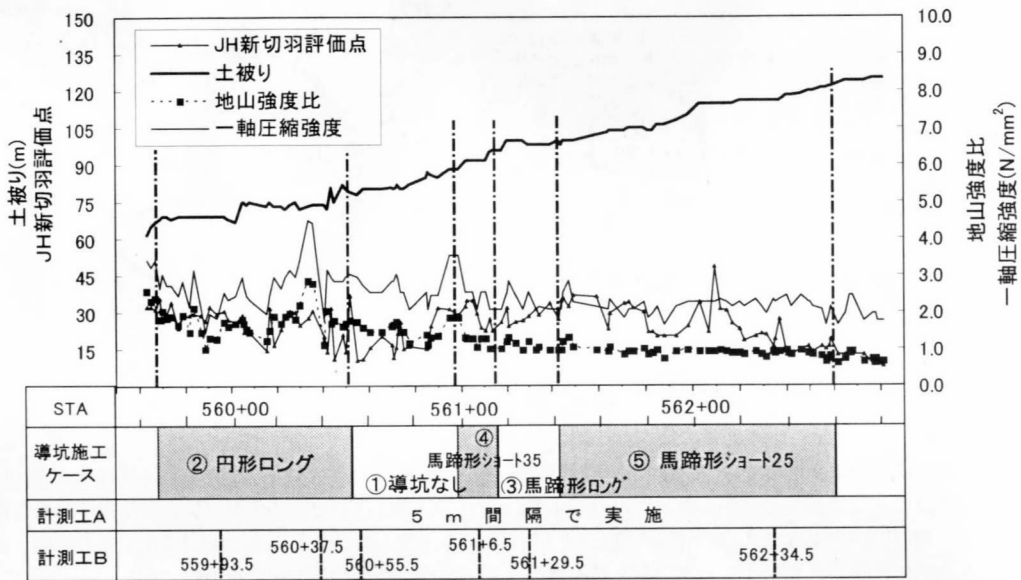


図-2 実験区間の地山評価結果

3. 日暮山トンネルの概要と実験方法

(1) 日暮山トンネルの概要

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を実証するために、上信越自動車道日暮山トンネルII期線東工事の施工を実スケールの実験的研究と位置付けて、計測データなどを検討・評価した。

現在供用中の日暮山トンネルI期線工事では、トンネル中央部に位置する約370mの脆弱な泥岩区間において、上部滞水層からの多量の切羽湧水と膨張性土圧により、内空変位と天端沈下が共に最大約3mに至るほどの大変形

が発生し、掘削に困難を極めたため、この区間の突破に約3年の期間を要した⁵⁾。この経験から、II期線トンネルでは、滞水層からの湧水を回避し、かつI期線への影響を考慮して、I期線と100m離して計画された。しかし、事前の地質調査結果ではII期線に出現する新第三紀の泥岩の物性値は、I期線トンネルとほぼ同様であり、I期線と同程度の大変形の発生が懸念された。

図-1に施工データをもとに修正したII期線トンネル地質縦断面図、図-2に実験区間の地山評価結果を示す。図-2において、縦軸(Y軸)は左右各々2項目の共通目盛りとしている。図-2からわかるように、実験区間は土被り高さの変化と一軸圧縮強度のバラツキにより、地山強度

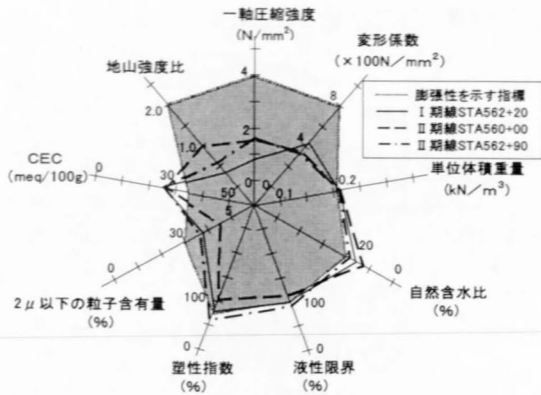


図-3 膨張性を示す指標¹¹⁾との比較

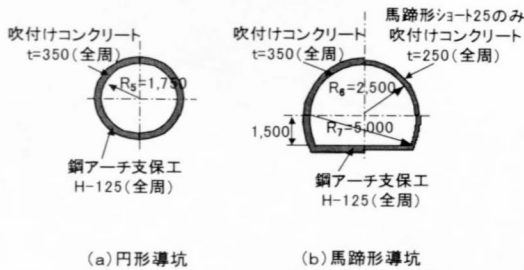


表-2 導坑と拡幅の支保工諸元

導坑	吹付けコンクリート (全周)	種別	ブレーン
		σ_{ck} (N/mm ²)	18
	厚さ (mm)	350 (250)*	
	鋼アーチ支保工 (全周)	サイズ	H-125
	ロックボルト	建込み間隔 (cm)	100
			なし
拡幅	吹付けコンクリート (全周)	種別	SFRC (SF1%)
		σ_{ck} (N/mm ²)	18
		厚さ (mm)	350
	鋼アーチ支保工 (全周)	サイズ	H-250
		建込み間隔 (cm)	100
	ロックボルト	長さ (m)	6.0
周方向間隔 (cm)		100	
	延長方向間隔 (cm)	100	

*導坑吹付厚さは、马蹄形ショート25のみ25cm

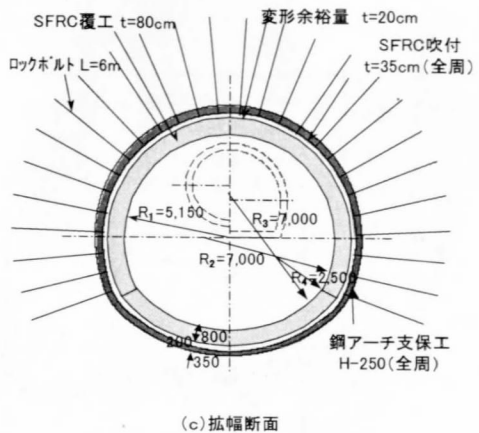


図-4 支保パターン図

比が概ね0.6~1.5の幅で変化している。また、実験区間では切羽湧水はまったく発生しなかった。これらにより、本研究では、図-2に示すような地山物性値の変化やパラツキが、大局的には得られた施工データに与える影響は少ないと判断した。また、図-3に実験区間の泥岩の物性値と膨張性を示す指標¹¹⁾との比較結果を示す。図-3のうち、II期線の物性値は、施工時に調査していないため、事前調査の室内試験値を示している。

