

楕円形 TBM の開発に関する実験的研究

高津 荘太¹・野村 正之²・田中 康弘³・櫻井 孝臣⁴・南 好人⁵・中川 浩二⁶

¹正会員 株式会社間組 土木本部機電部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

²財団法人先端建設技術センター 普及振興部 (〒112-0012 東京都文京区大塚2-15-6)

³正会員 佐藤工業株式会社 土木本部技術部 (〒103-0023 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

⁴正会員 前田建設工業株式会社 土木本部土木設計部 (〒179-0075 東京都練馬区高松5-8)

⁵株式会社小松製作所 地下建機事業本部 TBM 事業部 (〒923-0868 石川県小松市八日市町地方5)

⁶正会員 工博、山口大学 工学部社会建設工学科 (〒755-0031 山口県宇部市常盤台)

本研究で楕円形 TBM とは、従来の円形 TBM の構造を大きく変えることなく、TBM のカッタヘッドを傾斜させる機構により、楕円形断面を掘削するものである。偏平な断面を必要とする様々な用途のトンネルを楕円形 TBM を用いて掘削すれば、無駄な断面を小さくすることができ、発生するずり量も少なくなり、経済的な掘削が期待される。一方、カッタヘッドを傾斜させることにより掘削効率、姿勢制御等、円形 TBM とは異なる問題が考えられる。本研究はこれらの点を実験的に明らかにするために、楕円形 TBM の実験機により実証実験を行い、その実用性を検討した。検討の結果、掘削効率と機体制御、機械的課題に関して実用上円形 TBM とほぼ同等な結果が得られた。

Key Words : oval-section TBM , economical excavation

1. まえがき

日本の山岳トンネル施工においては、TBM (Tunnel Boring Machine) の活用が最近脚光を浴びつつある。我が国において TBM は従来、水路トンネルの掘削工法として多く用いられてきたが、道路、鉄道トンネルへの適用¹⁾ はあまり見られていない。この理由として道路、鉄道トンネルでは断面が大きくなることより生じる TBM 掘削上の問題に加えて、掘削断面が円形であることから必要とする以上の掘削を行うことになり、経済性を含む種々の不合理を生じることが挙げられてきた。

一方、シールドトンネルでは、多連シールドを始め、楕円形や矩形シールド機などの開発²⁾ が見られる。TBM においても掘削断面を楕円形にすることができれば、円形断面と比べて有利な結果を得ることが期待できる。

本研究は現状の TBM 掘削技術の実績に基づき、従来の TBM 構造を大きく変えることなく、カッタヘッドをトンネル軸に対して傾斜させることにより楕円断面が掘削できる「楕円形 TBM」を開発し、その実用性を検証することを目的とする。

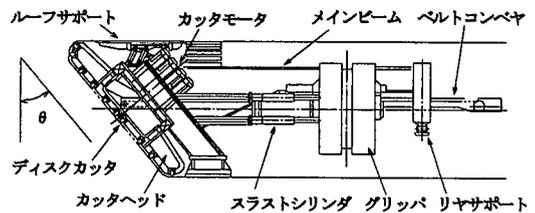


図-1 楕円形 TBM の機構

2. 工法の概要と問題点

(1) 工法の概要

楕円形 TBM は、図-1 に示すように従来の TBM の構造を大きく変えることなく、TBM のカッタヘッドを傾斜させる機構により、楕円断面を掘削するものであり、次のような特徴と問題点がある。

① 円形 TBM が NATM に比べて持つ有利な点、すなわち高速掘進性や支保にプレキャスト部材の利用が容易であること、あるいは掘削断面形状から地山応力の流れがスムーズであること等は円形断面と同様である。

② 偏平な断面を必要とするトンネルを楕円形 TBM

表-1 円形TBMに比較した場合の楕円形TBMの課題

	掘削効率		制御および機械的問題
	① 掘削推力	② 掘削トルク	③ 方向制御性
定義	有効掘削推力 =掘削推力-掘削抵抗力 掘削抵抗力 = (ルーフサポート力+サイドサポート力 +バック力) ×摩擦係数	有効掘削トルク =カッタヘッド駆動トルク -駆動抵抗 駆動抵抗: 無負荷時のカッタヘッドに かかる回転抵抗	上下, 左右の変位量の制御 ピッチング, ローリングの制御
円形TBM	カッタに与える推力の方向と掘削方向がほぼ一致するため, 上向き力による掘削抵抗力は小さい。 掘削推力=Σカッタ荷重 で表現される。	トルク= Σカッタに作用する接線力 ×カッタ取付半径 で表現される。	サイドサポート, トルクシリンダ により制御する。
楕円の課題TBM	掘削軸に対して傾斜させたカッタヘッドは掘削可能か ・楕円形TBMにおける掘削速度と掘削推力, 掘削トルクの関係は円形TBMの場合と同じ関係にあるか。 ・ルーフサポート力による掘削抵抗力は実用的な範囲を超えないか。		上向き力はルーフサポートにより 制御可能か。
実験方法	カッタヘッドの傾斜角 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ について, 掘削速度を段階的に変更し, そのときの掘削推進反力, 掘削トルクを計測し, 比較する。		設計掘削線にTBMを設置し, 掘削距離毎に設計掘削線に対するTBM掘削位置の離れを計測する。
	油圧シリンダの圧力を測定して掘削推力を求める。 掘削抵抗力を測定する。	油圧モータ圧力を測定してトルクを求める。 駆動抵抗力を測定する。	

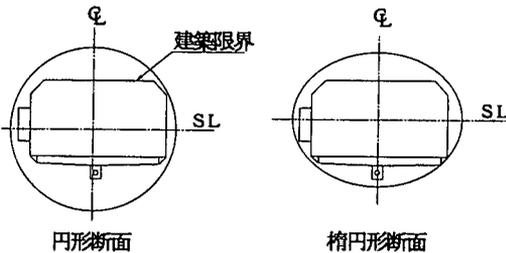


図-2 2車線道路トンネルの内空断面比較例

を用いて掘削することにより, 掘削断面を減少できる。例えば, 図-2に示すように2車線道路トンネルに傾斜角 40° の楕円形TBMを用いれば建築限界を侵すことなく円形断面より掘削土量を約20%削減できる。

③一方, カッタヘッドを傾斜させて掘削するTBMは過去に例はなく, 実際に問題なく掘削できるのか, また, その掘削効率はどうか等の問題がある。

(2) 工法の問題点とその検討

前述のように楕円形TBMの実用化のために解決されねばならない問題がある。この点については, 実験的に検討を行うことが必要であると考え。そこで実際にカッタヘッドを傾斜させたTBMを試作し, 模擬岩盤を掘削することにより, 検証すること

