

偏心多軸岩盤掘削機の開発

DEVELOPMENT OF ECCENTRIC MULTI SHAFT SYSTEM TUNNEL BORING MACHINE

富沢 勉¹⁾・金井和彦²⁾・長谷川春生³⁾・大石善啓³⁾・赤木朋宏⁴⁾

Tutomu TOMISAWA, Kazuhiko KANAI, Haruo HASEGAWA, Yoshihiro OISHI and Tomohiro AKAKI

The DPLEX shield machine, which equips parallel link motion (DPLEX motion) cutter head, can perform tunnel excavation with less torque. The experiment has been carried out to be applied to DPLEX machine for rock excavation. The following results have been cleared.

(1) The rock excavation performance of eccentric roller cutter is smooth, and the optimum eccentric distance is 20 ~ 30% and more to diameter of roller cutter.

(2) The excavation was smooth to be adopted the DPLEX motion by combination with slide motion in vertical plain.

Key Words : eccentric multi shaft system, roller cutter, tunnel boring machine, DPLEX, parallel link

1. はじめに

近年、安全性、省力化、労働環境の改善等の観点から、トンネル掘削においても機械化が急速に進んでおり、山岳トンネルでは、労働条件の改善に加え、高速施工の必要性和経済性からTBM（トンネルボーリングマシン）が注目を浴びている。現在、TBMの施工実績は、主に水路トンネルであるが、道路トンネルの導坑にも安全性と地質調査をかねて導入されており、今後は、さらに大きな断面および任意形状の全断面掘削が求められるものと思われる。

今回、シールドトンネルで実績のある偏心多軸（DPLEX）掘削機構を岩盤掘削に適用するために、偏心ローカッタを装備した任意断面の岩盤掘削機（DPLEX-TBM）の開発を行ったので、その実験概要および結果について報告する。

2. 偏心多軸による掘削機構

偏心多軸機構による地中掘削機は、シールド工法の分野ですでに実用化されており、任意形状のトンネル断面が掘削可能なほか、大断面、長距離施工への適用が期待されている。

図-1は、偏心多軸（DPLEX）シールドの模式図であり、カッタフレームが複数の回転軸先端に偏心して支持され、回転軸を同一方向に回転させるとカッタフレームが平行クランク運動を行い、カッタ形状とほ

-
- 1) 正会員 大豊建設(株) 横浜支店 土木工事部
 - 2) 正会員 大豊建設(株) 技術本部 技術開発部
 - 3) 正会員 三菱重工業(株) 技術本部 技術管理部
 - 4) 三菱重工業(株) 技術本部 高砂研究所

ば相似形の断面を掘削できる機構となっている。

偏心多軸掘削機は、従来の円形断面掘削機に比べてカッタ回転半径が小さいことから、カッタトルクが小さく、摺動距離も小さくなるのでビットの摩耗量も少なくなる。また、個々のカッタビットに作用する切削力とビットの摺動距離は、すべて同じとなるため効率が良く、取り付け位置によるビットの摩耗量は変わらないといった特長がある。

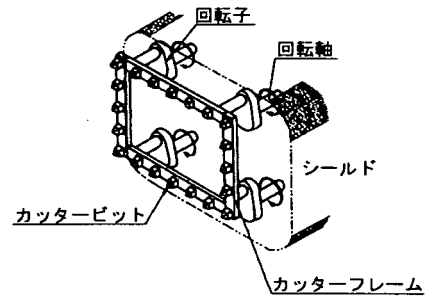


図-1 偏心多軸シールドの掘削機構

3. 偏心多軸掘削機構のTBMへの適用

都市部の軟弱地盤や土砂地山を対象としたシールドの場合、主に切削型のカッタービットにより地山の掘削を行っている。これに対して、中硬岩～硬岩を対象とした岩盤掘削機（TBM）では、通常カッタツールとしてローラカッタが用いられている。カッタービットの場合、偏心多軸掘削機構による平行リンク運動に対応するため、全方向切削可能なビット（クロスルーフビット）を採用しており、良好な結果を得ている。しかし、ローラカッタは、カッタービットのような切削型ではなく、カッタ自体を回転させながら岩盤に押し付ける圧砕型であるため、偏心多軸掘削機構の適用に当たっては以下の課題があった。

（課題）

- ①すべてのカッタの回転半径が同一で小さいため、ローラカッタの追従性が問題となる。
- ②ローラカッタのハウジングサイズの影響により、カッタヘッドに配置可能なカッタ数に制約がある。そのため、平行クランク運動（D P L E X運動）だけでは所定のピッチの軌跡を描くことができず、掘り残しを生じてしまう。

