

41. 楕円断面TBMの開発

（財）先端建設技術センター： 萩原 哲雄

ハザマ：*芳賀 佳之

佐藤工業(株)： 柳瀬 良輔

1. はじめに

近年、建設労働者の高齢化とこれに伴う熟練工の不足が深刻となりつつある中で、建設工事においては経済性や安定性等を追求してメンテナンスフリー化技術、省エネルギー化技術、無人化・省人化技術の開発が望まれている。一般に、道路・鉄道トンネルをはじめとする山岳トンネルでは、発破による掘削が一般的であり省力化・作業環境の改善の面で遅れている感がある。

山岳トンネルの施工の合理化においては現状の技術レベルではTBMを最大限に活用していくことが解決の近道と考えられるが、現在のTBMの利用は水路や上下水道のような円形断面に限られ、道路や鉄道へのTBMの適用はほとんどなされていない。この理由としては一般に道路・鉄道トンネルでは断面が大きくなることに加え、通常のTBM断面である円形断面で掘削した場合、必要とする形状以上の掘削を生じトンネル形状として経済的でないという点が挙げられる。そこで扁平な形状を必要とするトンネルにおいては、経済的な楕円断面を掘削できるTBMの開発ができれば山岳トンネルの合理化が大きく前進することになる。

本開発は現状のTBM掘削技術の実績に基づき、従来のTBMの構造を大きく変えることなく楕円断面が掘削できる『楕円断面TBM』を開発し、楕円断面掘削機として実用化を図ることを目的としている。この開発は民間の自主共同開発として（財）先端建設技術センターと（株）間組、佐藤工業(株)、前田建設工業(株)、（株）小松製作所の5者により開発を実施しているものである。

2. 工法の概要・特徴

基本的には従来のTBMの機構を変えずに、円形のカットヘッドを傾斜させることにより、楕円断面の掘削を可能にした掘削機械である（図-1、参照）。本工法の特徴を次に述べる。

（1）経済的な必要最小限の断面掘削

楕円断面の掘削を可能とすることで、従来の円形断面TBMに比べ、様々な用途のトンネルで無駄な断面を少なくでき、経済的な掘削が可能である。（図-2、参照）

（2）楕円形状及び傾斜切羽による安定効果

楕円形状の場合、円形と同様に地山内の応力伝達がスムーズとなりトンネルが安定する。また、切羽が傾斜しているため切羽が安定し（核残しと同様の効果）、安全な施工が可能である。また、機械掘削であることから、周辺地山の損傷を小さくでき、高品質のトンネルの構築が可能となる。

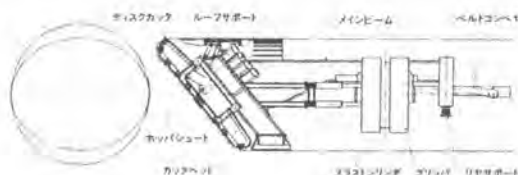


図-1. 楕円断面TBM概念図

(3) ハイスピードのトンネル施工が可能

楕円断面TBMを採用することにより、施工の合理化、機械化、省人化が図れるとともに、従来のTBMと同様の急速施工が可能である。

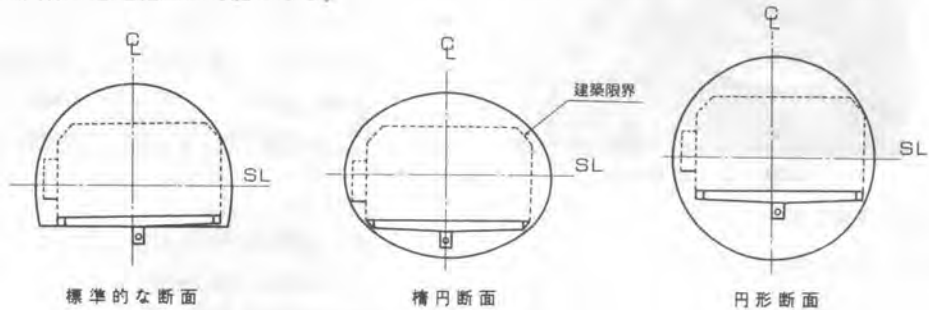


図-2. 2車線道路トンネルにおける内空断面の比較例

3. ミニ楕円断面TBMによる基礎実験

3. 1. 実験の目的

楕円断面TBMの開発に先行して、傾斜カッターヘッドを装着した実験装置を製作し、実験掘削を行うことによって、楕円断面掘削の基本的なデータを収集すると共に、この方式の実用性を見込みについて確認した。