II期線トンネルの設計に当たっては、剛な支保による早期閉合を基本的な考え方とし、以下の理由から導坑先進工法をこの泥岩区間に採用した。

- ① I期線トンネルでは種々の対策工を講じたが、最終的に先進導坑を採用して泥岩区間を突破した⁹⁾。鍋立山トンネル¹⁾⁻³⁾、折爪トンネル⁴⁾など、大変形が発生した膨張性地山のトンネルにおいても導坑先進工法を採用している。
- ② 一般的な導坑の施工のように専用の施工設備を用いて、導坑を単独長距離施工するのではなく、施工状況や地山条件などに即応して拡幅切羽からの先進距

離や導坑形状などを変更する、というように補助工法の1手法として先進導坑を取り扱う工夫を新たに考案した。それにより切羽の安定性を確保しながら、掘削断面の早期閉合を達成できる⁷⁾。

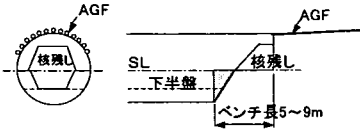
- ③ その他の効果として、地質確認、水抜き効果などが期待できる。

イタリアのラティコサトンネルなどでは、切羽前方を長尺の先打ちボルトによって補強することで全断面掘削を採用し、早期閉合を達成している¹²⁾。しかし、日暮山トンネルでは、通常の削孔方法では削孔水によって地山を荒らし、かえって地山の膨張性を助長してしまうと懸念したこと、日本では膨張性地山における同工法の施工実績がなかったこと、などから検討を除外した。

(2) 導坑の支保効果の検討ケース

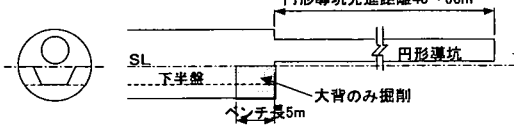
日暮山トンネルでは、導坑を早期閉合達成のための補助工法の1つと位置付け、導坑なしと導坑ありの検討を行うと同時に、導坑形状を円形と马蹄形の2タイプ、導坑の吹付けコンクリート厚さを35cmと25cmの2タイプ、

①補助ベンチ付き全断面工法（導坑なし）



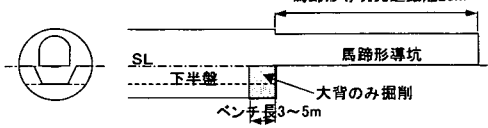
②円形導坑ロングスパン先進工法（円形ロング）

導坑吹付け厚 $t=350$



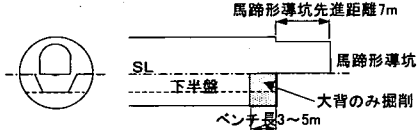
③馬蹄形導坑ロングスパン先進工法（馬蹄形ロング）

導坑吹付け厚 $t=350$



④馬蹄形導坑ショートスパン先進工法（馬蹄形ショート35）

導坑吹付け厚 $t=350$



⑤馬蹄形導坑ショートスパン先進工法（馬蹄形ショート25）

導坑吹付け厚 $t=250$

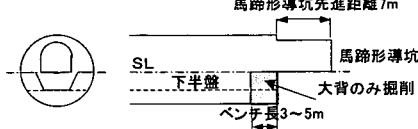


図-5 導坑の施工ケースとその名称

拡幅切羽からの先進距離を長くしたケース（ロングスパン）と短くしたケース（ショートスパン）の組み合わせによる5通りの導坑施工ケースを試行した。図-4に支保パターン図、表-2に導坑と拡幅の支保工諸元、図-5に導坑の施工ケースとそれぞれの名称、表-3に施工ケース毎の掘削断面積を示す。

図-5に示した導坑の施工ケースのうち、②円形ロングおよび③馬蹄形ロングという呼び名のケースは、導坑掘削専用機（カッターローダーCL9E-1）を導入して拡幅切羽からの先進距離を28m~60mと長くした掘削工法である。一方、④馬蹄形ショート35、⑤馬蹄形ショート25という呼び名のケースは、導坑掘削専用機を用いずに自由断面掘削機（ツインヘッダーMT1000）で下半盤から導坑を掘削する工法（掘削可能な長さは最大7m程度）を言う。ケース④の導坑の吹付け厚さは標準の35cmであ

表-3 導坑施工ケース毎の掘削断面積

導坑施工ケース	導坑	掘削断面積 (m ² /m)	
		上半	下半・インバート
①導坑なし		80.811	49.5
②円形ロング	13.854	71.190	49.5
③馬蹄形ロング	22.902	63.721	49.5
④馬蹄形ショート35	22.902	63.721	49.5
⑤馬蹄形ショート25	21.159	63.721	49.5

※上半掘削断面積は導坑の吹付けコンクリート取り壊しを含む

るのに対して、ケース⑤の導坑の吹付け厚さは25cmとした。①導坑なしと導坑を設置した②~⑤の施工ケースの拡幅時の掘削は、図-4および表-2に示したようにすべて同一のいわゆる剛な支保構造を採用し、補助ベンチ付き全断面工法とした。拡幅掘削の施工順序は、施工機械の関係から上半部を原爆型（上半と大背部を一括掘削）に掘削・支保した後に、一次支保による早期閉合を目的に下半（土平部）とインバートを同時に掘削・支保した。掘削方式は導坑、拡幅ともに機械掘削とした。