これらの課題を解決するため、以下に示す対策をとることとし、実験によってその検証を行った。

（対策）

- ①ローラカッタは図-2のように旋回自由な構造とし、さらに、平行クランク運動に対して全方向への追従性を良くするために旋回中心から後方に偏心させた。
- ②平行クランク機構に加えて、さらに同一面内で水平・垂直方向にスライドできる機構を付加した。

図-3にローラカッタの掘削軌跡を示す。

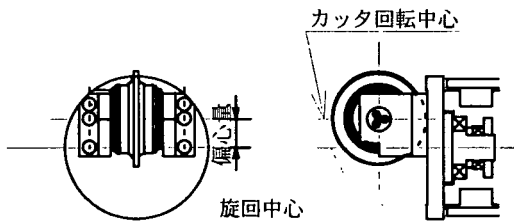


図-2 偏心ローラカッタ

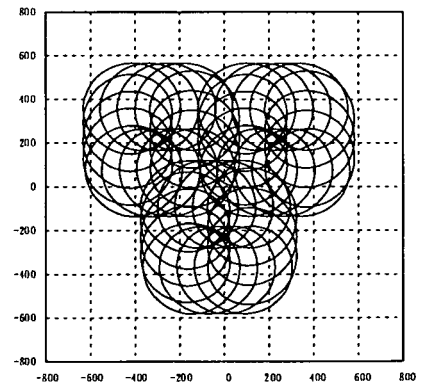


図-3 掘削軌跡

4. 実験概要

4. 1 実験目的

本実験は、上記の新機構についての検証を行うことを目的として、次に示す具体的な技術課題について検討を行った。

- ①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
- ②DPLEX回転条件とスライド条件の組み合わせによる影響評価

③掘削性能の評価

4. 2 実験装置

本実験に用いた実験装置は、クランク長（DPLEX半径）が200mmの3本の偏心クランク軸によって、直径1,200mmの円形カッタヘッドを支持し、平行クランク運動を行う機構と、カッタヘッド駆動部全体が水平および垂直方向にスライド可能な機構を有している。この2つの機構の組み合わせにより図-3に示す掘削軌跡を描く。

また、カッタヘッドには、直径13”のローラカッタを3個配置しており、ローラカッタの偏心量は最大100mmまで可変となっている。

実験装置およびその仕様を写真-1、表-1にそれぞれ示す。

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
鉛直・水平スライド機構	
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

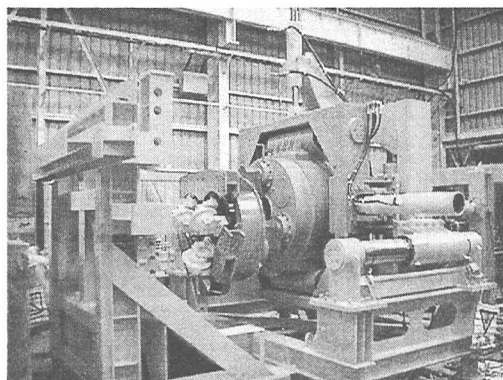


写真-1 実験機

4. 3 掘削供試体

実験においては、掘削対象である供試体の強度および脆性度が、掘削負荷に及ぼす影響を評価するため、表-2に示す3種類の供試体を製作し、掘削実験を行った。

表-2 供試体条件

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. 4 実験条件

主要な実験パラメータを以下に示す。

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 供試体圧縮強度 : 50MPa ~ 120MPa

5 実験結果

5. 1 負荷特性

掘進速度、DPLEX 回転数、ローラカッタ後方偏心量、供試体強度をパラメータとして、DPLEX 回転トルク、掘進推力、スライド力の負荷特性の比較評価を行った。

(1) 掘進速度と DPLEX 回転トルク、掘進推力の関係

図-4、図-5に DPLEX 回転数をパラメータとした DPLEX 回転トルク並びに掘進推力と掘進速度との関係を示す。トルク、推力共に掘進速度との間には正の相関関係が認められ、同一掘進速度条件下では DPLEX

回転数が高いほど掘削トルクが低下する傾向にある。また、図-6にローラカット1個当りの掘進推力と接線力の関係を示すが、速度や回転数には依存せず、比例関係にある。

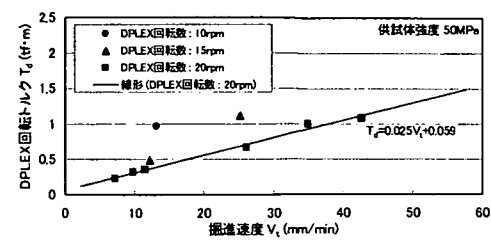


図-4 掘進速度-トルク関係(回転数)