3. 2. 実験の条件

(1) 実験装置(ミニ楕円断面TBM)仕様

- ・カッターヘッド径 2,400mm
- ・掘削径(長径×短径) 2,400mm × 2,150mm(傾斜角30°)
- ・カッターヘッドトルク 12t-m
- ・本体重量 16,000kg(推進ジャッキを除く)

・ディスクカッタ 12" (305mm) × 22個

(2) 供試体(コンクリート模擬岩盤)仕様

- ・粗骨材寸法 最大寸法 40mm
- ・スランプ 12cm~15cm
- ・コンクリート強度 600kg/cm²

3. 3. 計測の内容

(1) 実証項目

- ・掘削性能(推力, トルク, 速度)
- ・操作性, 方向性
- ・岩破碎メカニズム
- ・構造部材の歪, 振動
- ・垂直カッターヘッドとの掘削性能, 操作性などの比較

実験掘削中の状況を写真-2に、掘削中のディスクカッターによる破碎状況を写真-3に、掘削ずりの形状を写真-4に、実験後の掘削坑を写真-5にそれぞれ示す。

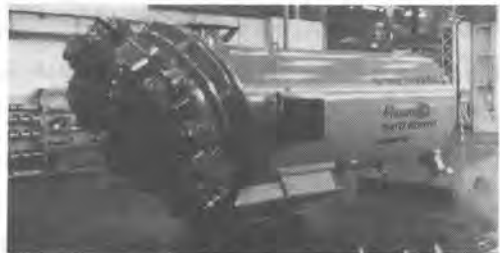


写真-1. 実験機全景

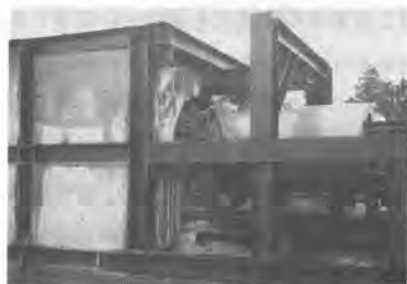


写真-2. 実験装置



写真-3. 破碎状況



写真-4. 掘削ずり

3. 4. 基礎実験結果

楕円断面TBMの掘削に関する基本データをとることを目的として、高強度コンクリート模擬岩盤で実験掘削を行った。また、比較のためにカッタヘッドを付け替え、円形断面も掘削を行った。以下に、この実験で得られた結果を示す。

① 掘削速度とトルクの関係

図-3に掘削速度と掘削トルクとの関係を示した。図中の直線はこれまでの経験式を用いた計算値である。楕円断面掘削の値と円形断面掘削の値には差がみられないが、計算値に対してはやや小さな値になった。

② 掘削速度と推力の関係

掘削速度と掘削推力との関係は、同じ掘削速度に対しては、楕円断面掘削のときの推力のほうが円形断面掘削のときの推力よりも大きくなった。これは掘削推力として推進ジャッキが掘削機を進行方向に押す力とった結果であるが、実際には破碎に寄与している有効推力は、推進ジャッキが掘削機を進行方向に押す力ではなく切羽に垂直方向である。そこで楕円断面掘削の場合には、補正推力として $\cos 30^\circ$ の分力を有効推力として掘削速度と有効掘削推力との関係を図-4. に示した。図中の曲線はこれまでの経験式を用いた計算値である。これより、推力をカッタヘッド回転軸方向にとることによって楕円断面掘削の推力の値と円形断面掘削の推力の値はほぼ一致した。また、実験値と計算値もよく一致した。

なお、ここで用いたデータは、各実験中に記録した全データのうち定常状態で掘削が行えた部分を取り出し、その平均値をとったものである。これは、全実験時間のうちのおよそ70%である。

