

岩用異形断面掘削機構の開発

Development of Non-circular Section Excavation Mechanism for Hard Rock

技術本部 石瀬 文彦^{*1} 大石 善啓^{*2}
 神戸造船所 岡本 和之^{*3}
 大豊建設株式会社 金井 和彦^{*4} 長谷川 春生^{*4}

岩盤を対象とするトンネル掘削機（TBM）において、非円形断面掘削を行う掘削機が開発されている。そこで、シールド掘削機で用いられている平行クランク運動による掘削機構を岩盤掘削に適用することを目的に、掘削ツールとなる偏心式ローラカッタ機構の検討を行った。まず、転動軌跡シミュレーションでは偏心量やカッタ配置等の仕様を検討した。掘削実験では掘削性能、カッタ挙動を確認し、実用性を評価した。その結果、カッタヘッドのクランク運動に鉛直・水平方向のスライド運動を付加することにより、異形断面掘削が可能であること、掘削体積比エネルギーが小さく従来の円形断面掘削よりも掘削効率が高いこと等が分かった。

Tunnel boring machines (TBM) require non-circular section excavators. To apply parallel crank motion to TBMs, the roller cutter excavation mechanism with an eccentric rotated axis was studied. To simulate the cutter rolling locus, the specifications of the eccentric distance and roller cutter arrangement was determined. In an experiment excavating dummy rock, the excavation and cutter performance was estimated. Finding that non-circular sections can be excavated by vertical and horizontal sliding added to parallel crank motion of the cutter head and that the non-circular section excavator excavates efficiently because the specific energy of the excavated rock volume is less than that of conventional TBMs.

1. ま え が き

非円形断面を有するトンネル掘削は、掘削断面の有効活用、施工コストの低減に有効であり、地盤を対象とするシールド掘削機分野では既に複合円や矩(く)形断面等の掘削機が一部実用化されてきている。

しかし、岩盤を対象とするトンネル掘削機（TBM）ではローラカッタを掘削ツールとしているために回転掘削以外の掘削機構の採用が困難であり、新たな掘削機構による非円形断面掘削機の開発が望まれている。

本研究ではシールド工法の分野で実用化されている偏心多軸シールド（DPLEX）掘削機⁽¹⁾の掘削機構を岩盤掘削に適用することを目的とし、新機構の成立性を検証するために下記の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（回転追随性）の評価
- (2) 偏心量とカッタ配置の最適化
- (3) 掘削負荷、掘削性能の評価

2. 偏心式ローラカッタの基礎検討

偏心ローラカッタの外観を図1に示す。ローラカッタは、自由自在な回転テーブル上に回転軸から偏心させて取付けている。

各寸法諸元を決定するために、ローラカッタの掘削軌跡の検討をシミュレーション計算で行った。

図2に掘削軌跡のシミュレーション結果を示す。ローラカッタはハウジングサイズが大きく、カッタヘッドに配置可能なカッタの個数が限られるため、図2(a)に示すようにDPLEX回転だけの場合は掘残しが生じる。したがって、DPLEX回転に鉛直・水平方向のスライド運動を付加した。軌跡のピッチが80 mmになるように鉛直・水平スライド運動を付加したときの計算結果を図2(b)に示す。掘削軌跡がカッタの前面をほぼカバーしていることが分か