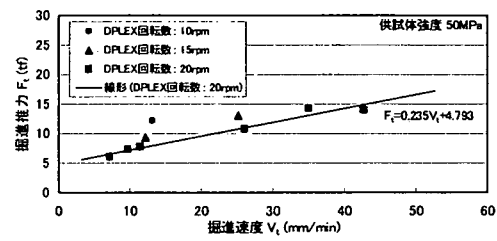


図-5 掘進速度-推力関係(回転数)

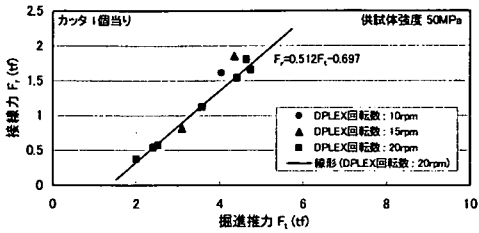


図-6 推力-接線力関係(回転数)

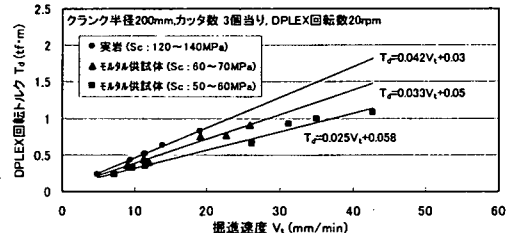


図-7 掘進速度-トルク関係(供試体強度)

図-7、図-8に供試体強度をパラメータとした場合の掘進速度とDPLEX回転トルク並びに掘進推力との関係を示す。いずれも掘進速度に対して線形関係にあり、比例係数は岩強度に対応して増加する。

また、図-9にローラカット1個当りの掘進推力とDPLEX回転トルクの関係を示す。掘進推力（スラスト力）と接線力（切削力）との比例係数は0.5程度であり、通常のローラカットの設計荷重における切削力／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。

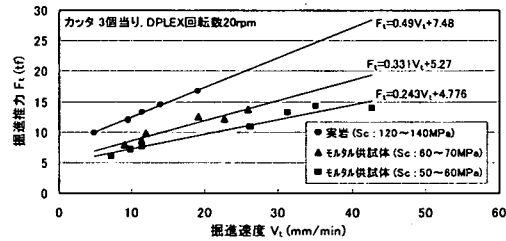


図-8 掘進速度-推力関係(供試体強度)

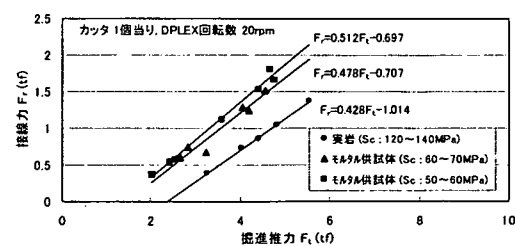


図-9 推力-接線力関係(供試体強度)

(2) 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 E_s は、以下の式で表される。

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

ここで、 A ：掘削断面積、 F_t ：掘進推力 (tf)、 v_t ：掘進速度 (mm/min)、 N_d ：DPLEX 回転数 (rpm)
 T_d ：DPLEX 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、DPLEX 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 DPLEX 回転の速度が圧倒的に高いため、掘削能力は DPLEX 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 E_s を掘削対象の一軸圧縮強度 Sc との比である掘削能係数 Nf 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。

$$Nf = Sc / E_s \quad \cdots \cdots \text{式(2)}$$

図-10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。

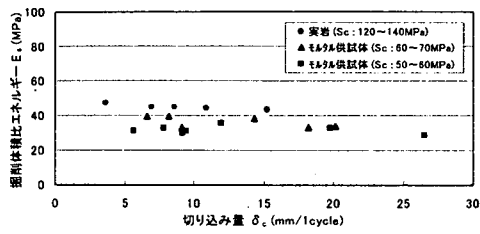


図-10 切り込み量－掘削体積比エネルギー関係

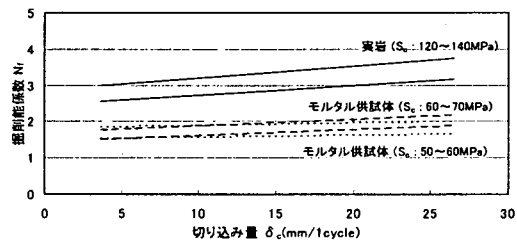


図-11 切り込み量－掘削能係数関係

図-11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、実岩の方が高圧縮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。