にした。検討すべき主な課題としては, 下記のことと考えられる。

- ①掘削軸に対して傾斜させたカッタヘッドは掘削可能か。
- ②掘削が可能とした場合, その掘削効率は円形断面(垂直切羽)に対してどの程度か。
- ③傾斜したときのルーフサポート力ほどの程度か。ルーフサポート力による坑壁との摩擦抵抗によって掘削抵抗力が実用的な範囲を超えないか。
- ④傾斜させても方向制御は可能か。

本研究では, これらのことについて検討することにした。

円形TBMと楕円形TBMにおいて比較検討すべき具体的項目ならびに実験方法をまとめ表-1に示す。

3. 掘削力とトルクの推定

(1) 掘削力とトルクの理論

傾斜した切羽での岩盤掘削性能の評価において, その考え方を示すため, 実験に先立ち机上検討を行った。まず本節では, カッタ貫入量 P_e とカッタヘッドに作用する力 $F_c(x)$, $F_c(y)$ およびトルク T との関係を検討する。

楕円形TBMにおけるカッタヘッドの移動とカッ

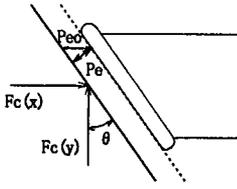


図-3 カッタヘッドの移動とカッタヘッドに作用する力

タヘッドに作用する力を図-3に示す。

まず、カッタ荷重Pdとカッタ貫入量Pe(以下貫入量)との間には、円形TBMの場合と同様の関係が成り立っているものと仮定する。図-4(a)に示すカッタが上下で示す位置にある場合、TBMの掘進に際し、カッタの進行方向はカッタ面とある角度θを有する(図-4(b))。図-4(a)中カッタが左右で示す位置にある場合、TBMの掘進に際し、カッタの進行方向はカッタ面内にある(図-4(c))。

カッタが上下にある場合(図-4(b))、カッタの掘削推力fuはカッタ荷重Pd、カッタと岩盤との摩擦係数μ₀およびカッタヘッドの傾斜角θを用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} f_u &= Pd \cdot \cos \theta + \mu_0 \cdot Pd \cdot \sin \theta \\ &= Pd (\cos \theta + \mu_0 \cdot \sin \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

カッタが左右にある場合(図-4(c))、カッタの掘削推力fsは以下ようになる。

$$f_s = Pd \cdot \cos \theta \quad (2)$$

平均カッタ荷重fは、上下左右のカッタ荷重の平均値から近似的に

$$f = 2 \times (f_u + f_s) / 4 \quad (3)$$

として求めることができる。ここで、カッタ荷重Pdは切羽面に垂直方向のカッタ貫入量Peによって求まる。TBM掘進方向とカッタ貫入方向(切羽面に垂直)がなす角θの場合は式(4)の関係になる。

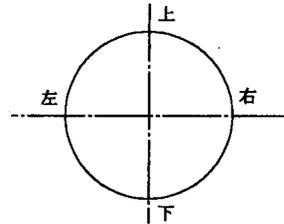
$$Pe = Peo \cdot \cos \theta \quad (4)$$

Peo: トンネル軸方向の掘進量

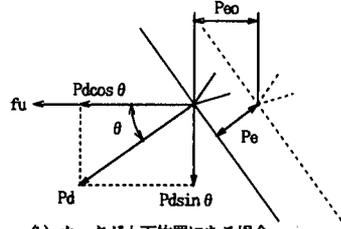
θ: TBM掘進方向とカッタ貫入方向のなす角

(水平掘削円形TBMの場合はPe = Peo)

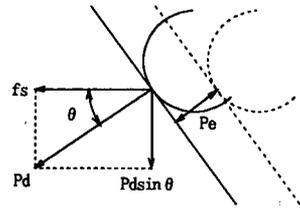
ここでは、傾斜切羽でもカッタ荷重PdとPeとの関係は水平掘削の円形TBMと同様であると仮定する。Rostamiら³⁾によりカッタ荷重Pdとカッタ貫入量Peと



(a) カッタ面におけるカッタ位置



(b) カッタが上下位置にある場合



(c) カッタが左右位置にある場合

図-4 フェースカッタに働く力

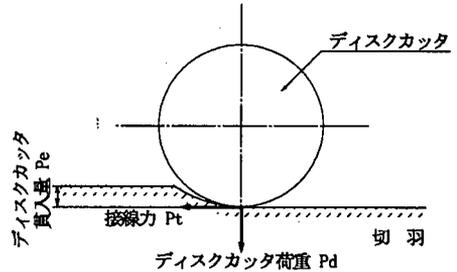


図-5 カッタの掘削状態図

の間には

$$Pd = K1 \cdot \sqrt{Pe} \quad (5)$$

K1: 岩盤強度, カッタサイズ, 刃先幅等による定数

の関係があると示されている。

このことから、カッタヘッドに働く掘削推進反力Fc(x)と上向き力Fc(y)はそれぞれ各カッタに作用する力を総和することによって以下のように求められる。

$$\begin{aligned} F_c(x) &= \sum f \\ &= \sum 1/2 \cdot Pd \times (\cos \theta + \mu_0 \sin \theta + \cos \theta) \\ &= \sum K1 / 2 \times (2 \cos \theta + \mu_0 \sin \theta) \cdot \sqrt{Pe} \end{aligned} \quad (6)$$

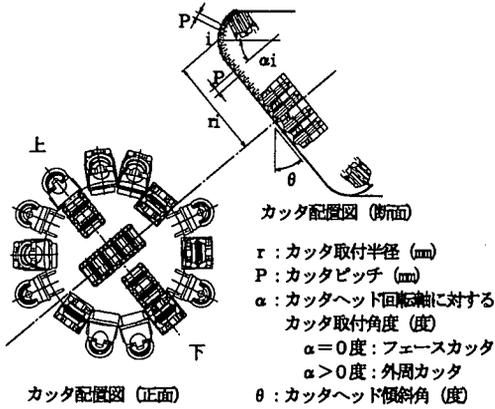


図-6 実験機のカッタ配置

$$F_c(y) = \sum P d \cdot \sin \theta = \sum K_1 \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{P e} \quad (7)$$

ここで総和Σは後に詳述する図-6中カッタ配置図(断面)に見られるようにカッタヘッドの傾斜とカッタ取付位置によって決まる掘削に有効なカッタについての和をとるものとする。

式(6), (7)から掘削推進反力 $F_c(x)$ と上向き力 $F_c(y)$ は基本的に P_e の平方根, 従って掘削速度 v の平方根に比例し, 個々のTBMとその掘削条件により求められる。