導坑施工ケースの採用順序は、図-2に示したように、まずは当初設計の②円形ロングで掘削を開始した。導坑先進距離は、吹付けコンクリートの圧送能力や導坑内の換気状況などを勘案して最大60m程度に設定した。円形導坑の掘削では天端崩落がしばしば発生しただけでなく、作業空間が狭いために崩落の対応が難しく、導坑掘削が困難な状況となった。そこで、導坑施工を中止することによる拡幅支保への影響を二次元非線形FEM解析によって検証¹³⁾した結果、導坑を取りやめても施工可能と判断し、①導坑なしに移行した。①導坑なしの施工では、切羽の安定を確保するために、長尺鋼管フォアパイリング（AGF）などの補助工法が必要となり、断面閉合の遅れとともに内空変位が最大700mmに達してしまった。このため、切羽の安定性確保を目的に再度導坑先進工法を検討した結果、施工性を勘案して馬蹄形導坑を採用した。支保構造は、二次元非線形FEM解析により設定した。馬蹄形導坑の先進距離は、施工機械の段取り等により、まずは7m程度の先進距離の④馬蹄形ショート35とした。さらに、導坑の先進距離の影響を把握するために、③馬蹄形ロングに移行して先進距離を30m程度に変更した。最終的に、それまでの計測データ等から、先進距離を短くした方が優位と判断し、先進距離を7m程度とした⑤馬蹄形ショート25に移行した。このとき、④馬蹄形ショート35の導坑の計測データをもとに、導坑の吹付け厚さを低減しても問題は少ないと判断して、吹付け厚さを25cmとした。

計測項目は、計測工Aおよび計測工B（吹付けコンクリート応力測定、鋼アーチ支保工応力測定など）とした。計測位置は、図-2に示したように計測工Aが5m間隔、計測工Bは導坑の施工ケース毎の代表的な位置で実施し

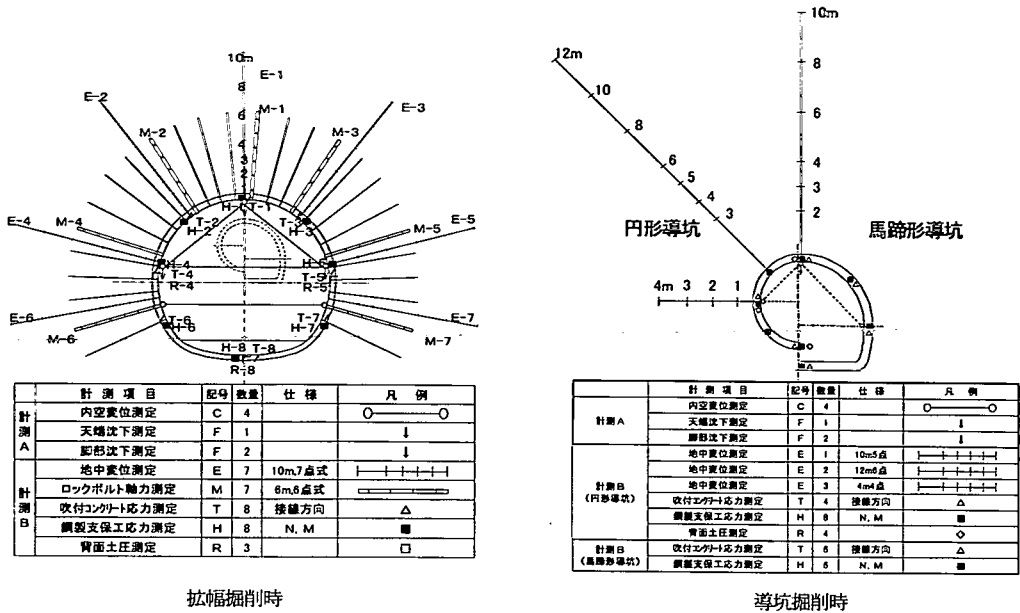


図-6 計測機器配置図

た。図-6 に幅掘削時および導坑掘削時の計測器配置図を示す。

(3) 導坑の支保効果の評価方法

膨張性地山における導坑の支保効果の評価は、(2)で述べたそれぞれの導坑施工ケースで得られた計測結果を以下のように比較・検討することにより実施した。

a) 切羽安定効果の評価方法

切羽安定効果を定量的に評価する方法としては、切羽変位や切羽自立時間を直接計測して比較する方法などがある。しかし、あまり一般的でなく、事例も少ない¹⁰⁾。また、切羽変位として切羽押出し量を測定する場合には、測定期間中切羽作業を休止する必要がある。そのうえ、測定中の安全性を確保するため特別な切羽面の安定対策が必要となり、導坑による切羽安定効果ではなく結果的に切羽安定対策の効果を測定していることになる、などの矛盾が生じてくるために測定方法の選定や結果の評価が難しい。そのため、本研究では、切羽面の測定は定性的な挙動把握を目的として1断面のみ測定を実施するとともに、切羽安定効果を「導坑などの対策工の実施により切羽が安定し、結果的にベンチ長を短くして切羽近傍で安全に断面閉合作業が可能となる効果(断面閉合時間短縮効果)」と実務的に定義をして、断面閉合達成までの所要日数から切羽安定性を相対的に比較する評価方法を新たに考案した。すなわち、切羽が安定すれば切羽安定対策のための追加的な施工を実施する時間が減少し、全体として断面閉合時間が短くなる。また、切羽が安定

して作業の安全性が確保されなければ、ベンチを短くして切羽近傍での早期断面閉合ができない。そのため、断面閉合達成日数が実務的な要因も包含して、導坑による切羽の安定効果を評価していると考えた。なお、断面閉合達成日数とは、図-4 に示したように、幅掘削を開始してから吹付けコンクリート(SFRC, $t=35\text{cm}$)とインバート支保工(H-250)による一次支保でのインバートクローズ完了までの所要日数である。また、比較条件を統一するために、作業休止日を除く一方、切羽安定のための補助工法に要した時間や導坑掘削時間を含む日数を閉合達成日数としている。

