

TBM導坑先進全断面掘削工法での導坑効果に関する一考察

STUDY ON THE EFFECT OF PILOT TUNNEL BY TBM

高橋正治* 林崎信男* 三浦正彦** 居相好信*** 対馬祥一***

Shoji TAKAHASHI Nobuo HAYASHIZAKI Masahiko MIURA Yoshinobu IAI and Shoichi TSUSHIMA

In view of the tendency for tunnels to increase in length and cross section area, the needs for efficient new excavation methods combining mechanization and rationalization are much desired.

In response to the needs, a test execution using a 3.5m diameter Tunnel Boring Machine (TBM) for a pilot tunnel was planned in the construction of a Yuda No.2 Tunnel.

We studied the effect of a pilot tunnel by TBM, referring to the results of the measurement data analysis by full face excavation.

Keyword: Tunnel Boring Machine, pilot tunnel by TBM, measurement data analysis

1. はじめに

近年、山岳トンネルの大断面化・長距離化に対応する効率的掘削工法が求められている。その有力工法の一つが、湯田第二トンネルで試験工事として採用されたTBM導坑先進全断面掘削工法（補助ベンチ付き；図-1参照）である。

本工法の特徴は、高速掘進性のあるTBM導坑が先進することにより拡幅掘削に多くの効果をもたらすことに着目したものである。特に、拡幅掘削時の支保構造などに対し、次に示す効果が期待された。

- ①本坑の設計・施工の合理化効果
- ②導坑自体の地山補強効果
- ③不良地山区間の事前補強効果

そこで、本報告は、本坑拡幅時の計測データに基づき、導坑周辺地山・支保工の挙動と事前補強効果を分析し、導坑効果について考察する。

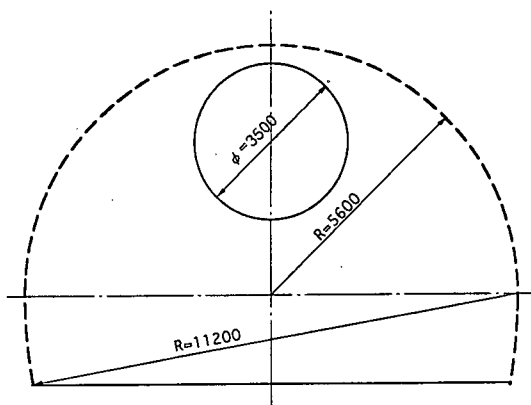


図-1 TBM導坑と本坑

* 日本道路公団北上工事事務所

** 大林・飛鳥建設共同企業体湯田JV工事事務所

*** 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術部

2・1 工事の概要

TBM導坑は、平成5年10月に発進してから約10ヶ月後の平成6年8月末に貫通した。平成6年10月から東西坑口より掘進した本坑拡張掘削は、平成7年12月に貫通した。

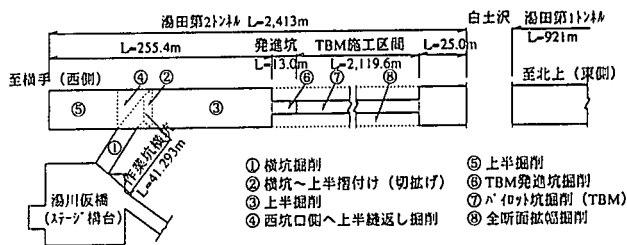


圖-2 施工順序

計測工は、「1. はじめに」で述べた導坑効果を検証するべく実施されるため、本坑拡幅時の導坑周辺地山・本坑周辺地山・各支保工の挙動を把握できるものとする必要があった。そこで、岩種や地山の状態を区分した上で、表-1 および図-3 に示すように計測項目・位置を定めた。特に、表-1 に示す4断面は導坑・本坑で詳細な計測を実施する主計測断面とした。

計測種別	計 測 項 目	①軟質地山		②軟岩地山		③硬岩地山		④軟質地山(STA171+80) ・大石層凝灰岩 ・全体的に変質、粘土化 ・ σ_c :5kgf/cm ² 以下 ・導坑全周セグメント
		導坑	本坑	導坑	本坑	導坑	本坑	
A種計測	切羽・坑内観察調査	○	○	○	○	○	○	
	天端沈下	○	○	○	○	○	○	
	内空変位	○	○	○	○	○	○	
B種計測	坑内地中変位	○	○	○	○	○	○	②軟岩地山 STA160+80:大石層凝灰岩 STA166+40:大石層流紋岩 ・ σ_c :200~300kgf/cm ² ・導坑鋼製支保工+矢板 ③硬岩地山(STA167+80) ・大石層流紋岩 ・節理が発達 ・ σ_c :250~1170kgf/cm ² ・導坑鋼製支保工+矢板
	ロックボルト軸力	○		○	○	○	○	
	鋼製支保工応力		○	○	○	○		
	吹付けコンクリート応力		○		○		○	
	セグメント応力	○						
	坑内地中傾斜計	○		○				
	坑内P波検層	○		○				
	坑内載荷試験			○				
	坑内地中変位(坑外)	○						
	傾斜計(坑外)	○						