次に, カッタ貫入量 P_e とトルク T の関係は次のようになる。

まず, カッタの掘削状態を図示すると図-5となる。図中の P_t は接線力を示している。接線力 P_t とカッタ荷重 P_d との関係を

$$P_t = f_r \cdot P_d \quad (8)$$

としたとき, f_r は転動抵抗係数と呼ばれ前述Rostamiらにより次で表される。

$$f_r = K_2 \cdot \sqrt{P_e} \quad (9)$$

K_2 : カッタサイズによる定数

式(8)に式(5), (9)を代入して

$$P_t = K_1 \cdot K_2 \cdot P_e \quad (10)$$

が得られる。すなわち個々のカッタに作用する接線力 P_t はカッタヘッドの傾斜角 θ にかかわらず, P_e に比例する。トルク T は, これと個々のカッタの取付半径 r の積の和で与えられ

表-2 実験機のカッタ取付位置

カッタNo.	カッタ取付半径 r [mm]	カッタピッチ P [mm]	カッタ傾斜角 α [deg]
1	57.2		0.00
2	139.7	82.5	0.00
3	222.2	82.5	0.00
4	304.7	82.5	0.00
5	387.2	82.5	0.00
6	469.7	82.5	0.00
7	552.2	82.5	0.00
8	634.7	82.5	0.00
9	716.7	82.0	0.00
10	798.7	82.0	0.00
11	880.1	81.4	3.45
12	954.8	75.8	15.88
13	1021.6	71.9	27.68
14	1076.2	65.2	38.37
15	1121.1	61.6	48.47
16	1153.7	54.3	57.37
17	1178.8	52.8	66.03
18	1196.5	52.6	74.63
19	1206.6	53.3	83.37
20	1209.0	42.0	90.25
21	1207.0	35.5	96.07
22	1203.7	24.0	100.00

$$T = \sum r \cdot P_t = \sum r \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot P_e$$

ここで, 式(4)及び $P_{e0} = V/N$ から

$$T = \sum r \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot V/N \cdot \cos \theta \quad (11)$$

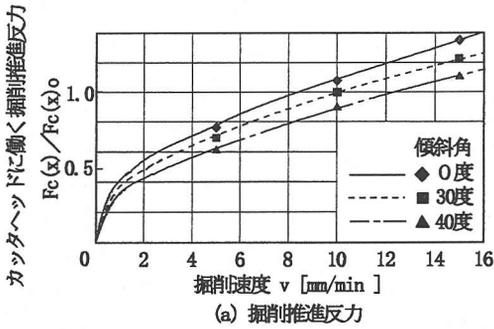
V : 掘削速度(mm/min)

N : 回転数(rpm)

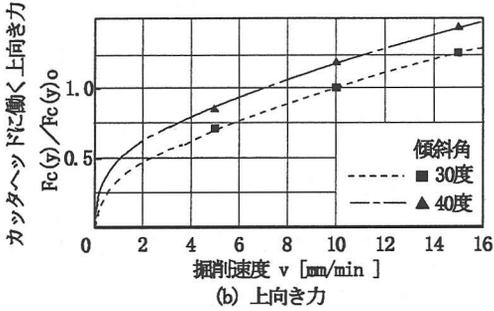
となる。ここでも総和Σは前と同様である。このことから, トルクはカッタ貫入量 P_e , 従って掘削速度 v に比例することが示される。

(2)楕円形TBMにおける掘削推進反力とトルク

式(6), (7), (11)により本実験機で用いたTBMの $F_c(x)$, $F_c(y)$, T の値がカッタヘッドの傾斜角 θ によりどのように変化するかを検討する。図-6および表-2に実験機のカッタ配置および各カッタの取付位置寸法を示す。図-6に示すようにカッタヘッドの傾斜により外周部カッタでは回転にともなう位置の変化により掘削対象岩盤と接触しない状況があることに留意されたい。定数 K_1 , K_2 については必ずしも定説がない。特に傾斜切羽に対してはカッタ面外方向への滑り等の問題も考えられ, 定数 K_1 , K_2 の傾斜角依存性も予想される。しかし, ここでは掘削推進反力とトルクに関する考え方を明確にすることが目的であるため, さしあたり傾斜角に独立なもの



(a) 掘削時推進反力



(b) 上向き力

図-7 掘削速度に対する掘削推進反力と上向き力

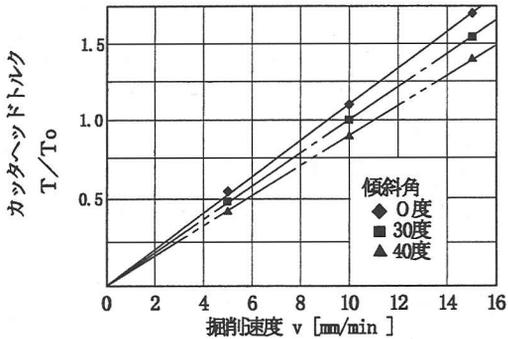


図-8 掘削速度に対するトルク

して取り扱うこととする。

また、本節の目的がカッタヘッドを傾斜させることにより $F_c(x)$, $F_c(y)$, T の値が傾斜角の増加によりどう変化するかを検討することにあることからこれらの値を無次元化して図示する。無次元化の基準値としてカッタヘッドの傾斜角 $\theta = 30^\circ$ 、掘進速度 $v = 10 \text{ mm/min}$ の $F_c(x)$, $F_c(y)$, T の値を $F_c(x)_0$, $F_c(y)_0$, T_0 として、傾斜角 0° , 30° , 40° について図-7、図-8に示す。

図-7(a)は掘削推進反力 $F_c(x)$ と掘削速度 V の関係を示したものである。この図から傾斜角 30° , 40° の場合、 0° に比べて掘削推進反力は同一掘削速度

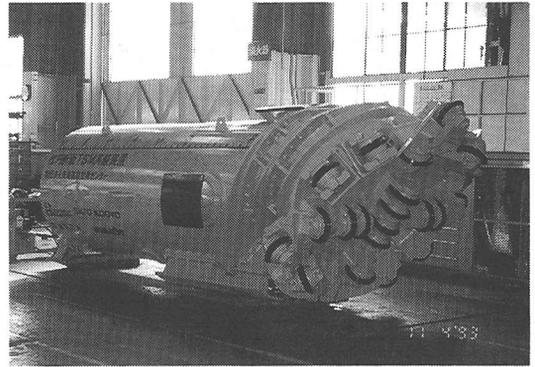


写真-1 楕円形TBM(傾斜角 40°)

表-3 楕円形TBMの仕様

名称	主要諸元		
	傾斜角: 0°	傾斜角: 30°	傾斜角: 40°
①掘削径	2,400mm(円形)	2,400×2,150mm	2,400×1,970mm
②本体重量	15,400kg	13,720kg	15,093kg
③カッタヘッドトルク	12t·m		
④回転数	2.25rpm		
⑤ディスクカッタ	12" (305mm) × 22個		
⑥油圧モータ	1,248kg × 3台		
⑦推進ジャッキ	60t·1,050mm-st × 4本		