このように断面閉合達成日数に着目し、①導坑なしと導坑を設置したケース②～⑤を比較することで導坑施工による幅掘削時の切羽の安定効果を評価した。

b) 変位抑制効果の評価方法

変位抑制効果については、幅掘削時の天端沈下量と内空変位量(上半水平変位量)に着目し、①導坑なしとケース②～⑤の導坑ありの場合を比較・検討することで評価した。

既往の研究では、いなし効果は導坑の剛性に依存すると考えられている⁹⁾。このことを実証するために、導坑の形状、先進距離および導坑吹付け厚さをファクターとして、それぞれの施工ケースにおける変位発生状況を比較した。導坑の形状および掘削断面積が変位抑制効果に与える影響に関しては、導坑先進距離と吹付け厚さを同一条件として形状を変えた②円形ロングと③馬蹄形ロングのそれぞれのケースを比較することで評価した。導坑

表-4 導坑の支保効果と着目点および評価方法

番号	導坑の支保効果	着目点	評価方法
a)	切羽安定効果	断面閉合達成日数	・①*導坑なしの場合とケース②～⑤の導坑がある場合を比較
b)	変位抑制効果	天端沈下と内空変位の初期変位速度および最大値	・①導坑なしの場合とケース②～⑤の導坑がある場合を比較 ・導坑の形状と剛性を同一とし、先進距離を変更した③馬蹄形ロングと④馬蹄形ショート35を比較 ・先進距離を同一とし、導坑形状と掘削断面積を変えた②円形ロングと③馬蹄形ロングを比較 ・先進距離を同一とし、導坑の吹付け厚を変えた④馬蹄形ショート35と⑤馬蹄形ショート25を比較
c)	作用土圧軽減効果	吹付けコンクリート応力 鋼アーチ支保工応力 支保部材の軸力 推定作用土圧	・b)変位抑制効果の評価方法と同じ

*評価方法の欄の丸囲み数字は、図-5の導坑の施工ケースを示している。

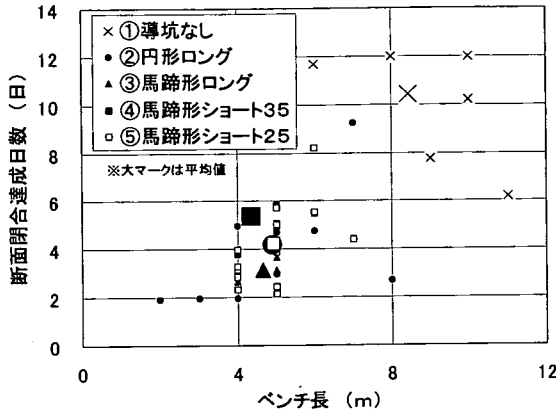


図-7 断面閉合達成日数とベンチ長

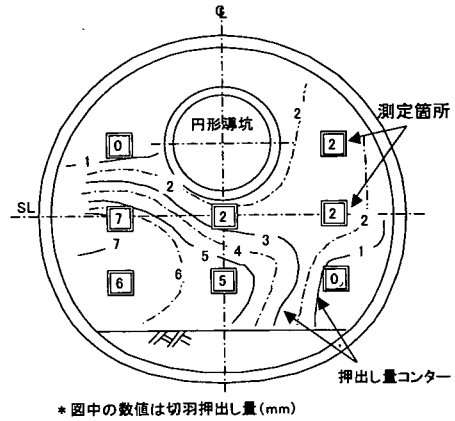


図-8 切羽押し出し量測定結果の一例
(②円形ロング)

先進距離および吹付け厚さが変位抑制効果に与える影響については、③馬蹄形ロングと④馬蹄形ショート 35、④馬蹄形ショート 35と⑤馬蹄形ショート 25のケースをそれぞれ比較することで評価した。

c) 作用土圧軽減効果の評価方法

一般的に土圧計による作用土圧の計測は、計器自体の特性や地山との接触状態により測定値にバラツキが生じやすい。このため、作用土圧軽減効果に関しては、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工に作用する応力を測定し、それぞれの支保工応力から軸力を算出した。そして、薄肉理論¹⁹⁾に基づく式(1)により作用土圧を換算して評価した。

$$P = N / (r \cdot L) \quad (1)$$

ここに、P：作用土圧 (N/mm²)

N：支保工応力から算出した軸力 (N)

r：支保工面までの半径 (mm)

L：支保間隔 (mm)

作用土圧軽減効果の比較は、変位抑制効果の評価と同様に、導坑の形状および掘削断面積、先進距離および導

坑吹付け厚さをファクターとして評価した。

以上をまとめて、表-4に導坑の支保効果とその着目点および評価方法を整理する。

4. 導坑の支保効果に関する実験結果

(1) 切羽安定効果

図-7に、それぞれの導坑の施工ケースにおける断面閉合達成までの経過日数とベンチ長（上半切羽と下半切羽・インバートまで距離）の比較を示す。図中、大きなマークは、同じ種類の小さなマークをグループとした場合の平均値を示す。この図から明らかなように、断面閉合の達成までの日数は、×で示した①導坑なしのグループが平均 10.4 日（ベンチ長は平均 8.4m）であるのに対して、ケース②～⑤の導坑を設置した場合は 3.1～5.4 日（ベンチ長は平均 4.3～4.9m）となり、1/3～1/2 程度にまで閉合日数が短縮されている。これは、表-5に示したように①導坑なしのケースでは、切羽の安定性が確保されていないため、切羽近傍で安全に断面閉合作業を行うことが困難であり、切羽安定のための補助工法とし

表-5 導坑の施工ケースと切羽安定のための対策工

導坑の有無	施工ケース	切羽安定のための対策工	施工で必要とされるベンチ長
導坑なし	①	核残し, 鏡吹付け, 鏡ボルト, 長尺鋼管フォアパイリング工 (AGF)	5~9m
導坑あり	②, ③, ④, ⑤	鏡吹付け	3~5m