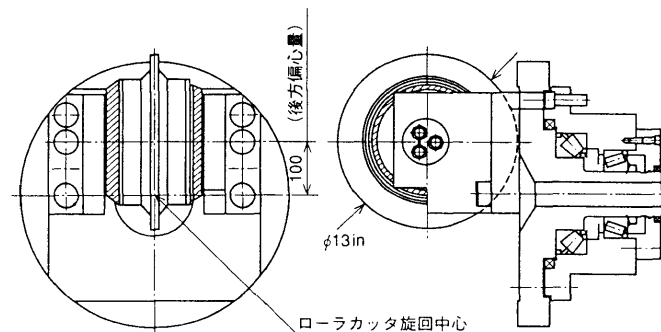


図1 偏心ローラカッタ外観 後方偏心量100 mmの13 in ローラカッタを示す。
Eccentric roller cutter

る。掘削軌跡のピッチは、スライド運動の速度、距離とDPLEX運動の回転速度により求められる。

なお、本実験装置の偏心ローラカッタの諸元は事前の要素実験及び本解析結果から決定した。

3. 掘削実験装置

実験装置の外観を図3に示す。本装置は直径1200 mmのカッタヘッドを3本の偏心クランク軸によって支持し、DPLEX運動を行う。カッタヘッドには直径13 inのローラカッタを3個配置している。また、カッタヘッド駆動部は鉛直・水平方向に各々独立してスライド可能な機構を有し、DPLEX運動との組合せによって2章で計算したような掘削軌跡を描くことができる。なお、推進力は後部に装備した油圧ジャッキにより与えた。

掘削対象物の強度、脆性度が掘削負荷に及ぼす影響を評価するため、モルタルによる疑似岩と実岩（凝灰岩）を供試体として用いた。

供試体の特性を表1に示す。

*1 高砂研究所建機研究推進室長

*3 建設機械部設計課主務

*2 技術管理部研究開発管理課主務 工博

*4 技術本部技術開発部第一技術開発課

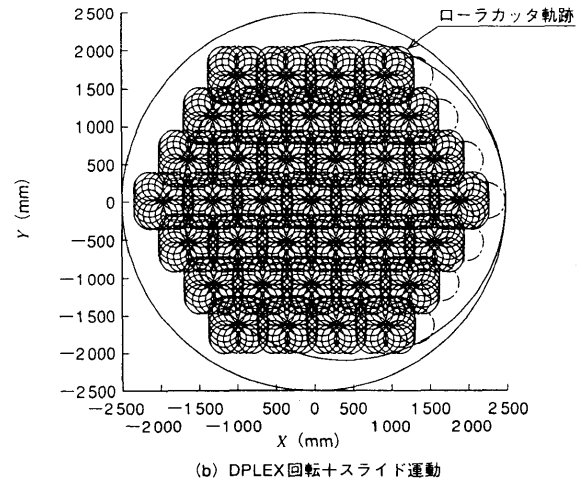
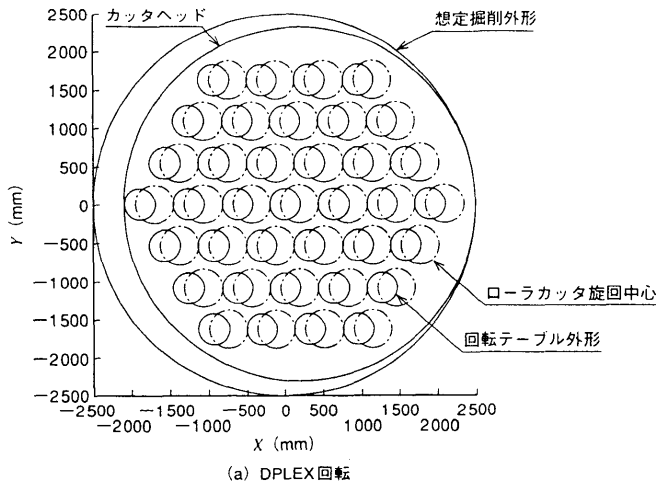


図2 掘削軌跡シミュレーション結果 DPLEX 回転+スライド運動で前面が掘削可能となる。
Result of simulation of cutter rolling locus