に対して若干低下していることが見てとれる。すなわち切羽を傾斜させても従来の円形TBM(垂直切羽)と同等あるいはそれ以下の掘削推力で掘削可能と推定できる。

図-7(b)はカッタヘッドに働く上向き力を同様に求めた結果である。上向き力は傾斜角 0° で0であり、傾斜とともに大きくなり、 30° , 40° の傾斜では若干 40° の方が大きくなる。

ここでは無次元化しているため、その値は明らかでないが仮に $\mu = 0.6$ として式(6), (7)を比較することにより、傾斜角 30° でおよそ掘削推力の1/2程度となることが推定される。これらの上向き力は楕円形TBMのルフサポート力に反映され、傾斜が大きくなる程、ルフサポート力が大きくなることが予想される。

図-8にトルク T の変化を示す。トルクは傾斜角 0° に対して 30° , 40° で若干減少する。すなわち、カッタヘッドを傾斜させると円形TBM(傾斜角 0°) の場合より、同一またはそれ以下のトルクで掘削可能であると推定される。

以上のことからカッタヘッドの 30° あるいは 40° の傾斜に対して以下のことが推定される。

①掘削推進反力、上向き力は掘削速度の平方根に比例し、トルクは掘削速度そのものに比例する。

表-4 コンクリート模擬岩盤の仕様

名称	主要諸元
コンクリートブロック径	
①組骨材寸法	最大寸法 40mm
②コンクリート強度	一軸圧縮強度 $q_u=600\text{kgf/cm}^2$
玉石ブロック	
①玉石寸法	最大寸法 300mm
②玉石強度	一軸圧縮強度 $q_u=1200\text{kgf/cm}^2$
③マトリックスコンクリート強度	一軸圧縮強度 $q_u=600\text{kgf/cm}^2$

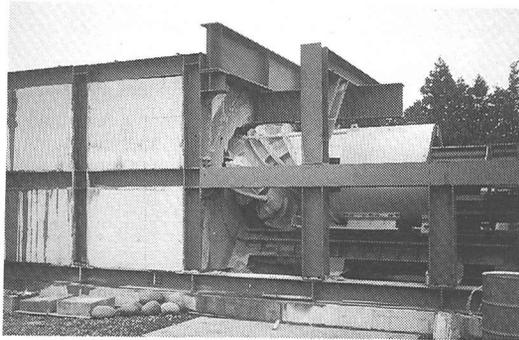


写真-2 供試体と実験状況

- ②同一の掘削速度に対して必要掘削推力ならびにトルクは傾斜角 0° と比較して若干低下するが大差ない。
- ③上向き力は傾斜角 30° の場合で掘削推力の1/2程度が発生する。

4. 実験概要

前項までの理論計算の検証と楕円形TBMの掘削に関する基本データをを得ることを目的として、コンクリート模擬岩盤を対象とした楕円形TBMの実験掘削を行った。

(1) 実験装置の仕様

楕円形TBMおよびその仕様を写真-1、表-3に示す。ここでカッタヘッドの傾斜角により本体重量が異なるのは傾斜角変更のスペーサ(図-10参照)の重量の違いによるためである。また表-4に供試体(掘削対象模擬岩盤)の仕様を、写真-2に供試体と実験状況を示す。

(2) 実験項目

掘削実験は、カッタヘッド傾斜角 0° の円形断面掘削(垂直)とカッタヘッド傾斜角 30° および 40° による楕円形断面掘削を行い、楕円形断面掘削の課題について検証することにした。

表-5 掘削条件

実験	傾斜角 [deg]	模擬岩盤	一軸圧縮強度 [kgf/cm ²]	予定掘削速度 [mm/min]	掘削距離 [mm]	No.
グループI	0	コンクリートブロック	600	5	300	1
				10	300	2
				15	300	3
グループII	30	コンクリートブロック	600	5	300	1
				5	300	2
				10	300	3
				10	300	4
				15	300	5
グループIII	40	コンクリートブロック	600	5	150	1
				5	100	2
				5	100	3
				5	100	4
				10	200	5
				10	200	6
				10	200	7
				10	100	8
				15	150	9
				15	150	10
グループIV	40	玉石コンクリートブロック	1,200 (玉石掘削)	5	100	1
				10	100	2
				15	150	3

実験は4グループに分け、I~IIIグループでは $q_u=600\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートブロックを用い傾斜角 0° (垂直:グループI)、傾斜角 30° (グループII)、傾斜角 40° (グループIII)の掘削実験を行った。またグループIVでは、 $q_u=1,200\text{kgf/cm}^2$ の玉石を埋め込んだコンクリートブロックを傾斜角 40° で掘削し、ディスクカッタによる隣接破砕現象(隣接刃先跡間をクラックが連続する現象)を検証した。実験ケースの一覧を表-5に示す。

カッタヘッドに作用する掘削推進反力、トルク、傾斜切羽掘削時の上向き力を求めるには、実験機に発生する駆動抵抗や掘進抵抗力を明確にする必要がある。そこで、掘削実験の前に無負荷試験を行い、次の項目について検討した。

- ・掘進抵抗力: ルーフサポート, サイドサポート, パーチカルサポート, リアサポート等における摩擦力
- ・駆動抵抗: カッタヘッドに働く無負荷時の駆動抵抗(トルク)

5. 掘削力の解析のための事前実験

(1) 掘進抵抗力

カッタヘッドに働く掘削推進反力 $F_c(x)$ は

$$F_c(x) = Th_1 - Th_0 \quad (12)$$

Th_1 : 掘削推力

Th_0 : 掘進抵抗力

$$Th_0 = \mu \times \Sigma F$$

$$= \mu \times \{ Fr + Fs + (Fvs + Frs) \} \quad (13)$$

Fr: ルーフサポート反力(ルーフサポートシリンダにかかる反力)

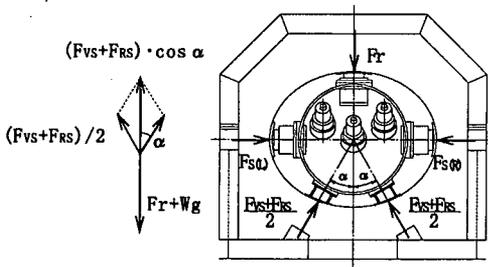


図-9 掘削抵抗の模式図

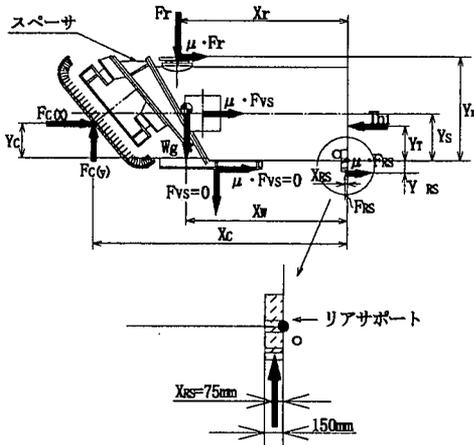


図-10 楕円断面掘削中に働く力の模式図

F_s : サイドサポート反力(サイドサポートシリングにかかる反力)
 F_{vs} : パーチカルサポート反力(パーチカルシュにかかる反力)
 F_{rs} : リアサポート反力(リアサポートにかかる反力)
 μ : 摩擦係数 (図-10参照)