注：STA166+40の導坑支保はインバート部セグメント

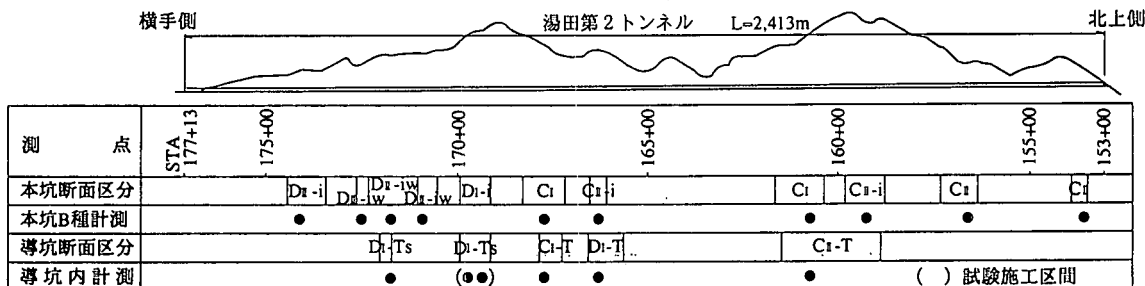


図-3 導坑内計測と本坑B種計測の位置

- 194 -

3. 計測結果の分析

ここでは、計測結果のうち、導坑効果が明確な軟質地山のデータ分析を中心に試験施工区間での事前補強ロックボルトの効果についても併せてまとめる。

軟岩～硬岩地山の場合は導坑周辺地山・本坑周辺地山は安定しているため、変位・応力等の計測値はともに小さく、計測結果から明確な導坑効果は見られなかった。したがって、定性的効果について最後にコメントすることとする。

