

34. DPLEX-TBM (偏心多軸岩盤掘削機の開発)

大豊建設(株)：金井 和彦, *長谷川 春生
 三菱重工業(株)：石瀬 文彦

1. はじめに

近年、TBM 技術の進歩は目覚ましいものがあり、急速施工化、大断面トンネルの施工が増大している。今後は、さらに大断面化が進むと共に、任意断面形状の全断面掘削が求められるものと思われる。

任意断面形状を掘削可能なシールドとして、偏心多軸(DPLEX)シールドがある。この掘削機構をTBMに適用し、任意断面を掘削可能な岩盤対応 TBM (DPLEX-TBM) を開発することを目的とし、掘削実験を行った。その実験概要、及び結果について報告する。

2. 実験機の概要

(1) 偏心多軸機構による掘削

偏心多軸(DPLEX)シールドは、図-1に示すように、複数の回転軸に偏心してカッタ軸支持しているため、回転軸を回転させるとカッタヘッドが平行リンク運動(DPLEX 運動)を行って地山を掘削する。従って、カッタヘッドの形状とほぼ相似形の、任意の断面形状のトンネルを構築できる。DPLEX シールドでは、クロススルービットを用いているが、このビットの軌跡は、図-2に示す通りである。ビットのX軸、Y軸を保持したまま回転が行われている。また、カッタヘッドに取り付けたクロススルービットの軌跡は、すべてのビットで同一形状である。

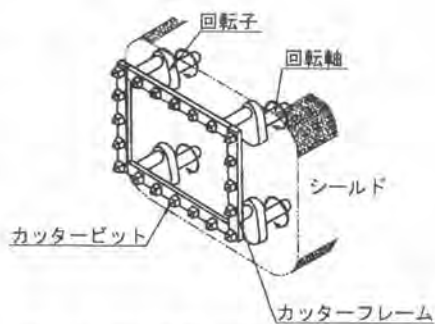


図-1 偏心多軸 (DPLEX) 掘削機

(2) 偏心多軸機構をTBMに適用するにあたっての課題

TBM には、一般に、硬岩を掘削することを目的としてローラカッタが使用されている。

このカッタを装備したDPLEXマシンを考えた場合、カッタヘッドの回転角によっては、ローラカッタが回転せずに引きずってしまう。そこで、ローラカッタを回転可能な盤上に取り付けることで、この問題を解決することができる。

しかし、その結果として、ローラカッタの間隔は大きくなる。このときのカッタの軌跡を図-3

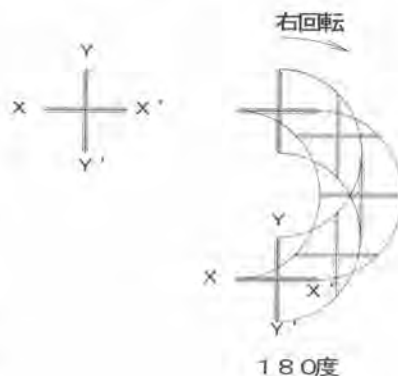


図-2 カッタ切削軌

に示す。図の実線の円が各々のカッタの軌跡であり、点線の円がカッタを取り付けた回転盤である。各々のカッタ軌跡の円は、クランクの偏心量と等しい径であり、そのピッチは、カッタの配置ピッチと等しくなる。従って、このままではローラカッタによる掘削に必要なピッチを得ることが難しい。

また、カッタヘッドが平行リンク運動を行うため、従来のTBMに用いられているような掘削ズリの取り込み方式をとることができない。同様に、外周部の掘削用カッタも、従来のTBMと同じ考え方はできない。

以上をまとめると、次のような課題がある。

- ① カッタの追従性の確保
- ② カッタの掘削ピッチの確保
- ③ 掘削ズリの排出方法
- ④ 外周部掘削機構

(3) 対策

今回の実験では、①及び②について検討した。上記の課題に対する対策として、今回の実験機に採用したものを以下に述べる。

1) 自由旋回型ローラカッタの使用

実験機に使用したローラカッタを図-4に示す。ローラカッタは、Z軸まわりに回転自由な構造とした。平行リンク運動に対して全方向への追従を可能とする方法としては、機械的に制御する方法と、カッタを後方に偏心させることで、全方向への追従を可能とする方法が考えられる。構造を簡便にするために、実験機には、後者の方法を採用した。