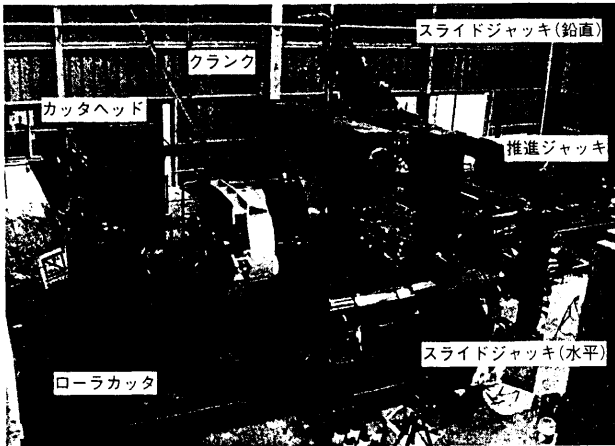
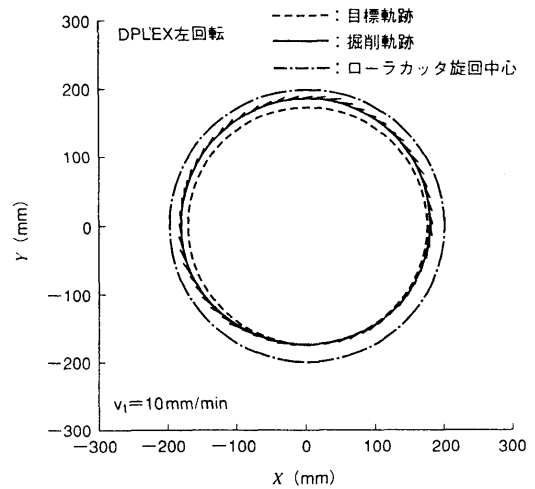


図3 実験装置外観 3個のローラカッタの前に疑似岩盤を取付け掘削実験可能である。
Appearance of testing apparatus



(a) ローラカッタ軌跡

表1 供試体の特性
Characteristic of testing rock model

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

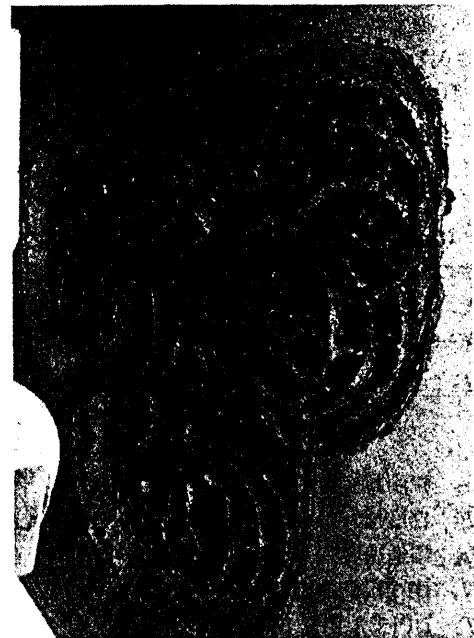
*: ポイントロード試験により推定

4. 掘削実験結果

4.1 掘削状況確認試験

(1) ローラカッタの掘削性 (回転追随性)

ローラカッタの後方偏心量を変化させ追随性の比較評価を行った。後方偏心量 30 mm 時のローラカッタは横滑りが生じ、うまく追従しなかったが、偏心量を大きくすると安定して追従するようになった。偏心量 100 mm で、掘削初期のカッタ軌跡を図 4 (a) に、実掘削時の掘削面の状況を図 4 (b) に示す。一点鎖線はローラカッタの旋回中心の軌跡を示している (図 1 参照)。目標軌跡と実軌跡はほぼ一致しており、また掘削面の状況から偏心ローラカッタによる岩盤掘削は実用性があると判断される。