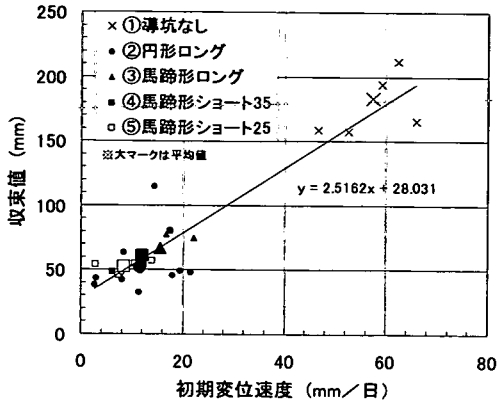


図-9 天端沈下の初期変位速度と収束値

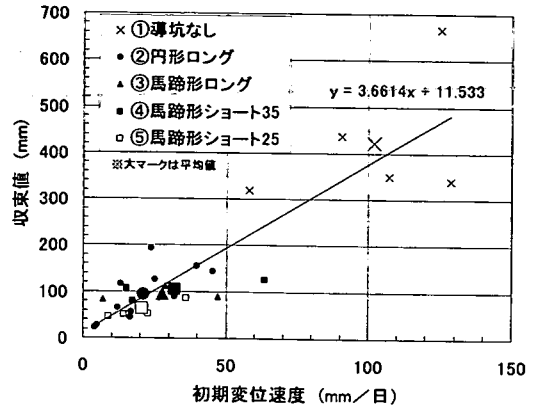


図-10 内空変位の初期変位速度と収束値

て切羽毎に核残しや鏡吹付けを行ったこと, ラップ長を考慮して3~9m毎に鏡ボルトや長尺鋼管フォアパイリング工 (AGF) を施工したために結果として断面閉合が遅れたこと, 切羽の安定性を向上させる目的でベンチ長を導坑のある場合よりも2~4m長くする必要があったこと, などが原因と考えられる。一方, 導坑を設置したケース②~⑤では, 鏡吹付け程度の補助工法で, 安全に早期断面閉合が達成された結果と考えられる。

以上述べてきたように, 導坑を先進させた時の拡幅掘削時の切羽安定効果は, 次のようにまとめられる。

- ① 導坑を設置することで, 切羽近傍での断面閉合作業が安全に施工でき, 断面閉合日数が短縮される。この結果から, 導坑を施工することにより, 拡幅時の切羽の安定性が向上すると考えられる (図-7 参照)。なお, 参考として図-8 に鏡吹付け (t=5cm) を施した②円形ロングのケースにおける切羽押し出し量測定結果を示す。地質状況の違いや鏡吹付け厚さの施工誤差などの影響の有無は明確ではないが, 下半センターから左側の切羽押し出し量5~7mmに比べて, 導坑周辺では0~2mmと相対的に押し出し量が小さく, 導坑の設置により拡幅時の切羽の押し出しが小さくなり, 切羽の安定性が向上していることが確認できる。
- ② 切羽安定効果を「導坑などの対策工の実施により切羽が安定し, 結果的にベンチ長を短くして切羽近傍で安全に断面閉合作業が可能となる効果」と定義す

ると, 本研究で示した規模の導坑であれば, 切羽安定効果は導坑施工ケースにほとんど影響されない (図-7 参照)。

(2) 変位抑制効果

図-9 および図-10 に, 拡幅掘削時の天端沈下と内空変位の初期変位速度と収束値の比較図を示す。なお, 収束値は, 切羽距離 4D 時点の変位量としている。また, 初期変位速度は計測開始 1 日間の変位 (mm/日) で, 計測開始はロックボルト施工完了直後とした。図から明らかなように, 多少のバラツキがあるものの, 天端沈下および内空変位の初期変位速度, 収束値ともに×印で示す①導坑なしに比べて, 導坑を設置したケース②~⑤が小さな値となっており, 導坑設置により初期変位速度と収束値がともに概ね 1/2~1/3 に減少することが分かる。また, 天端沈下, 内空変位ともに, 初期変位速度と収束値に概ね相関関係が認められる。

図-11 および図-12 は, 拡幅掘削時の天端沈下および内空変位の収束値と断面閉合達成日数との関係を示したものである。これらの図からわかるように, 天端沈下と内空変位の収束値は, とともに断面閉合達成日数とほぼ線形の関係にあり, 一般に知られているように, 早期閉合による収束値の低減が確認された。また, このことは導坑を施工することにより収束値は減少するが, その効果は断面閉合日数の短縮によるもの大きいことを表している。

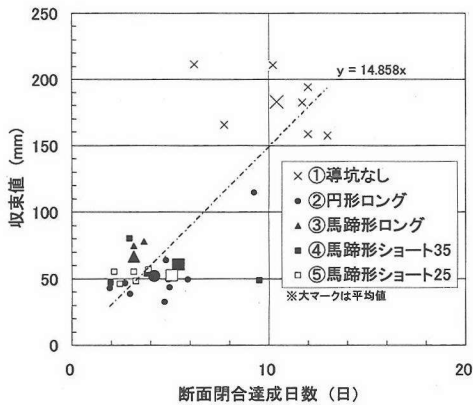


図-11 天端沈下の収束値と断面閉合達成日数

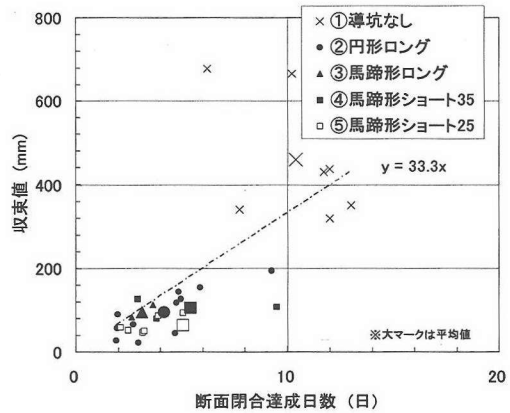


図-12 内空変位の収束値と断面閉合達成日数

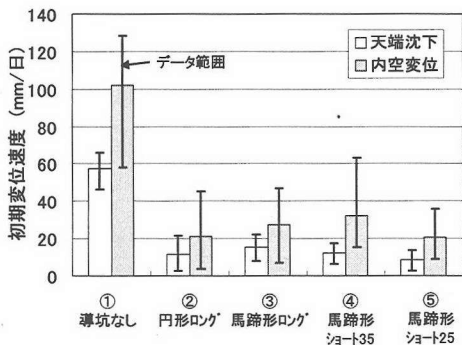


図-13 拡幅時の初期変位速度 (平均値)