2) 水平垂直方向にスライドできる機構を付加

②の課題の対策としては、以下に示す方法が考えられる

- ①DPLEX 運動に DPLEX 運動を加える
- ②DPLEX 運動にスライド運動を加える
- ③ピッチを確保できる多段ビットを用いる

実験機には、制御が簡単で外周部の余掘りが少ない②

の方法を採用した。今回の実験機のスライド機構として、水平垂直方向にジャッキによりスライドできる機構を付加し、そのスライド運動は、矩形状となるように設定した。

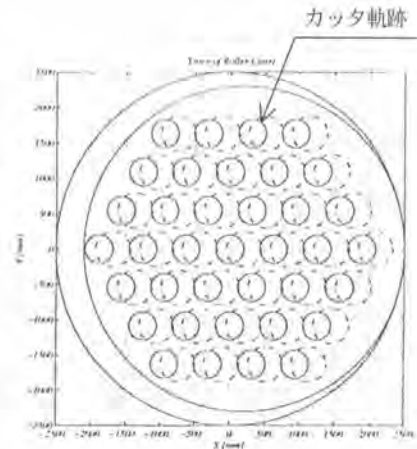


図-3 DPLEX 運動による軌跡

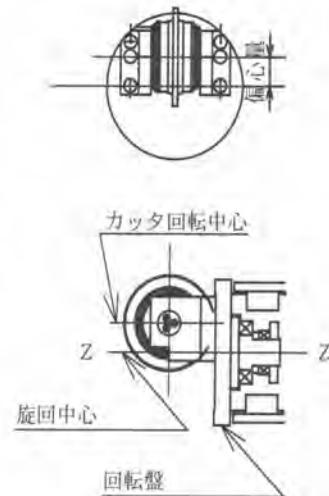


図-4 偏心ローラカッタ

(4) 実験機

実験機およびその仕様を写真-1、表-1に、掘削軌跡を図-5に示す。



写真-1 実験機

表-1 実験機仕様

DPLEX回転機構	
最大トルク	30.8KN・m
最大回転数	22rpm
水平・垂直スライド機構	
最大推力	220KN
最大速度	800cm/min
推進装置	
最大推進推力	500KN
最大推進速度	20cm/min

3. 実験概要

(1) 実験の目的

- 偏心ローラカッタの掘削性、回転追従性の評価および偏心量の選定
- DPLEX回転運動とスライド運動の組み合わせによる影響評価
- 掘削性能の評価

(2) 実験条件

DPLEX 回転数 N_d : 10rpm~20rpm
 掘進速度 V_t : 10mm/min~50mm/min
 ローラカッタ偏心量 E_s : 30mm, 50mm, 100mm
 供試体(モルタル)強度 σ : 50MPa~120MPa

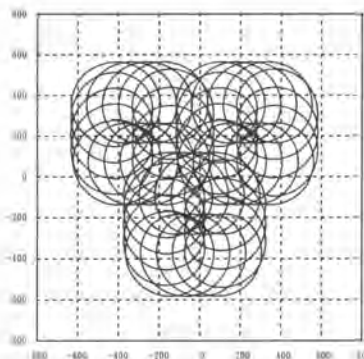


図-5 掘削軌跡

(3) 供試体

今回の実験に使用した供試体は表-2に示す通りである。

表-2 供試体一覧

種類		呼び強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	脆性度
疑似岩1	モルタル	50	50~60	4~5	12~12.5
疑似岩2	モルタル	80	60~70	5~6	11.6~12
実岩	凝灰岩	-	120~140	12~14	10

4. 実験結果

(1) ローラカッタ追従性

実験の結果得られた掘削軌跡を写真-2に示す。偏心量30mm、50mmについては、切り込み量が小さいうちは追従性が良いが、切りこみ量が大きくなると追従性が悪くなる傾向が認められた。これに対して、後方偏心量が最も大きい100mmでは、常に良好な追従性を保ち、掘削軌跡も目標軌跡とほぼ一致していた。