(b) 掘削面の状況

図4 実掘削時の状況 偏心ローラカッタによる岩盤掘削が可能と考えられる。
Appearance of actual excavating

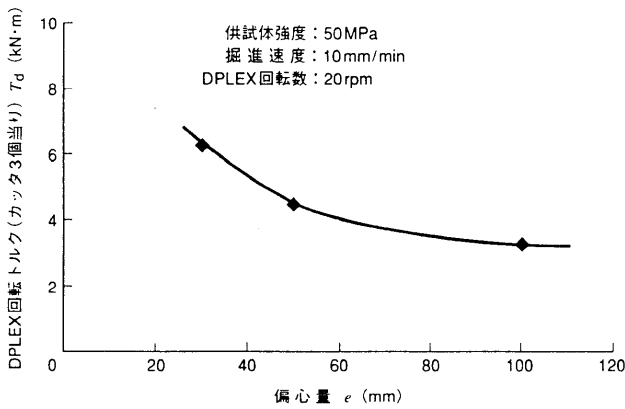


図5 DPLEX 回転トルクと偏心量の関係 偏心量が大きくなるに従い DPLEX 回転トルクが低下する。
Relations between revolution torque and eccentric distance

(2) 偏心量による回転トルク及び推力変化

図5に DPLEX 回転トルクとローラカッタの後方偏心量の関係を示す。偏心量が大きいほど DPLEX 回転トルクが小さくなり偏心量 100 mm 以上ではほぼ一定値になっている。

これより 13 in のローラカッタでは 100 mm 以上の偏心量が必要であることが分かる。

4.2 負荷特性把握試験

掘進速度、DPLEX 回転数、供試体強度等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。

4.2.1 DPLEX 回転トルク、掘進推力と掘進速度の関係

図6(a)、(b)に供試体強度をパラメータとした場合の 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。いずれも掘進速度に対して線形関係にあり、比例系数は供試体強度に対応して増加する。なお、供試体強度が高い場合の DPLEX 回転トルク並びに掘進推力の増加率を比較すると掘進推力の方が大きい。また、図6(c)にカッタ1個当りの接線力と掘進推力の関係を示す。掘進推力（スラスト力）と接線力（切削力）の比例係数は 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/スラスト力比約 0.1 に比べ高くなっている。

これは、DPLEX 運動による掘削はスライド運動を伴った小径回転の連続によって行われ、カッタがこじめるような形で掘削するため、低いスラスト力でも掘削が可能になったことによると考えられる。

4.2.2 掘削体積比エネルギー

掘削方法の評価の指標として、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、単位体積の地山を掘削するのに必要なエネルギーを意味し、式(1)で表される。