また、掘削推力ならびに掘削トルクの値については、機械のすべり摩擦力やシールなどの回転抵抗によるロスを差し引いた有効推力および有効トルクの値である。

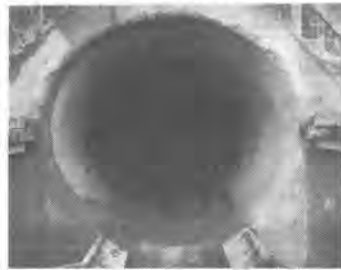


写真-5. 実験掘削坑

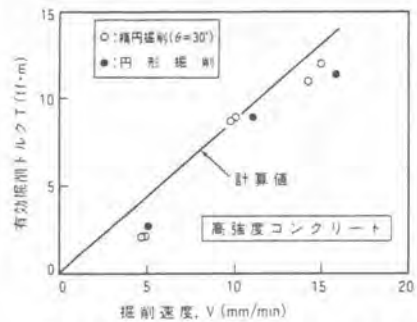


図-3. 掘削速度と掘削トルクの関係

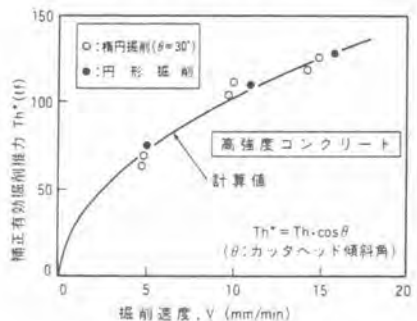
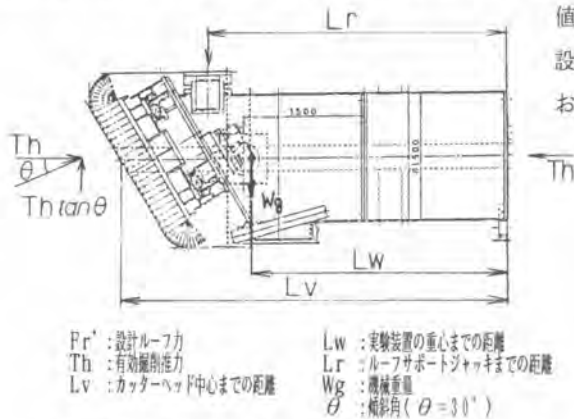


図-4. 掘削速度と掘削推力の関係

③ ルーフサポート力の測定結果

カッターヘッドが傾斜していることによって、楕円断面掘削中のカッターヘッド前面には掘削機を上方にずり上げる方向の力が働く。図-5. は楕円断面掘削中に働く外力を図示したものであり、この外力のつり合い及び外周側カッターによる下向き力を考慮して求めたルーフ力の計算値と測定値を比較したものが図-6. である。測定値は計算値である設計ルーフ力 F_r' に比べるとほぼ同じもしくはやや小さい



値を示した。この結果からルーフサポート力を設定するにあたっては、計算値を基に設定しておけばよいと判断できる。

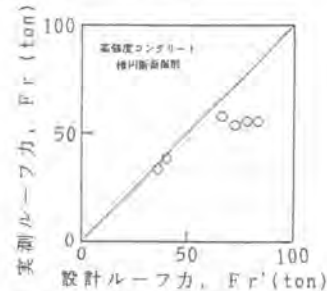


図-5. 楕円断面掘削中に働く外力の関係図

図-6. ルーフサポート力の測定値と計算値の比較

④ 傾斜切羽の岩破碎メカニズムについて

TBMによる岩の破碎は、ディスクカッターリングを切羽に押しつけることによって与えられたエネルギーがリング直下の岩をクラッシングするとともに隣接カッターの軌跡との間の部分がチッピングすることによって起こる。

通常のTBMの場合には、カッター軌跡は前周の軌跡と同一線上を通るが、楕円断面掘削の場合には、カッターヘッド回転軸方向から見て1回転分の推進量だけ平行移動したところを通る。図-7. は切羽のディスクカッターの破碎の模式図であるが、観察の結果では、図のようにクラッシングはカッターリング直下並びにその付近に起きているようである。これより、ディスクカッター軌跡のずれがクラッシングによる破碎に与える影響は余り考える必要はないと考える。