ローラカッタの偏心量と回転トルクの関係を図-6に示す。偏心量が大きいほうがトルクは小さかった。

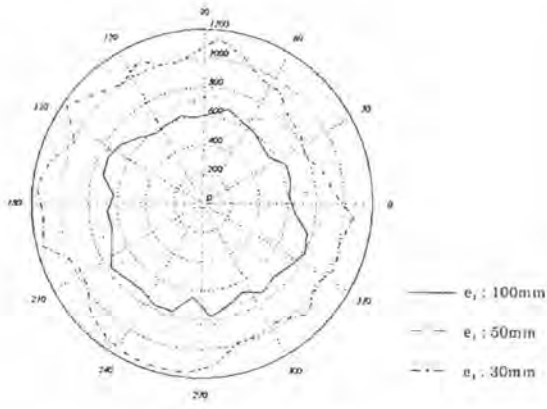


図-6 偏心量—トルク関係



写真-2 供試体掘削状

(2) 負荷特性

図-7、図-8に掘進速度と掘進推力および回転トルクの関係を示す。トルク、推力ともに正の相関関係にあり、比例係数は、岩強度に対応して増加する。

図-10、図-11に掘進推力と接線力およびスライド推力の関係を示す。掘進推力(スラスト力)と接線力(切削力)との関係は0.2程度であり、通常のローラカッタの設計荷重における切削力

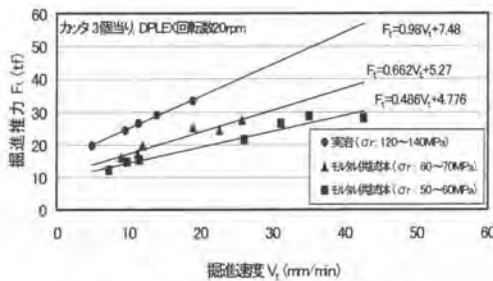


図-7 掘進速度—掘進推力関係

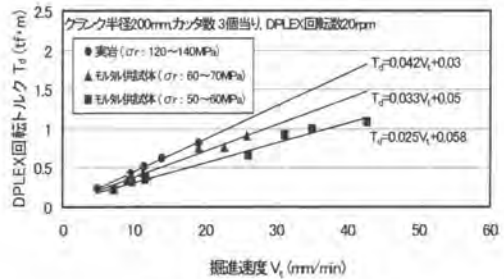


図-8 掘進速度—トルク関係

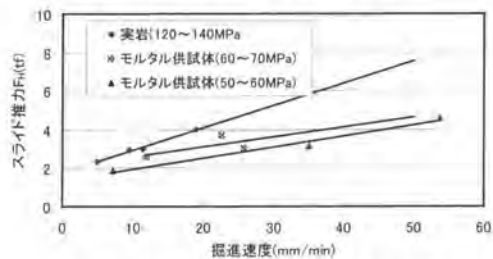


図-9 掘進速度—スライド推力関係

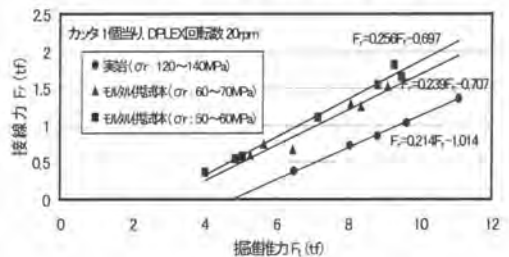
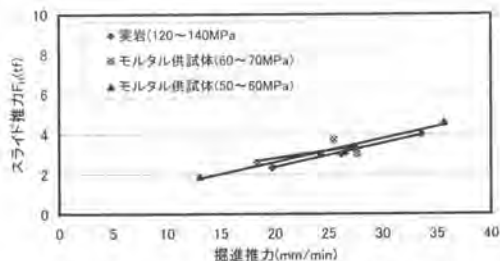


図-10 掘進推力—接線力関係

ノスラスト力比 0.1 に比べて高い。これは、DPLEX-TBMの方がスライド運動を伴った小径回転の連続によって掘削するため、低スラスト力での掘削が可能となったためと考えられる。

スライド推力は掘進推力の10分の1程度であり、これは岩強度による差がほとんど見られなかった。



図一 1 1 掘進推力ースライド推力関係

(3) 掘削体積比エネルギー

偏心多軸機構による岩盤掘削の掘削能力を評価するため、単位体積当たりの地山を掘削するのに必要な動力を表す、「掘削体積比エネルギー」を用いた。掘削体積比エネルギーEsは、以下の式で表される。

$$E_s = \frac{F_t}{A} + \frac{2\pi \cdot N_d \cdot T_d}{A \cdot v_i} + \frac{F_j \cdot v_j}{A \cdot v_i} \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、

A : 掘削断面積 (m²)

Ft : 掘進推力 (tf)

v_i : 掘進速度 (mm/min)

N_d : D P L E X回転数 (rpm)