3・1 軟質地山の計測結果の分析

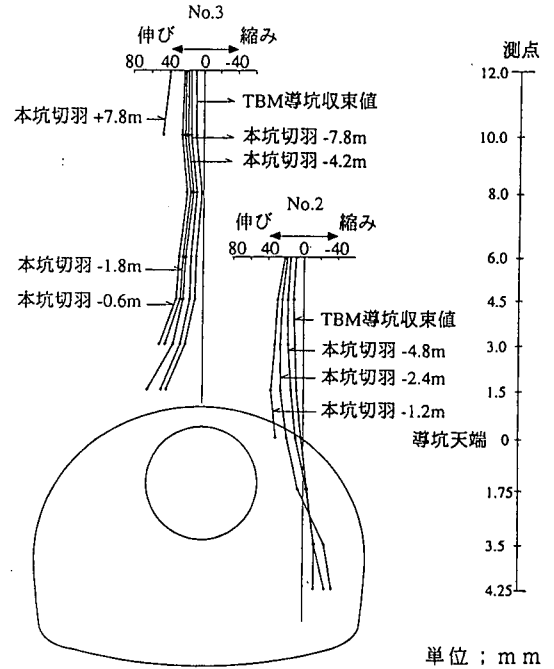
(a) 地表からの坑内地中変位計測

地表からの坑内地中変位計測のTBM導坑施工時収束値と本坑施工時の変位分布（TBM導坑からの累積値）を、図－5に示す。

変位分布から、導坑掘削時の変位形状を維持しながら、本坑が近づくに従いトンネル近傍の測点ほど変位が大きくなっている。

変位の大きい領域がトンネル上方に広く分布しており、本坑天端付近の最終的な変位は相当大きいと考えられる。

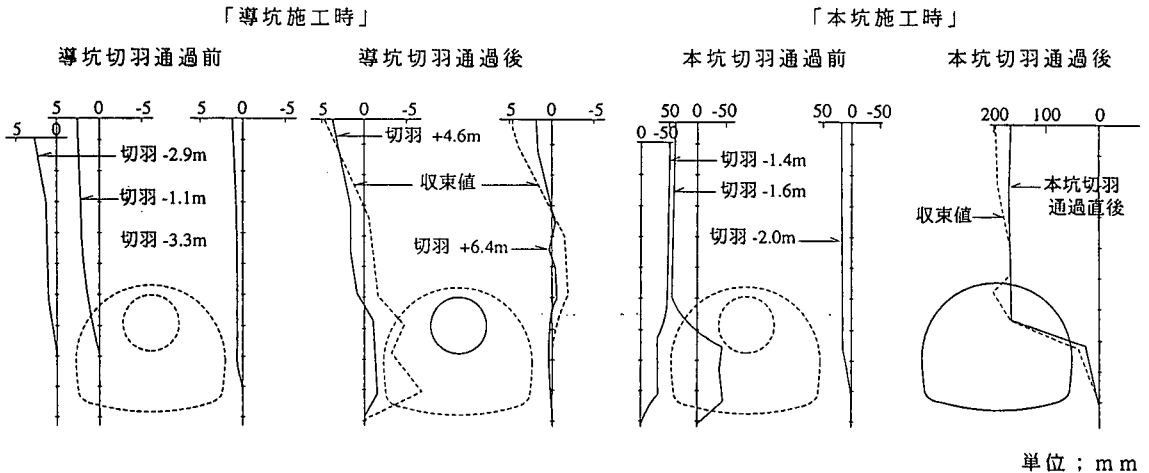
また、導坑側方の変位分布から、導坑SLから下方の測点が浮き上がっており、下端測点の浮き上がり量が本坑切羽が2.4mまで近付いた時点で25mmにも達していることから、本坑掘削による下半盤の浮き上がり量はかなり大きいと考えられる。



図－5 地表からの坑内地中変位分布図

(b) 地表からの傾斜計計測

地表からの傾斜計計測による変位分布のうち、トンネル横断方向について、「導坑施工時」および「本坑施工時」に分けて図－6に示す。



図－6 地表からの傾斜計計測による変位分布（トンネル横断方向）

図中、実線は切羽到達直前の数値を、点線は切羽通過後の収束値を示す。縦軸の目盛りは2mピッチ。

図-6から、導坑切羽通過前は、導坑掘削の影響により導坑右方地山からの力を受けて導坑進行方向左側へ変位している。導坑切羽通過後は、部分的には導坑進行方向右側に変位しているが、全体的には導坑右方地山からの力を受けた変位分布をしている。

一方、本坑施工時は、トンネル掘削による変位が大きく、トンネル内空の縮みの影響を受けた挙動が卓越している。したがって、地山の全体挙動は導坑施工時ほど明確ではないが、トンネル右側からの押し出しが大きいことはわかる。

(c) 導坑内計測

導坑内計測による内空変位・坑内地中変位・傾斜計の測定結果は図-7に示す通りである。図中、内空変位は本坑切羽が2.2mまで近付いた時点での数値である。なお、その時のトンネル軸方向への伸びは、20mm程度を示している。

図-7から、導坑は本坑の接近に伴い、内空を小さくしながら沈下している。その際に、セグメントの変位が示すように大きな土圧が作用している。また、本坑切羽側へ導坑自体が伸びるように挙動している。しかし、この伸びは傾斜計の結果が示すようにセグメントの効果で抑制されている。すなわち、導坑は本坑の接近に伴いある程度変位を許容しながらも本坑切羽面の押し出しを抑えてトンネル切羽面およびその周囲、特に天端付近を安定させている。

セグメントに作用する応力の測定は、セグメントの部分的座屈により明確な数値は示せないが、セグメント周方向にはかなり大きな圧縮応力が作用しているといえる。スキンプレートも内空側にはらんでいことから、全体に大きな力が作用している。また、セグメント間のボルトの軸力が引っ張りを示していることは、導坑がトンネル軸方向に伸びる変位していることと一致している。