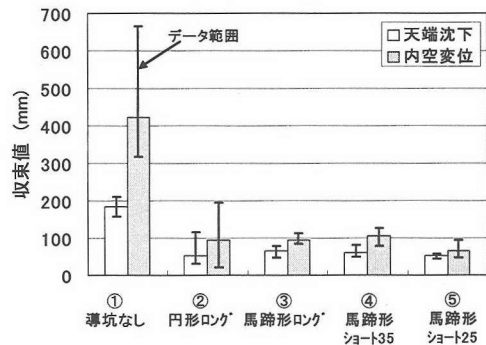


図-14 拡幅時の収束値 (平均値)

図-13 および図-14 に、施工ケース毎の初期変位速度と収束値のデータ範囲およびその平均値を示す。これらの図から明らかなように、導坑を施工することによる拡幅時の初期変位速度ならびに収束値の変位抑制効果は明白である。しかし、導坑のそれぞれの施工ケースによる効果の違いはあまりないことがわかる。これらのことから、導坑を施工する意義は確認できたが、導坑の形状、長さ、剛性の相違が変位抑制効果に与える影響は比較的少ないものと考えられる。

次に、導坑形状と掘削断面積、先進距離および導坑吹付け厚さの影響が導坑自身の施工時の計測結果に与える影響について整理する。

図-15 は、導坑施工時の導坑に発生する天端沈下と内空変位の両方の初期変位速度の平均値を示しており、円形導坑と馬蹄形導坑の形状および大きさを比較できるように模式図を併せて示した。なお、一般に内空変位量は天端沈下量の2倍程度であることから、内空変位についてはその初期変位速度を1/2として、天端沈下と同じレベルで比較できるようにした。また、天端沈下および内空変位の収束値は、先進距離の違いによって計測期間が

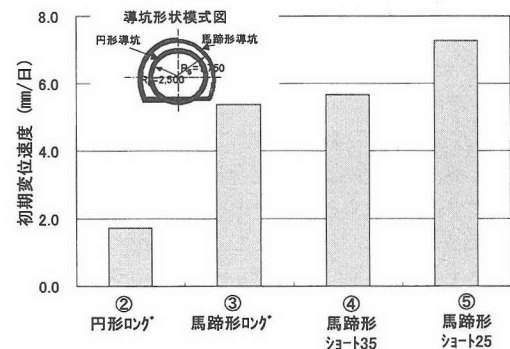


図-15 導坑の平均初期変位速度

異なり単純な比較が困難なので、ここでは初期変位速度のみを比較対象としている。図-15 からわかるように、②円形ロングの初期変位速度は馬蹄形導坑③、④、⑤の1/3~1/4程度と小さい。また、同じ馬蹄形だが先進距離の異なるケース③と④を比較すると初期変位速度は同程度であり、先進距離は短い導坑吹付け厚さが異なるケース④と⑤を比べると吹付け厚さの薄いケース⑤の初期

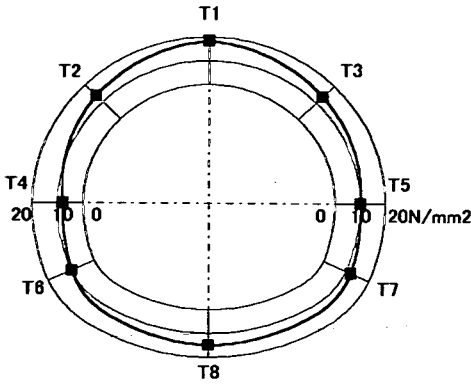


図-16 吹付けコンクリート応力分布図の一例
(③馬蹄形ロング)

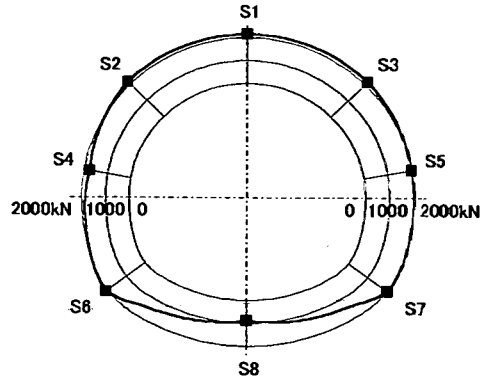


図-17 鋼アーチ支保工軸力分布図の一例
(③馬蹄形ロング)

変位速度が④の約 1.3 倍と大きくなる。このように、導坑の形状あるいは吹付け厚さにより導坑そのものの剛性が高いほど、また掘削断面積が小さいほど変位量が小さくなる傾向が認められる。その一方、図-13 および図-14 に示すように、拡張掘削時には導坑施工ケースの違いによる変位抑制効果に大きな差はないので、導坑の剛性の違いにより導坑自体の変位量に差があっても、拡張掘削段階では導坑の施工形態による変位抑制効果の差はほとんどないと言える。

以上述べてきたように、導坑施工による変位減少効果を整理すると次のようにまとめられる。

- ①導坑を設置することにより、拡張掘削時の天端沈下と内空変位の初期変位速度および収束値は、減少する(図-9～図-10 参照)。
- ②今回の実験では、導坑を設置した場合の初期変位速度は、設置しない場合の 1/2 程度に減少した。同様に、収束値も導坑を設置しない場合の 1/2 程度に減少したが、その効果は断面閉合日数の短縮による効果が大きいと考えられる(図-11～図-12 参照)。
- ③導坑を先進させることによる拡張時の変位抑制効果は、導坑の先進距離、断面形状、掘削断面積および支保剛性などにほとんど影響を受けない(図-13～図-14 参照)。
- ④導坑の剛性の違いにより導坑自体の変位量に差があっても、その影響は拡張掘削時にはほとんど認められない(図-9～図-15 参照)。