で求められる。

そこで、図-9および図-10に示すルーフサポート、サイドサポート等の各サポートシューとコンクリート坑壁との摩擦により生じる掘進抵抗力を測定する必要があり、各サポートジャッキ力を変化させて掘進抵抗力の測定を行った。

測定は傾斜角 0° (垂直)、 30° 、 40° のそれぞれに対して行った。ここで、ルーフサポート反力およびサイドサポート反力については、各ジャッキにかかる油圧によって測定することができるが、パーチカルサポート、リアサポート反力については直接測定することができない。

そこで、以下のように求めた。

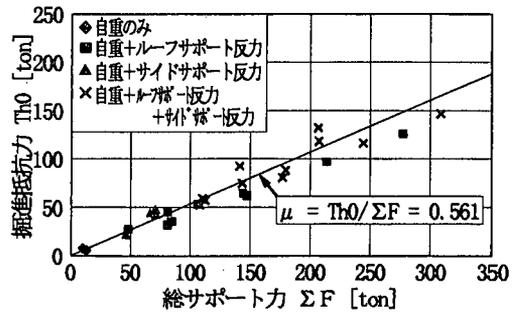


図-11 総サポート力と掘進抵抗の関係

表-6 カッタヘッド駆動抵抗

	単位[t·m]					
	1	2	3	4	5	平均
傾斜角 0°	3.1	3.2	3.3	3.2	3.4	3.2
傾斜角 30°	2.7	4.0	2.7	—	—	3.1
傾斜角 40°	3.1	2.7	3.3	3.2	3.4	3.2
T0の総平均: 3.2[t·m]						

$$F_{vs} + F_{rs} = (Fr + Wg) / \cos \alpha \quad (14)$$

α : 重力方向とパーチカルシュ及びリアサポートがなす角度(本実験機では $\alpha = 30^\circ$)

ここで、 Wg はTBMの重量である。式(14)を式(13)に代入して

$$Th_0 = \mu \times |Fr + F_s + (Fr + Wg) / \cos \alpha| \quad (15)$$

これらの関係を用いて、各実験グループにおける測定値を求め、グループ毎の掘進抵抗力の測定結果を整理すると、図-11に示すものとなる。

この結果、実験装置に作用する総サポート力 ΣF と掘進抵抗力との間に比例関係が見いだされ、比例係数すなわち各実験に対応する摩擦係数 μ は0.561となる。以下の解析にはこの値を使用する。図-11の「自重のみ」とは式(15)において自重 Wg のみが存在する状態(ルーフサポート、サイドサポートの油圧が0)、「自重+ルーフサポート反力」とは、自重とルーフサポート反力が作用する状態(サイドサポートの油圧が0)等を意味する。

(2) カッタヘッド駆動抵抗

実際に掘削に使われたカッタヘッドトルク T (以下、有効掘削トルク)は次で示される。

$$T = T_1 - T_0 \quad (16)$$

T_1 : カッタヘッド駆動トルク

T_0 : カッタヘッド駆動抵抗

表-7 コンクリート模擬岩盤実験掘削結果

実験	No.	掘削速度 [mm/min]	カット回転数 [rpm]	掘削トルク Tl [ton·m]	掘削推力 Thl [ton]	ルーフサポート反力 Fr [ton]	サイドサポート反力 Fs(L) [ton]	サイドサポート反力 Fs(R) [ton]	リアサポート反力 Frs [ton]
グループI 傾斜角 0°	1	5.0	2.20	5.8	119.0	15.9	14.6	14.6	6.7
	2	11.0	2.20	12.0	143.0	12.2	9.0	9.0	4.3
	3	15.8	2.20	14.5	158.0	9.0	9.0	8.7	2.6
グループII 傾斜角 30°	1	4.7	2.20	5.2	110.0	33.8	14.6	14.6	12.8
	2	4.8	2.20	5.2	116.0	38.5	12.0	12.0	14.1
	3	9.7	2.10	11.8	162.0	58.0	7.3	7.3	19.4
	4	10.0	2.10	12.0	170.0	53.7	8.9	8.9	17.6
	5	14.9	2.10	15.1	186.0	55.5	8.3	8.3	17.7
	6	14.2	2.10	14.1	181.0	55.8	10.4	10.4	18.1
グループIII 傾斜角 40°	1	5.5	2.19	7.7	147.0	56.9	29.2	24.8	20.8
	2	4.8	2.21	7.5	153.8	63.2	21.5	22.8	22.6
	3	4.9	2.19	6.3	157.0	66.5	19.6	24.3	23.6
	4	4.8	2.19	6.1	130.2	72.3	0.0	0.0	25.5
	5	9.3	2.18	10.4	184.0	86.6	12.9	19.0	29.6
	6	9.6	2.18	10.3	199.1	92.0	12.4	14.2	30.9
	7	9.6	2.19	10.4	182.2	87.2	13.4	11.3	29.7
	8	10.4	2.18	11.1	181.0	96.0	0.0	0.0	32.3
	9	13.6	2.19	13.9	227.5	89.1	31.9	22.3	29.6
	10	12.7	2.21	14.2	224.1	90.9	20.5	21.4	30.1

そこで、カットヘッド駆動抵抗はカットヘッドを切羽に押し付けずに定格回転（カットヘッド回転速度 N=2.25rpm）させたときのカットヘッド駆動トルクとし、傾斜角0°（垂直）、30°、40°のそれぞれの実験掘削装置に対して測定を行った。

掘削中には、カットヘッド前面に掘削ずりが堆積し、これによるカットヘッド駆動抵抗の増加を考慮する必要がある。したがって、測定は実験掘削終了直前にずりの排出を止め、実験掘削終了後カットヘッド前面にずりが残った状態でを行った。

測定結果を表-6に示す。

これより、カットヘッド駆動抵抗T0を、3.2[t·m]とする。

6. 楕円形 TBMにおける力のバランスと 上向き力

楕円形 TBMでは、切羽が傾斜しているためにカットヘッドに作用する上向き力によるルーフサポート反力とそれによる掘進抵抗の増大が実用的な範囲にあるかどうか課題の一つであることは先に述べた。ここでは、楕円形 TBMにおける掘削時の力のバランスとカットヘッドに作用する上向き力およびそれによるルーフサポート反力の関係について解析を行う。