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

ここで、

A : 掘削断面積

F_t : 掘進推力

v_t : 掘進速度

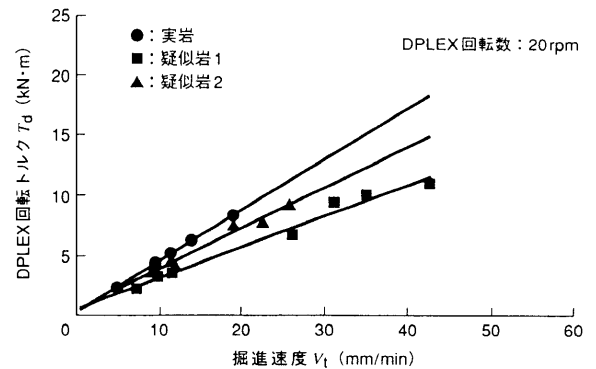
N_d : DPLEX 回転数

T_d : DPLEX 回転トルク

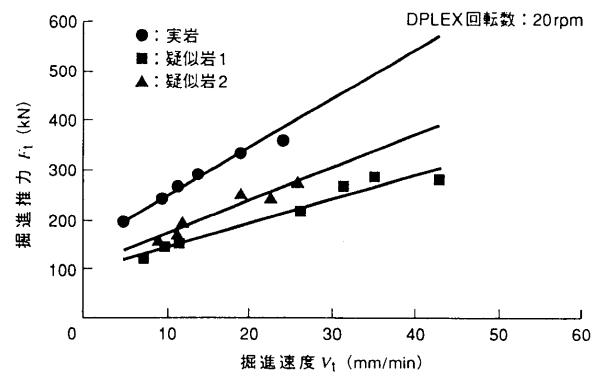
F_j : スライドジャッキ推力

v_j : スライドジャッキ速度

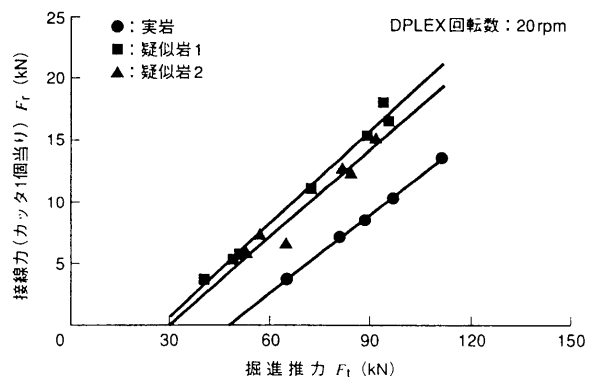
式(1)の第1項～第3項は、それぞれ掘進系、DPLEX 回転系、



(a) DPLEX 回転トルクと掘進速度



(b) 掘進推力と掘進速度



(c) 接線力と掘進推力

図6 偏心ローラカッタの掘削特性 回転トルク、推力は速度、岩強度に対して線形関係にある。
Excavating performance of eccentric roller cutter

スライド系の項を表す。今回の実験では、掘進速度 (1～5 cm/min)、スライド速度 (140～160 cm/min) に比べて DPLEX 回転速度 (10～20 rpm) が圧倒的に高いため、DPLEX 回転系の比エネルギーが全体の大半を占めており、掘削能力は DPLEX 回転数、回転トルクに大きく依存している。

図7(a)に掘削体積比エネルギーと1サイクル当りの切込み量の関係を示す。

掘削体積比エネルギーは切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分かる。実岩掘削の場合約 45 MPa であり、同レベルの圧縮強度を有する岩盤を対象とした従来 TBM の掘削体積比エネルギーが 40～65 MPa (詳細は後述する) であることから、DPLEX-TBM の方がエネルギー効率的に有利であるといえる。

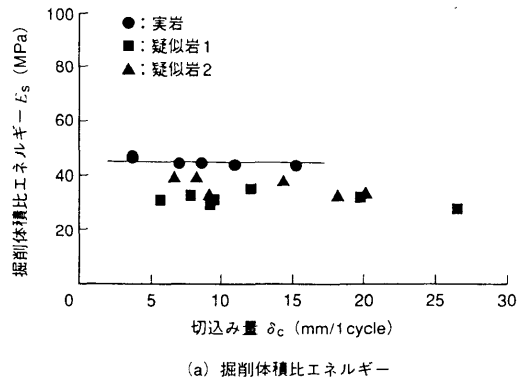
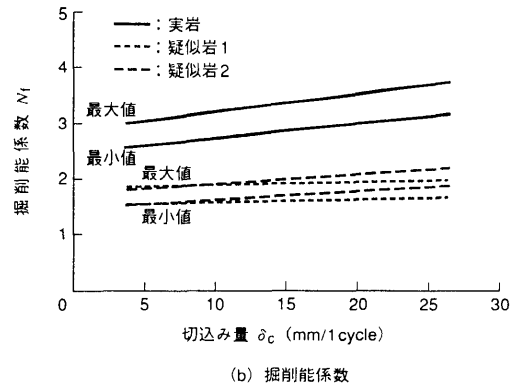


図7 掘削能力の評価 実岩で掘削体積比エネルギーは約45 MPa、掘削能係数は約3である。
Estimation of excavating performance