これらのことから、導坑はある程度の先進距離を確保して、拡張掘削前にそれ自体が壊れない程度の最小限の支保を施せば切羽面の安定性が増加する。そのため、拡張時の断面閉合時間が短縮でき、結果的に変位抑制効果になると考えられる。なお、導坑の支保部材については、切羽状況や施工状況および作業の安全性などに配慮して、

鋼アーチ支保工の有無、SFRC 吹付けやグラスファイバーロックボルトなどの採用を検討すればよい。また、形状による導坑の支保効果の影響は比較的小さいと考えられるので、施工性の良い馬蹄形が望ましいと思われる。

(3) 作用土圧減少効果

図-16、図-17 に、③馬蹄形ロングの場合の支保工応力測定による吹付けコンクリート応力と鋼アーチ支保工軸力の分布図を一例として示す。この図からわかるように吹付けコンクリート応力および鋼アーチ支保工軸力ともにアーチ部からインパート部の全周にわたってほぼ一様な分布を示しており、特に偏土圧などは作用していないと判断できる。これは他の導坑施工ケースにおいても同様の結果である。このことから、導坑施工ケース毎の土圧の比較は各計測断面の平均値で取り扱うこととした。

図-18 に拡張支保部材の平均軸力、図-19 に前述の式(1)により算出した平均作用土圧をそれぞれ示す。なお、すべての施工ケースにおいて、切羽距離 3D 時点における応力測定結果から求めた軸力および作用土圧を比較している。図-18 から明らかなように、①導坑なしの軸力と導坑を設置したケース②～⑤の軸力は、若干の差はあるものの、6,500kN 前後のほぼ同様の軸力を示している。また、図-19 に示すように①導坑なしの場合と導坑を設置したケース②～⑤の推定作用土圧は、概ね 1.2N/m² 程度の値となる。さらに、導坑形状の異なるケース②と③、先進距離の異なるケース③と④、導坑吹付け厚の異なるケース④と⑤をそれぞれ比較しても、軸力および推定作用土圧の顕著な差は見いだせない。

図-20 は導坑施工時の吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工に発生した平均軸力、図-21 は図-19 と同様に導坑に作用する平均作用土圧を示している。なお、導坑の先進距離の違いにより収束値の比較が困難なので、ここ

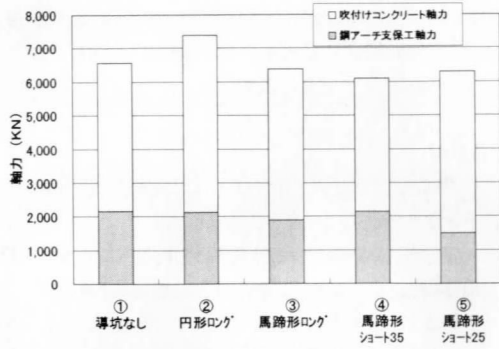


図-18 拡幅支保部材の軸力 (平均値)

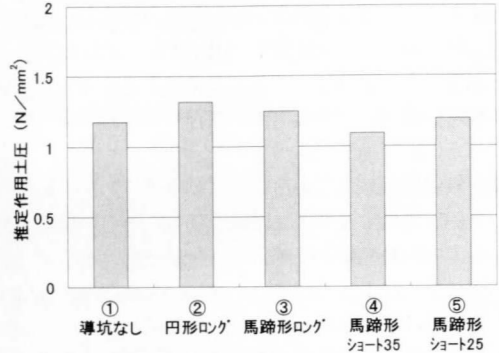


図-19 拡幅時の推定作用土圧 (平均値)

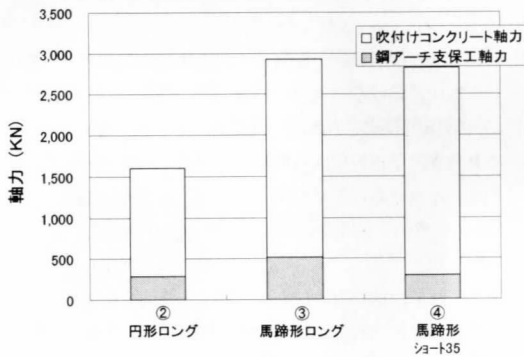


図-20 導坑支保部材の軸力 (平均値)

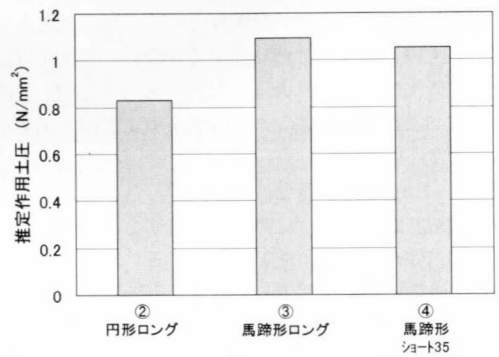


図-21 導坑に対する推定作用土圧 (平均値)

で取り扱うデータは導坑切羽距離 1D 時点の各断面の平均値としている。図-20 に示すように、導坑支保部材に発生する軸力は、②円形ロングが馬蹄形③、④の約 1/2、同じ馬蹄形で先進距離の異なるケース③と④はほぼ同程度の値を示す。この結果は、図-4 と表-3 に示したように円形導坑の掘削断面積が 13.9m²に対して馬蹄形導坑は 21.2~22.9 m²であり、掘削断面積の大きさの違いにも影響を受けていると考えられる。その一方、式(1)に従って作用土圧を推定した図-21 を見ると、導坑形状が円形のほうが若干小さな値を示しているものの、結局支保工面までの半径の影響を受けて、概ね同程度の値となる。このことから、導坑自体への作用土圧は、導坑形状や掘削断面積および先進距離にほとんど影響を受けないと考えられる。