図-10において、Fr、FsおよびThlは実験中に測定することができ、Wgは既知、また摩擦係数μは前述の項で求めている。さらに、掘削中には機体が浮き上がった状態なので、バーチカルサポート反力は、

作用していない。

上記の測定値からカットヘッドに働く掘削推進反力Fc(x)、上向き力Fc(y)およびこれら力の関係の解析に必要なリアサポート力Frsを以下のように求める。図-10のXおよびYは、それぞれ点Oからのxおよびy方向の距離を表している。

図-10より、xおよびy方向における力のつり合いは、それぞれ以下ようになる。

$$Fc(x) + \mu \cdot (Fr + Fs + Frs) - Thl = 0 \quad (17)$$

$$-Fc(y) + Fr + Wg - Frs = 0 \quad (18)$$

また、点Oに関するモーメントのつり合いより次式が得られる。

$$Fc(x) \cdot Yc + Fc(y) \cdot Xc - Fr \cdot Xr - Wg \cdot Xw - Thl \cdot Yt + Frs \cdot Xrs + \mu \cdot (Fr \cdot Yr + Fs \cdot Ys - Frs \cdot Yrs) = 0 \quad (19)$$

したがって、式(17)、(18)および(19)より、Fc(x)、Fc(y)およびFrsは

$$Fc(x) = Thl - \mu \cdot (2Fr + Fs + Fr + Wg + A) \quad (20)$$

$$Fc(y) = A \quad (21)$$

$$Frs = Fr + Wg - A \quad (22)$$

となる。ただし、A=B/Cとし、B、Cは次で与えられる。

$$B = Thl \cdot (Yt - Yc) + \mu \cdot |Yc \cdot (2Fr + Fs + Wg) - Fr \cdot Yr$$

表-8 実験掘削における掘削推進反力と有効掘削トルク

実験	No.	掘削速度 v [mm/min]	掘削推進反力 Fc(x) [ton]	有効掘削トルク T [t·m]
グループI (傾斜角 0°)	1	5.0	90.0	2.6
	2	11.0	123.7	8.8
	3	15.8	141.5	11.3
グループII (傾斜角30°)	1	4.7	67.5	2.0
	2	4.8	73.0	2.0
	3	9.7	110.4	8.6
	4	10.0	120.0	8.8
	5	14.9	135.6	11.9
	6	14.2	127.9	10.9
グループIII (傾斜角40°)	1	5.5	73.1	4.5
	2	4.8	80.8	4.4
	3	4.9	81.8	3.1
	4	4.8	75.3	2.9
	5	9.3	100.9	7.2
	6	9.6	115.2	7.1
	7	9.6	102.7	7.2
	8	10.4	109.0	7.9
	9	13.6	130.5	10.7
	10	12.7	132.7	11.0

$$-Fs \cdot Ys + (Fr + Wg) \cdot YRs - XRs \cdot (Fr + Wg) + Fr \cdot Xr + Wg \cdot Xw \quad (23)$$

$$C = Xc - XRs + \mu (Yc + YRs) \quad (24)$$

以上によって、前記測定結果からカッタヘッドに働く掘削推進反力Fc(x)、上向き力Fc(y)およびリヤサポート力FRsを求めることができる。

7. コンクリート模擬岩盤実験掘削結果

表-7に各グループの掘削実験で得られた結果を合わせて示す。表中の各値は各実験掘削中に記録した全データの平均値を示している。また、楕円断面掘削中のバランス状態ではバーチカルサポートは浮上がり、荷重はかからないと考えられる。実験中の観察でも、バーチカルサポートの下面にはすきまができており、このことが裏付けられた（したがって、バーチカルサポート反力Fvs = 0。ただし、傾斜角0°すなわち、グループIの実験ではカッタヘッドに上向き力が作用しないためルーフサポート力と実験機自重を加えたものによりバーチカルサポート反力が作用する）。リヤサポート力FRsは実測できないため、式(17)～(24)から求めた。

(1) 掘削推力

実験値である掘削推力Th1には、前述の掘進抵抗が含まれている。カッタヘッドに働く掘削推進反力Fc(x) (=有効掘削推力)は、式(12)で、掘進抵抗Th0は、式(13)で求めることができる。

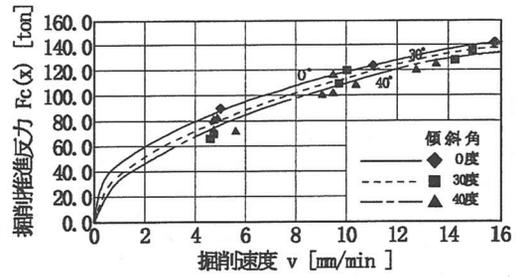


図-12 掘削速度と掘削推進反力の関係(実験値)

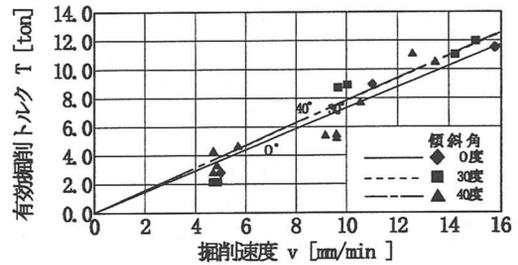


図-13 掘削速度と有効掘削トルクの関係(実験値)

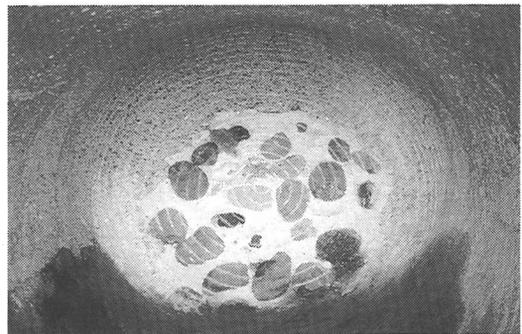


写真-3 玉石ブロック切削状況

ここで、図-11で求めた摩擦係数とリアサポートの反力と実験値を上式に代入することで掘削推進反力は表-8に示すように求めることができる。

図-12に傾斜角0°、30°、40°の実験結果から掘削速度と掘削推進反力との関係を示した。図中の曲線は $Fc(x) \propto \sqrt{v}$ を基に実験値の回帰曲線を示したものである。

実験結果の掘削推進反力は、多少のばらつきはあるものの図-7(a)で示したように掘削速度の平方根に比例すると示すことができる。また、傾斜角を大きくした場合、同一掘削速度(トンネル方向)に対する掘削推進反力は減少する傾向が見られるもののほぼ同程度となった。

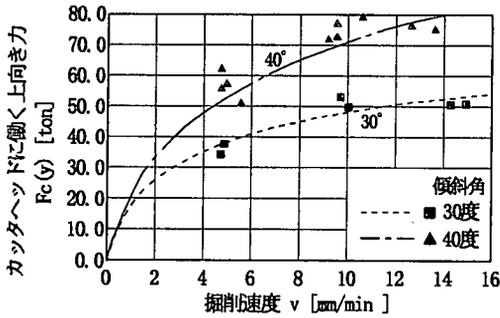


図-14 掘削速度とカッタヘッド上向き力の関係(実験値)