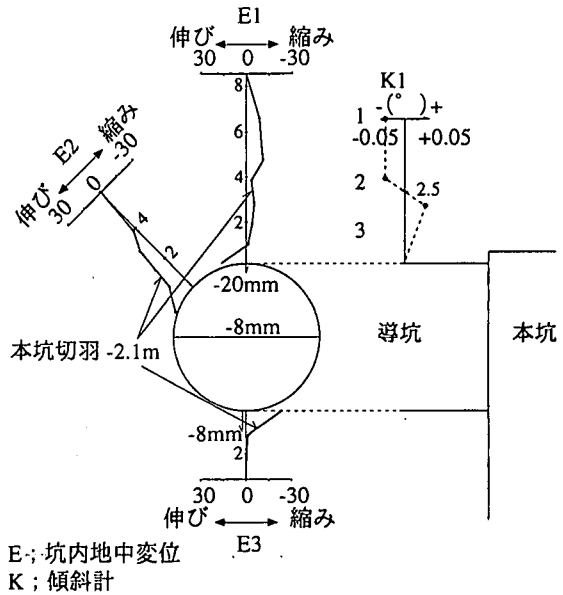


図-7 導坑内計測結果図

(d) 本坑計測

本坑内空変位の収束値と坑内地中変位分布を図-8に、これに基づく逆解析結果から得られた最大せん断ひずみコンターを図-9に示す。

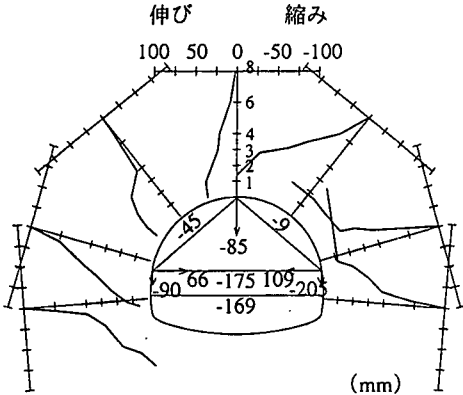


図-8 本坑内空変位と坑内地中変位分布図

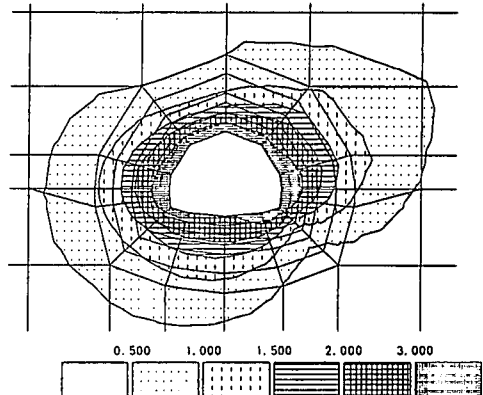


図-9 最大せん断ひずみコンター図

図-8から、内空変位の収束値は、天端・水平測線ともかなり大きな変位を示している。特に、トンネル右側壁の変位が大きく、これは坑内地中変位および地表からの傾斜計計測No.1測線でも示されている。また、初期変位速度が大きく、インバート施工による断面閉合後に安定する。

最大せん断ひずみ分布は、1%以上の最大せん断ひずみの範囲が広範囲にわたっている。坑内地中変位で測定可能な変位は全体変位の4割程度と考えられることから、最大せん断ひずみ1%の領域が、実際には2%以上の可能性がある。一方、一軸圧縮強度試験結果の限界ひずみは2~4%となっている。したがって、本計測断面のトンネル周囲には、かなり大きな破壊領域が存在すると考えられる。

ここには示さないが、ロックボルト軸力・吹付けコンクリート応力・鋼製支保工応力については、計測直後の数値の増加が大きく、インバート施工直後に安定するという傾向がある。これらのことから、インバートが有効に機能しているといえる。

(e) 軟質地山での先行変位に関する分析

地表からの坑内地中変位・傾斜計計測を中心に、導坑内A種・B種計測、本坑A種・B種計測の結果を臭味して、トンネル上方地山の挙動をある程度捉えることが可能になる。

そこで、これらを用いて本坑天端直上地山の変位挙動を推定して経路図としたのが図-10である。

これから、本坑到達時には約53%の変位が完了しており、実際に支保が効果を発揮するまでに時間がかかることを考慮すると、支保施工後の変位は40%程度であると考えられる。

土被りが比較的大きい弾性体内の円形トンネルの谷本²⁾による理論解での先行変位率は約27%である。今回の計測結果との比較から、導坑先進工法は本坑施工時に支保工に作用する荷重をあらかじめ軽減させているといえる。したがって、導坑が無い場合にはさらに規模の大きい支保工が必要になるものと想定される。