以上の結果をとりまとめると、導坑施工による作用土圧減少効果の評価は次のようにまとめられる。

- ① 拡幅時の支保部材に発生する軸力と作用土圧は、導坑ありと導坑なしの場合ともほぼ同程度である (図-18, 図-19 参照)。

- ② 導坑の施工形態の違いによる部材発生軸力および作用土圧の差はあまり認められない (図-18, 図-19 参照)。

- ③ 導坑本体に作用する土圧は、形状や先進距離にほとんど影響されない (図-20, 図-21 参照)。

- ④ 導坑施工により初期応力を先行解放しても、拡幅掘削時の作用土圧軽減効果は明確に確認できない (図-18, 図-19 参照)。

これらのことから、導坑の支保効果のうち、いわゆるいなし効果とは、導坑施工による断面閉合時間の短縮によって結果的に得られる変位減少効果が主であると考えられる。

5. まとめ

膨張性地山に建設されるトンネルにおいて、導坑を補助工法として取り扱った5通りの導坑施工ケースを試行した。これを実スケールの実験的研究と位置付けて、得

られた計画結果を比較検討した。その結果、既往の研究では必ずしも明確にされていないいわゆるいなし効果など導坑の支保効果に関する以下の知見を得た。

- ①導坑を施工することによる支保効果として、拡幅掘削時の切羽安定効果（断面閉合時間短縮効果）および変位抑制効果が認められた。
- ②一般に解釈されているいなし効果のうち、拡幅時の支保工に対する作用土圧減少効果、あるいは部材発生応力の軽減効果は確認されなかった。
- ③導坑施工によるいわゆるいなし効果を明確に評価することはできなかった。今回の知見から、いなし効果を実態に応じて再定義すると、「導坑を先進させることによって拡幅時の切羽安定を促進し、早期に断面閉合を可能とすることにより拡幅掘削時の変位が軽減される効果」と解釈できる変位軽減を中心とする効果で、一般に解釈されていると思われる土圧や応力の軽減効果は余り期待できないと考えられる。
- ④導坑の支保効果は、導坑の形状、掘削断面積、先進距離および支保剛性など、導坑の施工規模に関する影響は小さい。

これらの知見から、膨張性地山に建設されるトンネルでは、導坑を以下のように考えて設計することで、より安全で経済的な施工が可能となると考えられる。

- ①専用の施工設備を準備して導坑の単独長距離施工を行うのではなく、導坑を補助工法のひとつと位置付けて、切羽状況や施工状況に即応して、導入の有無を判断する。
- ②今回の実験ケースのように、導坑の先進距離を最低7m程度確保することで、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る。
- ③導坑の支保剛性は、拡幅掘削前に壊れない程度で十分合理的である。ただし、切羽状況や施工状況および作業の安全性を考慮して導坑の支保部材を決定する必要がある。なお、日暮山トンネルでは、導坑先進距離を長くしたロングスパンの施工時に拡幅切羽の進行に伴って、導坑坑口部の吹付けコンクリートのクラックや剥落、あるいはインバート支保工の座屈などが発生する区間もあった。
- ④導坑の形状は施工性から決定すればよく、馬蹄形で十分と考えられる。

今後は、今回の現場計測データに基づき数値解析などを実施して、導坑の支保効果をより定量的に評価する予定である。

謝辞：本研究にあたり、レヴェックスコンサルタント（株）石松辰博氏には惜しめない御協力を受けた。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柴田剛志, 大沢光男：19年ぶりに導坑貫通の鉄道トンネル、トンネルと地下, pp. 17-24, 1993.
- 2) 大塚正幸, 高野彬：膨張性泥岩におけるトンネルの挙動と地質特性, 土と基礎, 28巻7号, pp. 29-36, 1980.
- 3) 小暮誠, 木村裕俊：超膨張性トンネル掘削完了, トンネルと地下, 第26巻7号, 1995.
- 4) 伊藤昌三, 後藤晴一, 渡部建夫：超膨張性地山におけるNATM, 熊谷組技報, pp. 119-127, 1985.
- 5) 中村良明, 羽田勝, 木曾伸一：超膨張性泥岩を克服, トンネルと地下, pp. 7-14, 1993.
- 6) 若月和人, 桜沢雅志, 瀬賀富幸, 佐藤起一：スキューズイング地山における中央導坑先進工法の効果について, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, III-B101, 2000.
- 7) 谷井敬春, 下田哲史, 高橋浩, 菊地裕一, 釜谷薫幸：日暮山トンネルにおける早期閉合を目的とした導坑先進工法について, 第11回トンネル工学研究論文・報告集, pp. 207-214, 2001.
- 8) 御手洗良夫, 植松澄夫, 西間木朗：大断面トンネルにおける導坑の三次元的地山改良効果の研究, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第5巻, pp. 111-116, 1995.
- 9) 武内淳, 中田雅博, 三谷浩二：TBM導坑先進全断面工法の検討, 日本道路公団試験研究所報告, Vol. 33, pp. 124-131, 1996.
- 10) 林崎信男, 尾辻真紀, 岡田正男, 井上賢一：大断面トンネル掘削工法の比較試験, トンネルと地下, pp. 15-23, 2000.
- 11) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, pp. 36, 1996.
- 12) 和田満補, 箕井伸：イタリア高速鉄道の設計・施工システムの一例, トンネルと地下, pp. 51-62, 2000.
- 13) 岩崎幸雄, 廣田政矢, 高橋浩, 黒川幸彦, 奥田雄大：膨張性地山における円形導坑の有意性について, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, III-B381, 1999.
- 14) 高速道路技術センター：トンネル切羽安定に関する調査研究, pp. 12-16, 1997.
- 15) たとえば, 福島啓一：わかりやすいトンネルの力学, 土木工学社, pp. 54, 1994.

(2002.3.6 受付)

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

Hiroshi TAKAHASHI, Keishun TANII, Katsuhiko IWAI, Hideki KUWABARA,
Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

The advancing drift constructed in squeezing rock is frequently expected to be effective in ground support by stabilizing the face and reducing the earth pressure acting on the support measure when the main tunnel is excavated. This effect is called as "inashi" effect. This study regarded advancing drift as an auxiliary construction method for closing the ground ring early. The advancing drift was installed in five different patterns including a case of no drift, with varying the length, shape of the drift, and support stiffness. The results show that the advancing drift may be used to stabilize the face, reduce displacement, and support the ground. It was confirmed that the advancing drift is effective in reducing the effects mainly by reducing displacement but is not so effective in reducing earth pressure.