次に、チッピングによる破碎についても、カッターリングの両側で均等に起きているので、カッターヘッドを傾斜してもディスクカッターに働く荷重はディスクカッターに垂直に作用しているといえる。つまり、通常のTBM掘削と同じ破碎メカニズムであると考えることができる。

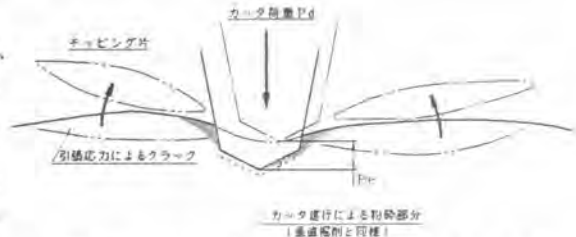


図-7. ディスクカッターによる破碎の模式図

⑤ 結果のまとめ

a. TBMのカッターヘッドを傾斜させることによって、楕円断面の掘削が可能であることが実証された。

また、破碎のメカニズムに関しても通常TBMと同様にカッターの両側でチッピングが起きていたことが観察できた。

- b. 楕円断面の掘削中には、カッタヘッドの傾斜に起因して掘削機に上向きの力が働くが、ルーフサポートジャッキを押しつけることによって掘進線形を水平にコントロールしながら掘削することができた。
- c. カッタヘッドトルクは、楕円断面掘削も円形断面掘削も同等の値であった。
- d. 楕円断面掘削のときの有効掘削推力（坑壁とシューの摩擦力を除いた推力）は、円形断面掘削のときに比べて15%程度のロスが発生する。このロスは、設計時に考えられた推力のカッタヘッド回転軸に垂直方向の分力であることが確認できた。
- e. ルーフサポート力を設定するにあたっては、モーメントの釣り合いによる設計計算式を用いれば安全側に設計できることが立証できた。

4. 楕円断面TBMの適用性

楕円断面TBMの適用性を表-1. に示す。

(1) 2車線, 3車線道路トンネルへの適用

2車線道路トンネル, 3車線道路トンネルにおいて楕円断面TBMを使用して掘削することで、従来円形断面TBMで掘削する場合に比べ、無駄な断面を小さくすることができ、発生ずりも減少する。

(図-8. 参照)

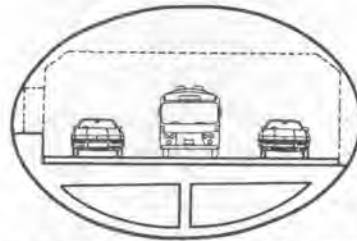


図-8. 3車線道路トンネルへの適用

表-1. 楕円断面TBMの適用性

楕円断面TBMの特徴			適用できるトンネル
楕円形状の 有利性	全断面	経済的な掘削断面にできる	横楕円 道路トンネル, 鉄道トンネル, 地下空洞等多数適用可 縦楕円 2階建てトンネル, 鉄道単線ネル等多数適用可
		地表の占有面積が減少する(縦楕円)	都市部やその近郊のトンネル適用
	導坑	導坑掘削時に広範囲の先受け工可能 底盤幅が広くとれる	大断面トンネル(第2東名, 等)の頂設導坑, 側壁導坑へ適用
施工面の 有利性	切羽が傾斜しているため安定度が増す	地質が悪い地山のトンネルへ適用	
	カッタヘッドが可変であるため先受け工可能	地質が悪い地山のトンネルへ適用	

(2) リニア新幹線への適用

リニア新幹線のトンネル形状は、比較的偏平な断面であるため、楕円断面TBMで掘削した場合に必要な断面を経済的に掘削できる。

(図-9. 参照)