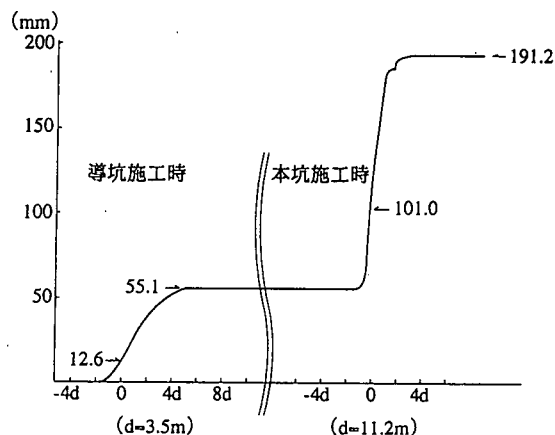


図-10 本坑天端直上地山の変位

また、導坑内からロックボルトを先行して打設可

能であることから、通常よりロックボルトの分担する解放荷重が多くなり、支保効果が増すといえる。

3・2 試験施工区間の計測結果の分析

試験施工区間におけるセグメントの周方向応力・トンネル軸方向応力について、補強ロックボルト（配置図；図-11）の有無により比較したのが図-12である。

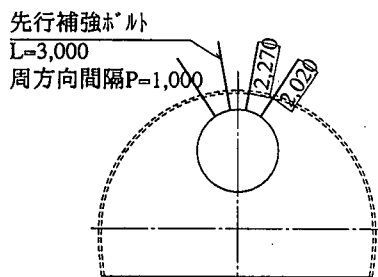


図-11 事前補強ロックボルト配置図

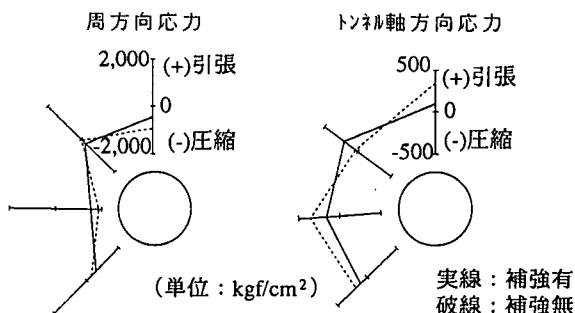


図-12 セグメント応力比較図

セグメント周方向応力は、鉛直方向の応力が卓越して発生しており、補強ロックボルトの有る方が小さい値を示している。周方向応力は本坑切羽の接近とともに急激に高まることから、本坑掘削による天端付近の緩みが本坑切羽の接近により拡大していることを示している。したがって、補強ロックボルトの有る方が天端部の安定が保たれていると考えられる。

セグメントトンネル軸方向応力は、補強ロックボルトの有無にかかわらず引張応力を示していることから、セグメントが本坑切羽方向に引っ張られているといえる。

本坑切羽接近による導坑断面内・軸方向ともに変位は小さく、導坑内空変位からは補強の有無による差は明確ではない。しかし、本坑拡張時の内空変位計測では、本坑切羽の接近によるセグメントに発生する応力が補強した区間の方が小さいこと、および図-10の分析から、ロックボルトの補強効果が示されている。

4. 導坑効果に関する考察

計測結果の分析等により得られた導坑効果に関する知見について以下に示す。

(a) 本坑の設計・施工の合理化効果

- ①導坑施工時の諸情報から設計時の本坑地山区分の精度が上がる。
- ②導坑周りの計測結果の分析から、軟質地山において頂設部導坑+セグメントによる切羽安定化効果が示され、これにより不良地山でも補助ベンチ付き全断面掘削工法が可能になる。
- ③1掘進長が各支保パターン共に通常よりも長くでき、掘進速度が増す。

(b) 導坑自体の地山補強効果

- ①粘土化した脆弱な地山の場合（軟質地山）は、セグメントにより切羽面変位を抑制して本坑天端周辺地山を安定させている。
- ②セグメントに作用する応力が大きく、セグメントが導坑周辺地山の緩みの進展を抑制している。
- ③本坑切羽到達までの変位を全変位の先行変位と考えると、その比率が本計測結果では50%以上と高く、本坑支保に作用する応力を低減させている。

(c) 不良地山区間の事前補強工実施改良効果

- ①セグメントに作用する応力がロックボルト補強有の場合は小さいという結果と、先行変位に関する分析から、ロックボルトによる事前補強効果があるといえる。

(d) 導坑位置による効果

- ①軟質地山では頂設にある導坑が、切羽の押し出しおよび導坑上部地山の変位を抑えることから、切羽特に天端部の安定に効果的である。
- ②頂設に導坑がある場合は、本坑アーチ部への補強工が容易に行える。ただし、導坑掘削による地山の緩みがあるため、軟岩～硬岩地山でも亀裂が発達している場合などは、吹付けコンクリート等による剛な支保により導坑上方地山の緩みを抑える必要がある場合がある。

5. おわりに

本報告は、本坑拡張時の計測データを基に導坑効果について考察したものであり、その結果、導坑効果の一部分については把握できたと考えられる。また、これら以外にも換気・芯抜き等の効果や、導坑時のデータに基づいた精度の高い本坑地山区分等の効果が検証されている。最後に、TBM導坑先進全断面掘削工法が湯田第二トンネルで確立した今、本報告が他のトンネルの役に立てば幸いである。

6. 参考文献

- 1) 磯野龍昭 林崎信男 高野辰雄：TBM導坑先進工法の試験施工，土木工学社，pp. 15～25, 1995. 4
- 2) 谷本親伯：NATM-1，森北出版