表-9 実験掘削におけるカッタヘッド上向き力

実験	No.	掘削速度 v [mm/min]	カッタヘッド上向き力 Fc(y) [t·m]
グループII (傾斜角30°)	1	4.7	34.8
	2	4.8	38.1
	3	9.7	52.4
	4	10.0	49.8
	5	14.9	51.5
	6	14.2	51.4
グループIII (傾斜角40°)	1	5.5	51.2
	2	4.8	55.7
	3	4.9	58.0
	4	4.8	61.9
	5	9.3	72.1
	6	9.6	76.2
	7	9.6	72.6
	8	10.4	78.8
	9	13.6	74.6
	10	12.7	75.9

このことは式(6)におけるK1が仮定と異なり、若干なりとも傾斜角に依存する可能性を示唆するものである。

(2) 掘削トルク

実験値である掘削トルクT1には、前述のカッタヘッド駆動抵抗が含まれている。掘削に使われた有効掘削トルクTは式(15)で求めることができる。ここで前述のように、カッタヘッド駆動抵抗 $T_0 = 3.2$ [t·m]である。

以上の考えにしたがって求めた各実験における有効掘削トルクを表-8の右欄に示す。

図-13に傾斜角0°、30°、40°の各実験結果から掘削速度と有効掘削トルクとの関係を示した。

図-13中の直線は、各々の傾斜角における式(11)の関係、すなわち、 $T \propto v$ を基に実験値の回帰直線を求めたものである。

図-13に示す実験結果から求めた有効掘削トルク

は、実験上のばらつきはあるものの、図-8の推定計算の傾向とほぼ同様に有効掘削トルクは掘削速度に比例関係にあるとして良い。

また、傾斜角を大きくした場合、同一の掘削速度(トンネル方向)に対してほとんど変化せず、同程度となった。これは先の掘削推進反力と同様に式(11)におけるK1、K2が傾斜角に依存する可能性を示唆するものである。

(3) 掘削効率のまとめ

掘削推進反力 $F_c(x)$ (=有効掘削推力)、有効掘削トルクとも傾斜角を大きくしても掘削速度に対する関係は円形TBMの場合と同じく速度の平方根 \sqrt{v} 及び速度 v に比例するとして良いことが示された。また、それらの大きさは傾斜角の増大に対して同一掘削速度(トンネル方向)では大きくは変化せず、トンネル掘進の立場からの掘削効率は円形の場合と同程度と考えることができた。しかし、このことは傾斜角の増大により同一掘削速度に対して $F_c(x)$ 、 T は若干減少するとした式(6)、(11)の仮定、従って図-7(a)、図-8の結果と厳密には一致していない。従って、実用的には先の仮定で問題ないものの、今後、定数K1、K2の傾斜角依存性に関する検討が望まれる。

また、写真-3に示す玉石ブロックの切削状況から判断して楕円形TBMにおいても円形TBMと同様隣接カッタ刃先跡間をクラックが連続する隣接破壊現象が見られた。

以上のことから、楕円形TBMの掘削推力やトルクを考える場合、同径の円形TBMと同様に考えても差し支えないことが実証された。

(4) カッタヘッド上向き力とルーフサポート力

楕円形TBMにおける傾斜切羽掘削によるカッタヘッド上向き力の推定計算結果を図-7(b)に示した。また、実験掘削からの各測定値を式(21)~(24)に代入することで求めた各掘削速度に対するカッタヘッド上向き力を表-9および図-14に示す。また、図-14中の曲線は、図-7(b)式の関係、すなわち $F_c(y) \propto \sqrt{P_e}$ を基に回帰曲線を求めたものである。各掘削実験で測定したルーフサポート力は表-7に示してある。ただし、ここでは理論上、上向き力0である傾斜角0°については省いている。

ここで式(6)と式(7)から掘削推進反力と上向き力の比を求めると

$$\frac{F_c(y)}{F_c(x)} = \frac{\sum K_1 \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{P_e}}{\sum K_1 (\cos \theta + 1/2 \mu_0 \cdot \sin \theta) \cdot \sqrt{P_e}}$$

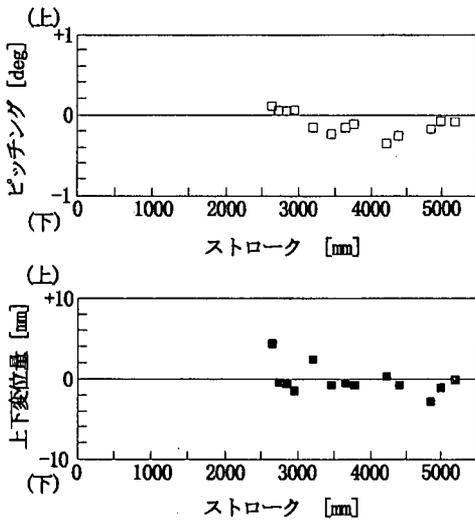


図-15 ピッチングおよび上下変位量の測定結果
(傾斜角40°)

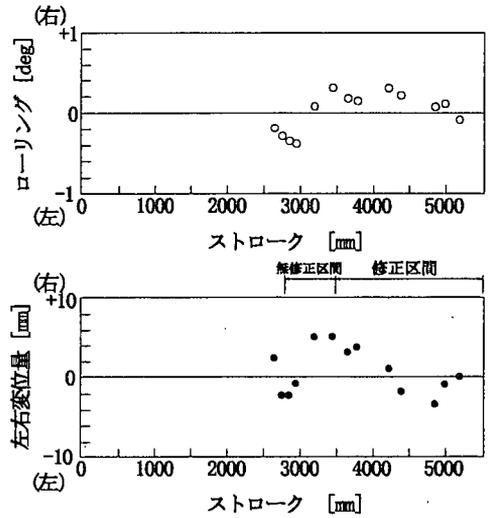


図-16 ローリングおよび左右変位量の測定結果
(傾斜角40°)

$$= \frac{\sin \theta}{(\cos \theta + 1/2 \mu_0 \cdot \sin \theta)} \quad (25)$$

となり、
ここで

$\mu_0 = 0.6$ とくと

$\theta = 30^\circ$ のとき 0.49

$\theta = 40^\circ$ のとき 0.67

となる。

図-14の傾斜角30°，掘削速度10mm/minにおける上向き力はおよそ50ton程度であり，同条件における有効掘削推力(=掘削推進反力)は図-12より，およそ110tonである。上向き力是有効掘削推力の約1/2となり，式(25)から得られた $\theta = 30^\circ$ のときの比と一致している。また，傾斜角40°の場合も同様に掘削速度10mm/minにおける上向き力75tは有効掘削推力110tの約2/3となり，前述と同様のことがいえる。