5.2 掘削特性

(1) ローラカッタ追従性

ローラカッタ径(13")の10%,17%,33%に対応する後方偏心量30mm,50mm,100mmについて、ローラカッタ追従性の比較評価を行った結果、偏心量30mm,50mmの場合には、切り込み量が小さいうちは追従性が良いが、切り込み量が大きくなると悪化する傾向が認められた。これに対して、今回の実験の範囲では後方偏心量をもっとも大きい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。

(2) 掘削負荷

図-12および図-13に DPLEX 回転トルクと後方偏心量、回転数の関係を示す。この結果、偏心量と回転数が大きいほど DPLEX 回転トルクは小さくなる傾向があり、負の相関関係が認められる。

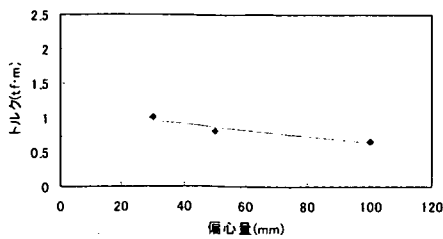


図-12 偏心量－トルク関係

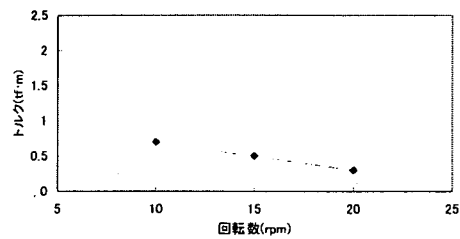


図-13 回転数－トルク関係

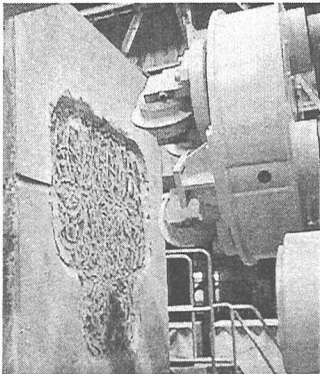
(3) 掘削面状況

写真－２に供試体掘削面の掘削状況を示す。ローラカッタの掘削軌跡のピッチは約 80 ～ 100mm であり、連続した掘削面が得られた。

(4) ローラカッタ摩耗状況

今回の実験におけるローラカッタの総転動距離は、約 2km であるが、ローラカッタの頂点、コーナ部ともに摩耗はほとんど見られなかった(0.1mm 以下)。

以上の結果から、本実験の条件においては、ローラカッタ径の 30 % 程度の後方偏心量を与えることによって、掘削軌跡、負荷共に安定した掘削が可能であった。



写真－２ 掘削軌跡

6. 従来型 TBM との比較

本実験で行った DPLEX-TBM の結果と、カッタヘッド回転タイプの従来型 TBM のうち今回の実験の実岩と岩盤強度がより近いデータについて、特に負荷特性における比較を行う。

表－３に従来型 TBM の仕様を、表－４に DPLEX-TBM と従来型 TBM の、同程度の切り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。

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 DPLEX-TBM実験結果と従来型TBM実機データの比較

	切込み深さ δ (mm)	岩強度 Sc (Mpa)	トルク/推力比 (m)	掘削体積比 $E_{vol} - Es$ (MPa)	掘削能係数
DPLEX-TBM	4	120 ～ 140	0.025	45	0.25 ～ 0.3
従来型 TBM	2 ～ 4	100 ～ 180	0.07 ～ 0.11	40 ～ 65	0.36 ～ 0.4

比較の結果、DPLEX-TBM のトルク／推力比は、従来型 TBM の 30 % 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。

7. おわりに

本実験において、偏心ローラカッタの追従性および掘削性を検証するとともに、偏心多軸（DPLEX）掘削機構の岩盤掘削への適用の可能性を確認することができた。

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必要がある。

参考文献

1) 西松裕一：掘削方法とその評価方法について，昭和 4 7 年度合同秋季大会文化研究会資料，pp.1 ～ 4
2) 長谷川春生・富沢勉ら：偏心多軸岩盤掘削機（DPLEX-TBM）の掘削実験，土木学会第 5 3 回年次学術講演会講演概要集，第 3 部，pp.166 ～ 167，1998.10