(3) その他のトンネルへの適用

- ・縦楕円トンネル
- ・大断面トンネルの先進導坑

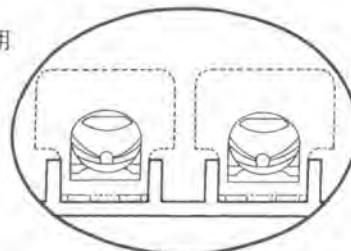


図-9. リニア新幹線への適用

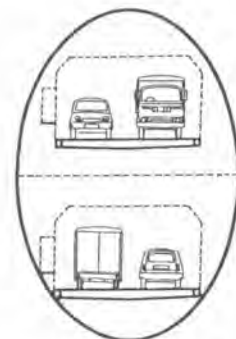


図-10. 縦楕円トンネルへの適用

5. 楕円断面TBMの全体システム

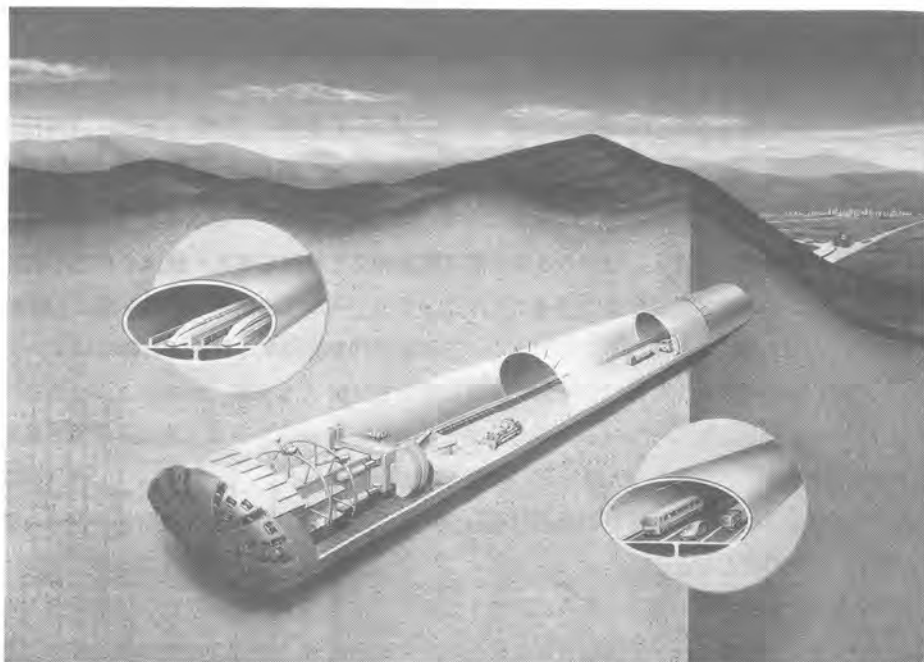


図-11. 楕円断面TBMの全体システム

5. まとめ

日本における最近5年間のTBMの導入件数は、前5年間に比較して1.5倍となっており、施工延長では2倍となっている。このようなことから今後もTBM施工は注目を浴びる工法の思われる。近い将来TBMが国内においても欧米並に道路や鉄道トンネルに全断面掘削として導入されると考えられるが、その導入に際し、経済性、省力化、地質への対応性など多くの問題が指摘される。それらの問題を全て解決できる可能性が高いTBMが楕円断面TBMである。

傾斜角 30° のカッタヘッドを装着したミニ楕円断面TBMにより、コンクリート模擬岩盤を掘削する基礎実験を行った。実験に際し、次の2点が大きい課題となった。

- 1) 傾斜カッタヘッドに水平推力をかけ、通常の掘削効率が得られるか。
- 2) 方向制御に支障きたすような大きな上向き力が発生しないか。

実験結果としては、当初の理論計算で推測した推力損失と上向き力は発生したが、いずれも計算値以下であり、掘削に支障を来すこともなく、通常のTBMと同様の掘削効率を得られることが実証された。また、破碎メカニズムについても通常のTBM掘削と同様の隣接破碎が生ずることを確認できた。

楕円断面TBMの開発はスタートしたばかりであり、本開発の最終目標である $\phi 12\text{m}$ 級の楕円断面TBMの実用化に向けて解決すべき課題は多いと考えられるが、楕円断面TBM開発グループ一丸となってこれを解決していく所存である。