従って，上向き力による掘進抵抗は摩擦力を考慮すると有効掘削推力の1/3程度になる。このことは掘削推力に必要な動力が1/3程度増加することを意味する。しかし，推進動力はTBMの回転動力と比較すると数%であり，TBM全体の掘削動力から考えるとその増加する推進動力はわずかであり，上向き力による掘進抵抗は実用上の問題とはならない。

8. 方向制御に関する実験結果とその考察

楕円断面掘削時は，前述のようにカッタヘッドには上向きの力がかかる。この上向き力に対応するためにルフサポートジャッキによってカッタヘッドを下向きに押さえつけることになる。これに関係する方向制御に関してカッタ傾斜角40°の場合のピッチング角度，ターゲットの上下変位量を計測した。なお，ストローク量の0点はスラストシリンダの掘削開始位置を示しており，方向制御測定は2500mmから開始してる。

図-15は傾斜角40°で修正をかけつつ掘削した場合のピッチング及び上下変位量の変化を記録したものである。

ピッチング量の制御結果は $\pm 0.4^\circ$ の範囲であった。これは通常TBMが $\pm 0.5^\circ$ を基準値としていることと比較してそれ以上の制御が可能であることを示している。

また，上下変位量の制御結果は掘削距離2.5mであるが ± 4 mmの範囲であった。図からみられるように実際の掘削がこの程度の範囲で可能であることが見てとれピッチング制御は実用上十分可能であるといえる。

TBMはトルク反力によってローリングが生じ，対象岩盤のアンバランス等によって左右変位が生じる。これらに関係する方向制御に関してカッタ傾斜角40°の場合のローリング角度，ターゲットの左右変位量計測した。

図-16 は傾斜角 40° で掘削した場合のローリング角度および左右変位量の変化を記録したものである。ローリング量の結果は $\pm 0.5^\circ$ 以内であり、通常の円形TBMの制御範囲 $\pm 1.0^\circ$ と比較して同等以上の制御が可能であることを示している。

また、左右変位量に関しては人為的に制御可能かどうかを試験している。ストローク長2700~3500mm間を無修正区間とし、意図的に左右の制御を行わず掘削した。その結果、左右変位量はストローク長3300mm地点で右方向に5mm生じた。その変位をストローク長3500mmから制御を開始し、ストローク長5100mmで設計ラインにすりつけることに成功した。この結果から通常TBMと同様の制御が可能であることが確認できた。

以上の結果から、ピッチング、ローリング、上下、左右の変位の方向制御要素について通常の円形TBMと同程度以上の制御が可能であることが実証できた。

従って、カッターヘッドを傾斜させても、従来の円形TBMと同様の制御で十分方向制御が可能であるといえる。

9. まとめ

楕円形TBMの開発に当たり、当初懸念された課題

- ・掘削効率
- ・制御および機械的課題

について各項で得られた結果を箇条書きにすると以下ようになる。

①傾斜切羽においても垂直切羽の場合と同様に有効掘削推力は掘削速度の平方根に比例する。

また、本実験の範囲の傾斜切羽において同一の掘削速度では同程度の有効掘削推力となる。このことは傾斜角の増加に伴い掘削面積が減少することを考慮すると掘削効率の低下を意味するが、トンネル掘進長あたりの効率からすれば同等ということになる。

②有効掘削トルクは傾斜切羽においても垂直切羽の場合と同様、掘削速度に比例する。

また、本実験の範囲で同一の掘削速度(トンネル方向)に対して有効掘削トルクは切羽の傾斜角にかかわらず、同程度のものが必要となる。このことは有効掘削推力の場合と同様、掘削面積すれば掘削効率の低下を意味するが、トンネル掘進長あたりの効率からすれば同等ということになる。

③ルーフサポートに働く上向き力は、掘削速度の平方根に比例する。

上向き力による掘進抵抗力は有効掘削推力

の1/3程度なり、円形TBMに比較して掘進動力をその分大きくする必要がある。しかし、掘進動力は回転動力に比較して小さく、掘進動力の増加はTBM全体の掘削動力から考えるとわずかであり、構造面やコスト面では円形も楕円形TBMはほとんど差はなく、実用上の問題とならない。

④ローリング、ピッチング、上下左右等の方向制御は従来のTBMと同様に制御可能である。

以上のように、楕円形TBMと円形TBMを比較して実験を行った。傾斜させたカッターヘッドにトンネル方向の掘削推力を与えれば、上向き力は発生する。しかし、その上向き力をルーフサポートによって方向制御すれば、通常のTBMと同様の掘削メカニズムで掘削可能であることが実証された。

このことにより、従来の円形TBMの基本的機構を大きく変ることなく、同様の掘削ができ、カッターヘッドの傾斜角を変更するだけで掘削形状の選択が可能になった。つまり、円形掘削だけと考えられていたTBMが掘削形状を選択できることになり、TBMの活用範囲が大幅に拡大する可能性を意味している。

楕円形TBMを実用化するためにはズリ排出の方法等いくつかの課題は残されているが、本実験の結果から k_1 , k_2 の傾斜角依存性の問題点は残されたものの、掘削効率と方向制御性という二つの基本的項目が解決されたことにより、実用化への大きな課題は解決されたものと考えられる。

なお、本楕円形TBMの開発は先端建設技術センター、(株)間組、佐藤工業(株)、前田建設工業(株)、(株)コマツの共同開発であり、関係各位のご協力に感謝を表するとともに西松裕一(東京大学名誉教授)をはじめとする技術委員会の委員各位にも深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財)先端建設技術センター：超大断面トンネルの機械化施工に関する調査検討，pp12-17，1994.3.
- 2) 松本嘉司：最新シールドトンネル，日経BP社，pp109-129，1994.9.
- 3) Rostami, J & Ozdemir, L : A NEW MODEL FOR PERFORMANCE PREDICTION OF HARD ROCK TBMS. PROCEEDINGS/1993 RAPID EXCAVATION AND TUNNELING CONFERENCE Chap. 50.

(1998.10.5受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF OVAL SECTION TBM

Sohta TAKATSU, Masayuki NOMURA, Yasuhiro TANAKA, Takatomi SAKURAI,
Yoshihito MINAMI and Koji NAKAGAWA

An Oval Section TBM (tunnel boring machine) enables excavation of tunnel with elliptical cross section by inclining the cutterhead. It is developed to utilize the proven conventional TBM technology with minimum modifications.

An inclined cutterhead may create a number of new problems, such as inexcavation efficiency and steering, that are unknown in excavation works using a circular TBM. This paper reports on verification tests carried out to examine the extent of such problems using experimental models of the machine in an attempt to confirm the feasibility of the Oval Section TBM.