T_d : D P L E X回転トルク (tf・m)

F_j : スライドジャッキ推力 (tf)

v_j : スライドジャッキ速度 (mm/min)

式(1)の第1項から第3項は、それぞれ掘進系、D P L E X回転系、スライド系の項を表わしているが、今回の実験では、掘進、スライドに比べてD P L E X回転の速度が圧倒的に高いため、掘削能力はD P L E X回転数、トルクに大きく依存している。

また、上述の掘削体積比エネルギーでは、掘削対象の強度特性の影響が含まれているため、掘削体積比エネルギーEsを掘削対象の一軸圧縮強度σ_rとの比である掘削能係数NIを掘削機械の性能評価のための無次元指標として用いた。

$$NI = \sigma_r / E_s \quad \dots \text{式(2)}$$

図一 1 2は、1サイクル当たりの切り込み量と掘削体積比エネルギーとの関係を示す。掘削体積比エネルギーは、切り込み量に依存せずほぼ一定値となり、掘進条件に左右されない物理量であることがわかる。また、実岩の掘削における掘削体積比エネルギーは、45MPa程度であり、同レベルの強度の岩盤に対する従来TBM(後述)の掘削体積比エネルギー(40~65MPa)より優位な値であった。

図一 1 3に切り込み量と掘削能係数の関係を示す。モルタル供試体の場合ほぼ一定値になるのに対し、実岩はモルタルのほぼ倍程度の値となる。これは、実岩の方が高強度の割に掘削し易いということであり、岩とモルタルの脆性の相違などによるものと考えられる。

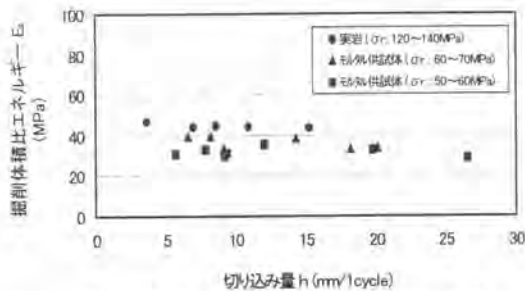


図-1 2 切込み量-掘削体積比エネルギー関係

(4) 従来型TBMとの比較

本実験で行ったDPLEX-TBMの結果から、従来型TBMとの比較を行う。

表-3に従来型TBMの仕様、表-4にDPLEX-TBMと従来型TBMの、同程度の切込み深さにおけるトルク/推力比、掘削体積比エネルギー、掘削能係数を示す。

比較の結果、DPLEX-TBMのトルク/推力比は、従来型TBMの50%程度であった。これは、回転半径が小さいDPLEX運動のため掘削トルクが低減されたものと考えられる。また、掘削体積比エネルギー、掘削能係数は、DPLEX-TBMの方が従来型TBMよりもやや優位な値となった。

以上から、DPLEX-TBMの場合、従来型TBMと同等以下の動力で掘削が可能であることが分かった。

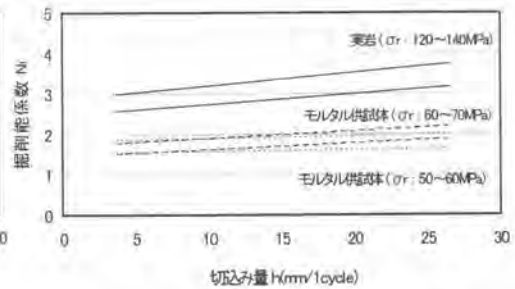


図-1 3 切込み量-掘削能係数関係

表-3 従来型TBM仕様

掘削径	5,000 mm
カッタトルク	108 tf·m
カッタ回転数	7.5 rpm
カッタ径	394 mm
推力	850 tf
動力	1,080 kw

表-4 従来型TBMとの比較

	DPLEX-TBM	従来型TBM
切込み深さ h(mm)	4	2~4
岩強度 σ_r (Mpa)	120~140	100~180
トルク/推力比 (m)	0.05	0.07~0.11
掘削体積比エネルギー Es(MPa)	45	40~65
掘削能係数	2.6~3.1	2.5~2.8

5. おわりに

本実験では、DPLEX運動とスライド運動を組み合わせることで旋回自由なローラカッタによる掘削を行い、良好な掘削が可能であることを確認した。今後は、実機への適用に向けて、掘削ズリの取り込み機構や外周部の掘削機構、掘削反力の支持機構など、偏心多軸機構特有の課題を解決していく所存である。