4.2.3 掘削能係数

前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 と掘削対象の一軸圧縮強度 S_c との比である掘削能係数 N_f を掘削機械の性能評価の無次元指標として用いた。

$$N_f = S_c / E_s \quad (2)$$

図7(b)に切込み量と該切込みにおける掘削能係数の最小及び最大値の関係を示す。実岩の場合、モルタルの約2倍の値となり実岩の方が圧縮強度が高いにもかかわらず掘削しやすいことになる。この理由としては、岩とモルタルの脆性度の相違によると考えられる。

5. 従来 TBM との比較

DPLEX-TBM と従来 TBM の負荷特性比較を行った。なお、従来 TBM については今回の実験の実岩と強度に近い舞子トンネルのデータを用いた⁽²⁾。掘削体積比エネルギー、掘削能係数比較を表2に示す。舞子 TBM のデータには機械抵抗やカッターヘッドでの掘削以外（ずりの取込みなど）で消費される動力も含まれている。

同程度の切込み量における DPLEX-TBM のトルク/推力比は従来 TBM の45%～70%程度である。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。

掘削体積比エネルギー、掘削能係数は DPLEX-TBM の方がやや優位であり、従来 TBM に比べ同等以下の動力で掘削ができる可能性がある。

6. 設計上の留意項目

今回の検討及び実験結果により DPLEX-TBM の基本的な成立性に見通しを得ることができた。実機適用に際して設計上留意すべき項目を以下に示す。

(1) 外周部掘削

今回実験した偏心式ローラカッタは外周部に掘残しを生じる。このため、カッターヘッドより一回り大きくオーバカットする必要がある。今回の実験では外周部掘削のために、傾斜式偏心ローラカッタを考案し効果のあることを確認した。

(2) 掘削ずり取込み機構

従来 TBM は一方向回転であるため、掘削ずりをかき上げ排出可能であるが、DPLEX-TBM ではクランク運動であるため同様の機構によるずりの排出は困難である。

したがって、カッターヘッドの下部にたまるずりをかき込む機

表2 掘削能力の比較

Comparison of excavating performance

	切込み深さ δ (mm)	圧縮強度 S_c (MPa)	トルク/推力比 (m)	掘削体積比 エネルギー E_s (MPa)	掘削能 係数
DPLEX-TBM	4	120～140	0.05	45	2.7～3.1
舞子 TBM	2～4	100～180	0.07～0.11	40～65	2.5～2.8

(注) 舞子 TBM には掘削以外の動力も含む。

構を装備する必要がある。

(3) 掘削反力支持機構

DPLEX-TBM の場合は、DPLEX 回転運動、スライド運動共に、機体の進行方向に対して直角方向の掘削反力が生じる。また、常に機体の中心軸からオフセットした位置での掘削となりピッチングやヨーイングモーメントも発生する。これらのアンバランス力が支持可能なメイングリップを設計する必要がある。

7. あ と が き

DPLEX 運動によって非円形断面を施工可能な、DPLEX-TBM の開発を目的に掘削機構の成立性を検討し以下の成果を得た。

- (1) 掘削ツールである偏心式ローラカッタの追従性に関し、後方偏心量をカッター径の約30%以上とれば安定した掘削軌跡が得られることが分かった。
- (2) DPLEX 運動にスライド運動を付加することにより、カッターヘッド前面をほぼカバーすることができ、本掘削ツールによる非円形の岩盤掘削の見通しを得た。
- (3) 従来の TBM に比較して掘削体積比エネルギーは小さく、効率的な岩盤掘削が可能と考えられる。

今後は、6章に記した留意事項を機体全体の機構、構造などに反映し開発を進めて行く予定である。

なお、本研究は大豊建設(株)と共同開発で実施したものである。

参 考 文 献

- (1) 古川行茂ほか、世界初の円形 DPLEX シールド、トンネルと地下、Vol.28 No.8 (1997) p.663
- (2) 河野英雄ほか、直径5 m の TBM で硬岩に挑む、本四連絡道路舞子トンネル、トンネルと地下 Vol.25 No.2 (1994) p.123